

ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการแตกบิ่นขนาดเล็ก
และอัตราการตัดในกระบวนการตัดวัสดุ WC-12%Co
ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด

A STUDY OF THE INFLUENCE OF WIRE EDM PROCESS
PARAMETERS ON THE MICRO CHIPPING AND CUTTING RATE
OF WC-12%Co BY WEDM



ชัชชัย ไมตรีกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การแตกบิ่นขนาดเล็ก
และอัตราการตัดในกระบวนการตัดวัสดุ WC-12%Co
ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด

ชัชชัย ไมตรีกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การแตกบิ่นขนาดเล็กและอัตราการ
ตัดในกระบวนการตัดวัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธีอีดีเอ็ม
ชนิดเส้นลวด

A Study of the Influence of Wire EDM Process Parameters on the Micro
Chipping and Cutting Rate of WC-12%Co by WEDM

ชื่อ - นามสกุล

นายรัชชัย ไมตรีกิจ

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

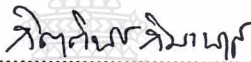
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.

ปีการศึกษา

2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมานุกูล, Ph.D.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชยะ ปราณิตพลกรัง, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 15 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กและอัตราการตัดในกระบวนการตัดวัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด
ชื่อ - นามสกุล	นายรัชชัย ไมตรีกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การผลิตแม่พิมพ์ปั๊มตัดขึ้นรูปโลหะแผ่นบางเป็นงานความละเอียดสูง คมตัดแม่พิมพ์ต้องมีความคมและแข็งแรงที่ดีเยี่ยม ซีเมนต์คาร์ไบด์มีคุณสมบัติเด่นทางด้านความแข็งและด้านทานการสึกหรอสูง นิยมนำมาแปรรูปเป็นคมตัดแม่พิมพ์ที่ต้องผลิตขึ้นงานในปริมาณมาก ซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co มักพบปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กบนคมตัด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการตัด WC-12%Co ด้วยเครื่อง Wire EDM ที่มีผลกระทบต่ออัตราการตัดและการแตกบิ่นขนาดเล็กซึ่งทดสอบด้วยวิธีการเจียรระไนราบ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ แผ่นซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ความหนา 16 มิลลิเมตร มีขนาดเกรน 0.3-0.5 ไมครอน และค่าความแข็ง 93.1 HRA มาทำการตัดด้วยเส้นลวดอีดีเอ็มชนิดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร ให้เป็นช่องคมตัดของคายนรูปร่าง 2x3 มิลลิเมตร ปรับปัจจัยควบคุมในขั้นตอนการตัดหยาบแต่ละปัจจัย 3 ระดับได้แก่ กระแสไฟฟ้าคัทซาร์จ, เวลาปิด และแรงดันไฟฟ้าเก็บปดิสซาร์จ โดยการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array L₂₇ ตามวิธีของทากูชิ

ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าคัทซาร์จ, เวลาปิด และแรงดันไฟฟ้าเก็บปดิสซาร์จ มีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กและอัตราการตัดอย่างมีนัยสำคัญ ระดับปัจจัยที่เหมาะสมทำให้ขนาดของการแตกบิ่นน้อยที่สุด 6.5 ไมครอนคือ กระแสไฟฟ้าคัทซาร์จ 9 แอมป์, แรงดันไฟฟ้าเก็บปดิสซาร์จ 43 โวลท์ และเวลาปิด 12 ไมโครวินาที และระดับปัจจัยที่ทำให้อัตราการตัดมากที่สุด 65.2 มม²/นาที คือ กระแสไฟฟ้าคัทซาร์จ 9 แอมป์, เวลาปิด 6 ไมโครวินาที และแรงดันไฟฟ้าเก็บปดิสซาร์จ 37 โวลท์ อัตราการตัดสูงขึ้นทำให้ขนาดของชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ลดลง และทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กลดลง

คำสำคัญ : ซีเมนต์คาร์ไบด์ เครื่องอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด คมตัดของคายนรู ทากูชิ

Thesis Title	A Study of the Influence of Wire EDM Process Parameters on the Micro Chipping and Cutting Rate of WC-12%Co by WEDM
Name – Surname	Mr. Thaschai Maitreegija
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Chaiya Praneetpongung, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

A process of die manufacturing entails a high precision which cutting edge requires excellent sharpness and strength. Cemented carbides carry remarkable properties of high hardness and wear resistance. They are widely used as die blades for a large volume of work. However, micro chipping on the die blade is usually found when a WC-12% Co type is used. This research aimed at investigating the influences of process parameters in machining with a WC-12% Co by Wire EDM on a cutting rate and micro chipping of edge, which it tested by surface grinding.

The material used in this experiment was a WC-12% Co cemented carbide plate. It was thickness 16 mm. The grain size was 0.3-0.5 microns with a hardness of 93.1 HRA. The plate was cut using an electrode brass wire with a diameter of 0.2 mm. Work pieces were cut into a rectangular hole size of 2x3 mm. Each factor controlled a rough cutting process and was adjusted into 3 different levels, including current discharge, off-time, and voltage gap. The experiment was designed based on an orthogonal array L_{27} of the Taguchi method.

The results indicated that current discharge, off-time, and voltage gap had a significant influence on micro chipping and a cutting rate. The optimal factors which performed the least micro chipping at 6.5 μm were current discharge at 9 A, voltage gap at 43 V, and off-time at 12 μs . Furthermore, the results revealed that the levels of the factors that performed the highest cutting rate at 65.2 mm^2/min were current discharge at 9 A, voltage gap at 37 V, and off-time at 6 μs . In addition, While a high cutting rate led to a recast layer decreased and a reduction of micro chipping.

Keywords : Cemented carbide Wire EDM Die blade Taguchi

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.วิบุญ ตั้งวโรดมบุญกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำชี้แนะตลอดจนช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความครบถ้วนสมบูรณ์ ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำแต่ละรายวิชาทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทเพาะบ่มความรู้ให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ในหลักสูตรวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณสถาบันมาตรฐานวิชาชีพที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบ โครงสร้างทางจุลภาค ขอขอบคุณบริษัทยามาเก็น (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้โอกาสศึกษาและสนับสนุนทางด้านเครื่องจักรอุปกรณ์และวัสดุสำหรับใช้ทำการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ นายนิศย์ ไมตรีกิจ ผู้เป็นบิดา นางบุญปิ่น ไมตรีกิจ ผู้เป็นมารดา และตลอดจนญาติพี่น้องที่มอบทั้งความรัก และเป็นกำลังใจให้เสมอมา ในระหว่างที่ศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธัชชัย ไมตรีกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	14
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 แนวคิด.....	15
2.2 พื้นฐานการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์.....	15
2.3 กระบวนการตัดเซาะด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า.....	17
2.4 สารเหลวตัวกลาง.....	19
2.5 เส้นลวดตัวนำไฟฟ้า.....	20
2.6 อิทธิพลทางความร้อนที่มีต่อพื้นผิวงาน EDM.....	21
2.7 ซีเมนต์คาร์ไบด์.....	23
2.8 อัตราการตัดวัสดุ.....	25
2.9 การออกแบบการทดลองแบบทฤษฎี.....	26
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	43
3.1 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการทดลองขั้นต้น	49
3.4 แผนการดำเนินงานวิจัยและเงื่อนไขการทดลอง	52
3.5 การออกแบบการทดลอง.....	54
3.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองและการเก็บบันทึกข้อมูล	57
3.7 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	66
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นต้น	66
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม	68
4.3 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคเชิงสังเกตการณ์.....	83
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	88
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลทดลองขั้นต้น	88
5.2 สรุปผลการวิเคราะห์ผลทดลองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	88
5.3 สรุปการวิเคราะห์ผลทาง โครงสร้างจุลภาค	89
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก ภาพประกอบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	95
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	104
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่.....	113
ประวัติผู้เขียน	127

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์.....	23
ตารางที่ 2.2 ตารางออร์โทกอนัลอาร์เรย์มาตรฐาน (Standard Orthogonal Array).....	27
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way ANOVA).....	33
ตารางที่ 2.4 สรุปลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยควบคุมในการทดลอง.....	55
ตารางที่ 3.2 ตารางการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array $L_{27}(3^3)$	55
ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หลายปัจจัยพร้อมกัน.....	64
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดลองขั้นต้นของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด.....	66
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ One-Way ANOVA ของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด.....	67
ตารางที่ 4.3 ปัจจัยควบคุมและอัตราการตัด.....	69
ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) S/N - Ratios ของอัตราการตัดเฉลี่ย.....	71
ตารางที่ 4.5 ปัจจัยควบคุมและ S/N - Ratios ของอัตราการตัดเฉลี่ย.....	73
ตารางที่ 4.6 ผลต่าง S/N - Ratios เฉลี่ยของอัตราการตัดเฉลี่ย.....	74
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการตัด.....	75
ตารางที่ 4.8 ปัจจัยควบคุมและการแตกบิ่นขนาดเล็ก.....	76
ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) S/N - Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย.....	78
ตารางที่ 4.10 ปัจจัยควบคุมและ S/N - Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย.....	80
ตารางที่ 4.11 ผลต่าง S/N - Ratios เฉลี่ยของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย.....	81
ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบการแตกบิ่นขนาดเล็ก.....	82
ตารางที่ ก.1 ความหมายของปัจจัยในตารางค่าไฟมาตรฐาน (E-condition).....	99
ตารางที่ ข.1 รูปถ่ายพื้นผิวตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน (OM) กำลังขยาย 500 เท่า.....	105
ตารางที่ ข.2 บันทึกเวลาตัด (Cutting time).....	106
ตารางที่ ข.3 รูปถ่ายด้านหน้าคมตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด (MM) กำลังขยาย 50 เท่า.....	107

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะการตัดเฉือนโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์สองคมตัด	15
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเจียรระไนด้วยเครื่องเจียรระไนราบ.....	16
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการทำงานพื้นฐานของเครื่องจักร Wire EDM.....	17
รูปที่ 2.4 หลักการของกระบวนการกัดเซาะด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า	18
รูปที่ 2.5 เรซินสำหรับปรับสภาพน้ำดีไอระบบแบบหมุนเวียน.....	20
รูปที่ 2.6 ลักษณะของม้วนลวดที่ในงาน Wire EDM.....	21
รูปที่ 2.7 ชั้นผิววัสดุที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการ EDM	21
รูปที่ 2.8 ลักษณะของการคิสซาร์จในงานตัด Wire EDM	22
รูปที่ 2.9 ขนาดเกรน และปริมาณโคบอลต์ของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ใช้สำหรับงานต่างๆ	25
รูปที่ 2.10 แสดงพื้นที่ตัดด้วยวิธี Wire EDM.....	26
รูปที่ 2.11 แสดงผลกระทบของขนาดของเม็ดเกรนที่มีต่ออัตราการตัด	37
รูปที่ 2.12 แสดงผลกระทบของส่วนผสม โคบอลต์ที่มีต่ออัตราการตัด.....	38
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของส่วนผสม โคบอลต์ที่มีต่อความหยาบผิวของซีเมนต์คาร์ไบด์...	38
รูปที่ 2.14 รอยกดทดสอบความแข็งและ โมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นผิวบนภาคตัดขวางชิ้นงาน.....	39
รูปที่ 2.15 แสดงองค์ประกอบความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงาน โลหะแผ่น	40
รูปที่ 2.16 ความสมบูรณ์ของชั้นผิวเจียรระไน (a), ผิวขัดเงา (b), ผิวเจียรระไนอบคลายเครียด (c)	41
รูปที่ 3.1 เครื่อง CNC Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS	43
รูปที่ 3.2 น้ำดีไอ (Deionization Water; DI).....	44
รูปที่ 3.3 เส้นลวดทองเหลือง ยี่ห้อ Sumitomo	44
รูปที่ 3.4 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ FBT รุ่น JS-609	45
รูปที่ 3.5 เครื่องเจียรระไนราบ ยี่ห้อ Okamoto รุ่น Grind-X.....	45
รูปที่ 3.6 ล้อหินเจียรระไน 14A1 RESIN(D) SDC#SDC#400 ขนาด D180 H31.75 T13 X5 U10....	46
รูปที่ 3.7 น้ำยาหล่อเย็น METALINA D202.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์วัดขนาด ยี่ห้อ Nikon รุ่น MM-400 (DP-E1).....	47
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-5410V	47
รูปที่ 3.10 แผ่นซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co.....	48
รูปที่ 3.11 คุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co	48
รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์ปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยแผนภูมิเหตุและผล	49
รูปที่ 3.13 ทฤษฎีค่าไฟในงานตัดด้วยวิธี Wire EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS	50
รูปที่ 3.14 ระดับค่าปัจจัยภายในที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเร็วตัดในการตัดหยาบ	51
รูปที่ 3.15 ค่าความแข็งและลักษณะพื้นผิวตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า.....	52
รูปที่ 3.16 แบบขึ้นทดลองและพื้นผิวตัดที่ทำการศึกษา	53
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการตัด Wire EDM	54
รูปที่ 3.18 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	56
รูปที่ 3.19 วิธีการวัดขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยกล้อง MM กำลังขยาย 50 เท่า.....	57
รูปที่ 4.1 กราฟแผนภาพกล่องแสดงการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด	67
รูปที่ 4.2 กราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด.....	68
รูปที่ 4.3 กราฟข้อมูลในการทดลองของอัตราการตัด	70
รูปที่ 4.4 กราฟการแจกแจงแบบปกติของอัตราการตัดเฉลี่ย.....	70
รูปที่ 4.5 กราฟ S/N-Ratios ของอัตราการตัดเฉลี่ย.....	74
รูปที่ 4.6 กราฟข้อมูลในการทดลองของการแตกบิ่นขนาดเล็ก.....	77
รูปที่ 4.7 กราฟการแจกแจงแบบปกติของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย	77
รูปที่ 4.8 กราฟ S/N-Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย	81
รูปที่ 4.9 ขอบคมตัดของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองซ้ำยืนยันผล.....	82
รูปที่ 4.10 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) ของพื้นผิววัสดุพื้นฐาน (Base)	83
รูปที่ 4.11 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) พื้นผิวตัดด้วยอัตราการตัดแบบดั้งเดิม.....	84
รูปที่ 4.12 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) พื้นผิวตัดด้วยอัตราการตัดที่ดีที่สุด	84

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 SEM ภาคตัดขวางที่เกิดจากปัจจัยแบบดั้งเดิม (ซ้าย) และจากปัจจัยที่ดีที่สุด (ขวา).....	85
รูปที่ 4.14 กราฟ EDS เปรียบเทียบธาตุทั้งสแตมบนพื้นผิวตัด	86
รูปที่ 4.15 กราฟ EDS เปรียบเทียบธาตุประกอบบนพื้นผิวตัด	86
รูปที่ ก.1 โปรแกรม Mediapt CAD/W ซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ MEATH	96
รูปที่ ก.2 แบบจำลองการตัดชิ้นทดลอง.....	96
รูปที่ ก.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องจักร	98
รูปที่ ก.4 การตัดชิ้นทดลองภายใต้สารเหลวตัวกลาง (Submerge)	98
รูปที่ ก.5 ตารางค่าไฟมาตรฐานสำหรับตัดวัสดุทั้งสแตมคาร์ไบด์ความหนา 20 มิลลิเมตร	100
รูปที่ ก.6 ชิ้นทดลองในงานวิจัย	101
รูปที่ ก.7 ตัวอย่างลักษณะของการการตัดที่ไม่เสถียร (Instability)	101
รูปที่ ก.8 การทดสอบการแตกบิ่นบนคมตัดด้วยการเจียรระนาบ (Surface grinding).....	102
รูปที่ ก.9 การตรวจวัดขนาดการแตกบิ่นเล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด (MM)	102
รูปที่ ก.10 ตารางการแจกแจงแบบปกติ F (F-Distribution).....	103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

I_p	กระแสไฟฟ้าคิซชาร์ต มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere; A)
T_{OFF}	เวลาปิด มีหน่วยเป็นไมโครวินาที (Micro second; μs)
V_G	แรงดันไฟฟ้าเก็บคิซชาร์ต มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt; V)
FR-A	ความเร็วตัด (Feed rate adjustment) มีหน่วยเป็น mm/min
L	ระยะทางเดินตัดตามเส้นรูปร่าง (Profile) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
H	ความหนาวัสดุ (Thickness) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)
A_C	พื้นที่ตัด (Cutting area) มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
t	เวลาตัด (Cutting time) มีหน่วยเป็น นาที (min)
CR	อัตราการตัด (Cutting rate) มีหน่วยเป็น mm^2/min
mC	ขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็ก (Micro chipping) มีหน่วยเป็น μm (ไมครอน)
$d.f$	ระดับขั้นความเสรี หรือองศาอิสระ (Degree of freedom; ν)
ANOVA	การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)
α	ระดับความมีนัยสำคัญ (Significant)
R^2	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination)
F_0	ค่าทดสอบเอฟ หรืออัตราส่วนความแปรปรวน (F-ratios)
F_{α, ν_1, ν_2}	ค่าวิกฤตที่ระดับการยอมรับ $1 - \alpha$ ได้มาจากตารางแจกแจงแบบปกติ F
$\% \rho$	อิทธิพลปัจจัยเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด (Percentage Contribution)
y_i	ค่าตอบสนอง หรือสิ่งที่วัดได้ในแต่ละครั้งของแต่ละการทดลอง
S/N	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios)
Σ	ผลรวม
Δ	ผลต่าง
$\hat{\eta}$	ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ดีที่สุดจากการพยากรณ์
Wire EDM	เครื่องอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด (Wire Electrical Discharge Machining; WEDM)
WC-12%Co	ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีทังสเตน 88% wt และ โคบอลท์ 12% wt โดยน้ำหนัก
Die blade	ขอบคมตัดของดาบ ซึ่งประกอบด้วยผิวข้างคมตัดกับผิวหน้าคมตัด
Adaptive control	การควบคุมแบบปรับค่าได้ในขณะที่ตัดหลัก หรือตัดหยาบ
Wire broken	เส้นลวดอิเล็กทรอนิกส์ โทรคขาดเกิดจากการตัดไม่เสถียร (Instability)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตแม่พิมพ์ปั๊มตัดขึ้นรูปโลหะแผ่นบางเป็นงานที่มีความละเอียดสูง โดยเฉพาะคมตัดต้องมีความคมและแข็งแกร่งที่ตีเยี่ยม ซีเมนต์คาร์ไบด์ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานกันอย่างหลากหลายเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นทางด้านความแข็งและด้านทานการสึกหรอสูง แต่มีราคาค่อนข้างแพง นิยมนำมาใช้แปรรูปเป็นชิ้นส่วนคมตัดแม่พิมพ์ที่ต้องผลิตขึ้นงานในปริมาณมาก ซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co มีความแข็งแรงสูงมากสำหรับงานตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์สองคมตัด ซึ่งพบปัญหาการแตกบิ่นบนขอบคมตัดทั้งในขณะที่ตัดเฉือนชิ้นงานและเจียรระไนให้เป็นคมตัด แต่ไม่พบปัญหาดังกล่าวกับซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดอื่น เช่น RD50 และ MG30 เป็นต้น ปัญหาคมตัดของแม่พิมพ์แตกบิ่นทำให้ชิ้นงานเป็นตำหนิ โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีข้อกำหนดขนาดตามแบบชิ้นงานที่มีค่าพิถีพิถันความเผื่อน้อย

หลายปีที่ผ่านมาได้มีตัดการแปรรูปขึ้นส่วนแม่พิมพ์โดยเครื่องอีดีเอ็มชนิดเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machine; Wire EDM) กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีลักษณะการตัดให้เป็นรูปร่างแบบทะลุผ่านคล้ายกับการเลื่อยฉลุ ด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก 0.1 – 0.3 มิลลิเมตร สามารถตัดรูปร่างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กสลับซับซ้อน และควบคุมความคลาดเคลื่อนขนาดได้น้อยถึง +/- 2 ไมครอน [1] กระบวนการตัดทางไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนได้สูงถึง 8,000 – 12,000 องศาเซลเซียส [2] ซึ่งมากกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุโดยส่วนใหญ่ จึงไม่ใช่อุปสรรคต่อการตัดวัสดุแข็งทุกชนิดที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ฉะนั้นจึงเหมาะสำหรับการตัดโลหะแข็งที่ไม่สามารถทำได้โดยเครื่องจักรกลทั่วไป เพื่อทำเป็นคมตัดของแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่น

ด้วยเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการลดปัญหาการแตกบิ่นของการแตกบิ่นบนขอบคมตัด ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากคุณภาพของพื้นผิวตัดจากกระบวนการ Wire EDM เพราะพื้นผิวตัดเป็นองค์ประกอบของคมตัดคายน์ โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักที่ใช้ในการตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรคทองเหลือง ให้เป็นช่องคมตัดรูปร่างขนาด 2 x 3 มิลลิเมตร สูง 16 มิลลิเมตร ด้วยปัจจัยควบคุมในขั้นตอนการตัดหยาบซึ่งใช้พลังงานตัดสูงที่สุด [1] แต่ละปัจจัย 3 ระดับ คือกระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ, เวลาปิด และแรงดันไฟฟ้าเก็บคิซซาร์จ ต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กและอัตราการตัด โดยออกแบบการทดลอง Orthogonal array L₂₇ (3³) ตามวิธีทากูชิ ส่วนปัจจัยอื่นและปัจจัยในขั้นตอนการตัดละเอียดจะถูกกำหนดให้เป็นค่าในปัจจุบัน ขอบตัดหรือคมตัดของคายน์ที่ได้จะถูกทดสอบด้วยการเจียรระไนราบในสภาวะเดียวกันก่อนที่จะวัดขนาดรอยแตกบิ่น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อลดปัญหาการแตกบิ่นบนขอบคมตัดดาวยันวัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธี Wire EDM

1.2.2 เพื่อเพิ่มอัตราการตัดของวัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธี Wire EDM

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co มีขนาดเกรน 0.3-0.5 ไมครอน มีความแข็ง 93.1 HRA มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร, ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 16 มิลลิเมตร

1.3.2 กระบวนการตัดอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด ในการทดลองประกอบไปด้วยดังนี้

- 1) เครื่องจักรกล CNC Wire EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS ประเภทตัดไดน้ำ
- 2) ปั้งจี้และปั้งจี้ในขั้นตอนการตัดละเอียดทั้งหมดกำหนดให้มีค่าคงที่
- 3) สารเหลวตัวกลางคือน้ำดีไอ (Deionization water: DI)
- 4) เส้นลวดทองเหลืองเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร

1.3.3 การออกแบบการทดลอง Orthogonal array $L_{27} (3^3)$ ตามกรรมวิธีทากูชิ

1.3.4 ปั้งจี้ควบคุมในกระบวนการตัดหยาบ 3 ปั้งจี้ แต่ละปั้งจี้มี 3 ระดับ ดังนี้

- 1) กระแสไฟฟ้าคัดสขารจ (I_p) ที่ระดับ 5, 7 และ 9 Amp
- 2) เวลาปิด (T_{OFF}) ที่ระดับ 6, 9 และ 12 μ s
- 3) แรงดันไฟฟ้าเก็บคัดสขารจ (V_c) ที่ระดับ 37, 40 และ 43 Volt

1.3.5 ตัวแปรตอบสนองในการทดลอง ดังนี้

- 1) การแตกบิ่นขนาดเล็ก (Micro chipping; mC)
- 2) อัตราการตัด (Cutting rate; CR)

1.3.6 ทดสอบการแตกบิ่นของคมตัดด้วยวิธีการเจียรระไนราบ (Surface grinding machining)

1.3.7 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเชิงสังกตการณ์บนพื้นผิวตัดและของภาคตัดขวางแนวตัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้รู้อิทธิพลของปั้งจี้ที่มีต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดและอัตราการตัด

1.4.2 ระดับปั้งจี้ที่เหมาะสมในการตัดแปรรูปคมตัดของดาวยันจากวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co

1.4.3 ทราบถึงพฤติกรรมทางโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวตัดและภาคตัดขวางแนวตัด ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดเส้นลวดของวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co

บทที่ 2

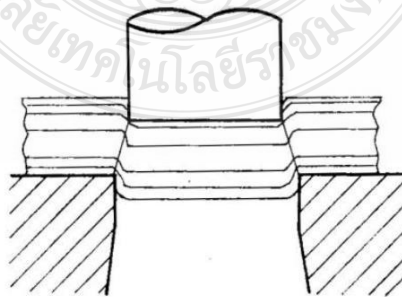
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิด

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อพื้นผิวตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยวิธีอีดีเอ็ม ชนิดเส้นลวด ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผิวข้างคมตัดของดาบน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัย และหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้คุณภาพของคมตัดทางด้านความคมและความแข็งแรง จึงได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

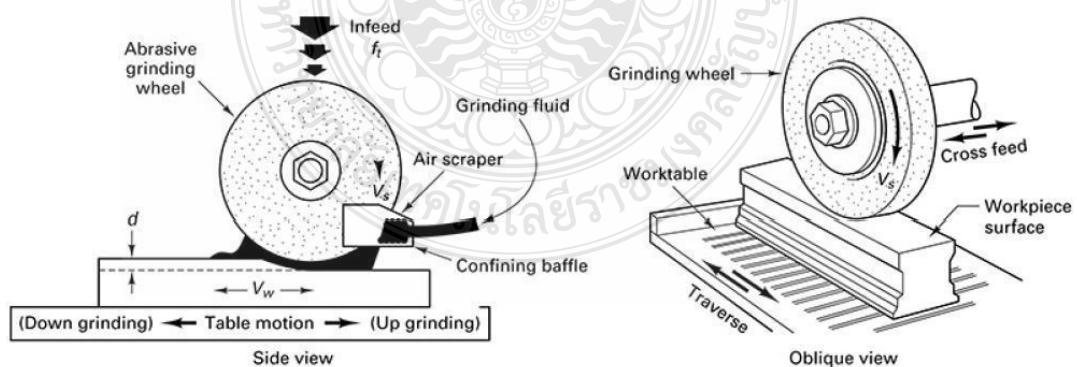
2.2 พื้นฐานการขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์

กระบวนการตัดโลหะแผ่นด้วยชุดแม่พิมพ์ คือกระบวนการที่ทำให้โลหะแผ่นแตกขาดออกจากกันแล้วได้ชิ้นงานรูปร่างที่ต้องการด้วยแรงกระทำที่กระทำผ่านคมตัดสองคมตัดบนชุดแม่พิมพ์ โดยการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุในสถานะที่เป็นของแข็งให้เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation) กระบวนการตัดโลหะแผ่น จำเป็นต้องการแรงที่มากระทำต่อวัสดุมาก ดังนั้นกระบวนการตัดโลหะแผ่นด้วยชุดแม่พิมพ์จึงต้องกระทำบนเครื่องปั๊ม โลหะ ฉะนั้นคมตัดแม่พิมพ์จะต้องมีความสามารถในการทนต่อแรงกระทำกลับต่อวัสดุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ด้วย การผลิตที่ใช้ชุดแม่พิมพ์ในการกำหนดรูปร่างชิ้นงานนั้น ทำให้กระบวนการตัดโลหะแผ่นมีคุณลักษณะพิเศษต่างๆ ที่ดีคือ ให้อัตราการผลิตสูง (High production) ขนาดความเที่ยงตรงของชิ้นงานดี (High accuracy) และคุณภาพการผลิตซ้ำดี (Good repeatability) [3] ฉะนั้นวัสดุที่จะนำมาทำเป็นคมตัดจะต้องมีความแข็ง ด้านทานต่อการสึกหรอ ด้านทานต่อการหลอมละลายติด ทนทานต่อรอยขีดข่วน ด้านทานต่อการแตกบิ่นหรือการแตกหัก และมีความเหนียว (Toughness)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการตัดเฉือนโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์สองคมตัด [4]

การเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ผู้ (Punch) และแม่พิมพ์เมีย (Die) ขึ้นอยู่กับปริมาณชิ้นงานที่จะทำการผลิต ถ้าปริมาณการผลิตน้อยก็อาจจะใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน ถ้าปริมาณการผลิตปานกลางใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool steel) และถ้าปริมาณการผลิตมากใช้วัสดุประเภททั้งสแตนคาร์ไบด์ และรวมถึงความสามารถในการเคลือบผิวแข็ง (Film coating) เป็นต้น มีจุดประสงค์เพื่อช่วยลดการซ่อมบำรุงแม่พิมพ์ ด้วยวิธีการพยายามที่ลดจำนวนครั้งในการเจียรในล้มคมตัดให้น้อยครั้งลง รวมไปถึงลดโอกาสการเกิดความผิดจากการประกอบกลับในชิ้นงานซ่อมแซมแม่พิมพ์ ดังนั้นซีเมนต์คาร์ไบด์จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง และนิยมนำมาใช้ทำเป็นชิ้นส่วนคมตัดบนชุดแม่พิมพ์ (Die set) ซึ่งจะต้องผ่านการแปรรูปด้วยกรรมวิธี EDM และเพื่อให้มีความเที่ยงตรงและแม่นยำของชิ้นส่วนเหล่านี้ในขั้นตอนสุดท้าย มักจะต้องเจียรในปรับแต่ง ให้เป็นรูปร่างขอบตัด (Profile) ด้วยเครื่องเจียรในรูปร่าง (Profile grinder) หรือเจียรในคมตัดด้วยเครื่องเจียรในราบ (Surface grinder) เมื่อคมตัดแม่พิมพ์ที่ผ่านการใช้งานตัดเฉือนขึ้นรูปจะเกิดการสึกหรอของคมตัด การซ่อมแซมคมตัดแม่พิมพ์จึงมีความสำคัญมาก เพื่อให้ได้คมตัดใหม่ที่ดียังต้องพิจารณาจัดวางคมตัดและทิศทางในการป้อนเข้าตัดของล้อหินเจียรใน เพราะการเจียรในก็มีส่วนทำให้บริเวณที่ทำการเจียรในนั้นได้รับผลกระทบจากแรงกระทำทั้ง 2 ทิศทางหลัก คือแนวกินลึกและแนวป้อนตัด (ดังรูปที่ 2.2) ซึ่งจะเกิดการแตกหักหรือบิ่นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคมตัดแม่พิมพ์ที่ทำจากวัสดุประเภทซีเมนต์คาร์ไบด์ เพราะมีความแข็งมากแต่เปราะ [5] ในทางปฏิบัติจะวางส่วนที่ยาวที่สุดของคมตัดขวางกับการหมุนเข้าตัดของล้อหินเจียรใน ยกเว้นกรณีที่รูปร่างคมตัดมีความสลับซับซ้อนตามรูปร่างของชิ้นงาน ซึ่งทำให้ไม่สามารถที่จะจัดวางคมตัดในลักษณะดังกล่าวได้



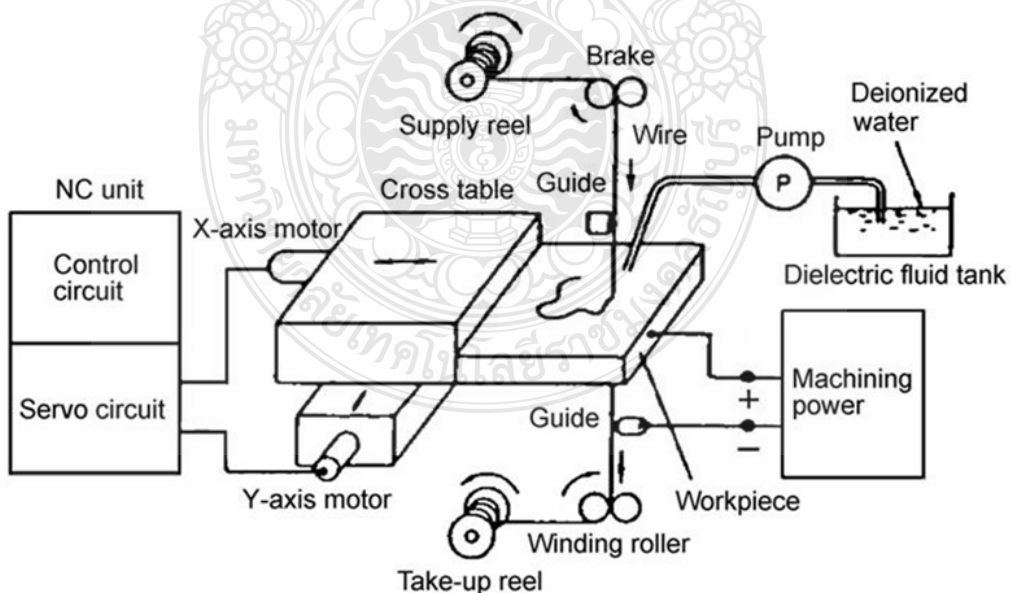
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเจียรในด้วยเครื่องเจียรในราบ [6]

2.3 กระบวนการตัดเซาะด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า

2.3.1 ประวัติและวิวัฒนาการของอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machine; EDM)

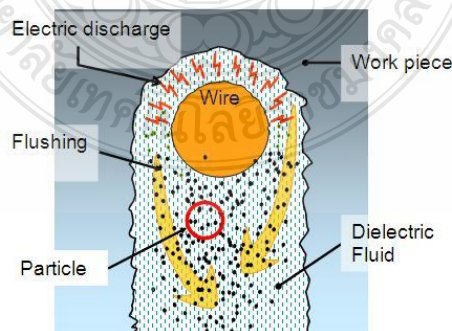
เครื่อง EDM ที่เราเห็นอยู่ในทุกวันนี้ ได้ถูกค้นพบโดย Joseph Preistly นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ในปี ค.ศ. 1770 เขาได้ทำการทดลองปล่อยกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโทรด (Electrodes) ไปสู่ชิ้นงานที่ต่อจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current; DC) ทำให้เขาพบว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด ต่อมานับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 ได้มีการวิจัยและพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ โดยประเทศสหภาพโซเวียต (Soviet) ในขณะนั้น (Kansal, H.K, Singh, 2005) และในปี ค.ศ. 1943 สองนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย B.R. Lazarenko และ N.I. Lazarenko ได้ทำการสร้างเครื่อง EDM ออกมาเป็นเครื่องแรก ณ มหาวิทยาลัยมอสโค แต่ก็ยังมีขีดจำกัดในการทำงานอยู่บ้าง ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานมาจนถึงปัจจุบัน (Lazarenko, B.R., 1943) ต่อมามีการพัฒนาแหล่งจ่ายแบบกระแสไฟฟ้าสลับได้ในปี ค.ศ. 1950 และในปี ค.ศ. 1955 เครื่อง EDM ที่ชื่อ Charmilles ซึ่งมีลักษณะของเหลวตัวกลางท่วมชิ้นงานขณะสปาร์คตัด ได้ถูกนำมาแสดงขึ้นในเมืองมิลาน ประเทศอิตาลี ในปี ค.ศ. 1973 ได้มีการนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล เพื่อให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติด้วยการเขียน โปรแกรมชุดคำสั่งให้เครื่องจักรทำงาน (Abu Zeid, O.A., 1997) ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันทำให้เกิดเป็น Wire EDM จัดจำหน่ายออกสู่ตลาด [2],[7]

2.3.2 หลักการตัดด้วยอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด (Wire EDM)



รูปที่ 2.3 โค้ดแกรมการทำงานพื้นฐานของเครื่องจักร Wire EDM [8]

เครื่องอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด หรือไวร์คัท (Wire-cut) มีหลักการทำงานคือ เส้นลวดอิเล็กโทรดจะถูกเคลื่อนที่นำเข้าสู่ชิ้นงานตามทิศทางของ NC โปรแกรมที่เขียนไว้ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายให้กับอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเริ่มต้นจะเกิดขึ้นระหว่างช่องว่างของเส้นลวดกับชิ้นงาน โดยมีสารเหลวตัวกลางเป็นฉนวนกั้นและมากพอที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าวิ่งไหลผ่านไปยังชิ้นงาน ในขณะที่สารเหลวตัวกลางที่มีค่าความต้านทานสูงและถูกฉีดเลี้ยงรอบๆ เส้นลวดเพื่อให้เกิดการสปาร์กภายในน้ำตัวกลางนี้ การสปาร์กจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นลวดถูกนำเข้าสู่ชิ้นงานได้ในระยะแคบที่เหมาะสม เมื่อมีสปาร์กเกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการสปาร์กจะเกิดความร้อนขึ้นเท่าๆ กันทั้งทางด้านลวดและด้านชิ้นงาน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสูงถึง 8,000 – 12,000 องศาเซลเซียส [2] ทำให้เกิดการหลอมละลายขึ้น ณ ที่จุดสปาร์ก ในเวลาเดียวกันน้ำยาหล่อเย็นที่ถูกฉีดหล่อเลี้ยงรอบๆ ลวด จะถูกทำให้ร้อนและระเหยตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะเหมือนการระเบิดตัวของน้ำ และแรงดันของน้ำทำให้โลหะที่หลอมละลายแตกตัวเป็นผงเล็กๆ และถูกนำพาออกไป สารเหลวตัวกลางที่ทำหน้าที่หล่อเย็นบริเวณจุดที่เกิดการสปาร์กนั้น ก็จะถูกทำให้เย็นลงอีกครั้ง เหตุการณ์ทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆ กันแต่รวดเร็วมากตามค่าความถี่ เป็นเหตุให้ชิ้นงานสามารถถูกตัดนำหน้าตามทิศทางของเส้นทางเดินลวด ปกติแล้วเครื่อง Wire EDM นี้เหมาะสำหรับงานอุตสาหกรรมผลิตที่เกี่ยวกับแม่พิมพ์ โลหะประเภทปั๊มตัดเจาะขึ้นรูป (Punch and Die) ชิ้นส่วนงานแม่พิมพ์พลาสติก และผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรที่มีความสลับซับซ้อน วัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งมากๆ เช่น เหล็กชุบแข็ง เหล็กกล้าผสม CBN และคาร์ไบด์ (Carbide) ชนิดต่างๆ ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องจักรทั่วๆ ไป อย่างไรก็ตามหลักการทำงานและการจ่ายกระแสไฟฟ้าของ Wire EDM เหมือนกับ Sink EDM ดังนั้นจึงสามารถเรียกรวมเอาเครื่องจักรทั้งสองประเภทนี้ว่าเป็นเครื่องจักรกล EDM ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับใช้แปรรูปโลหะแข็งทุกชนิดที่สามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.4 หลักการของกระบวนการกัดเซาะด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า [1]

2.3.3 เครื่อง CNC Wire EDM และส่วนประกอบของเครื่อง CNC Wire EDM

ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรกล CNC Wire EDM แบ่งเป็น 4 ส่วน [7] ด้วยกันดังนี้คือ

- 1.) Computer Numerical Control (CNC) ถือว่าเป็นส่วน “สมอง” ของเครื่อง (Think of this as “The Brains”) ซึ่งมักบรรจุอยู่ในตู้ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล (Electrical Cabinet)
- 2.) แหล่งพลังงาน (Power Supply) เป็นแหล่งให้พลังงานเพื่อใช้ในการจุดประกายไฟให้เกิดการสปาร์ค คิดว่าเป็นส่วน “กล้ามเนื้อ” (Think of this a “Muscle”)
- 3.) ตัวเครื่องจักรกล (Machine Section) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น ลวด, โตะวางชิ้นงาน, ส่วนของการทำมุมเอียง (Taper), และระบบกลไกการขับเคลื่อนป้อนเส้นลวดอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนนี้คิดว่าเป็น “ลำตัว” (Think of this as “The Body”)
- 4.) ระบบน้ำไดอิเล็กทริก (Dielectric System) เป็นแหล่งเก็บกักน้ำกลั่นให้สำหรับการกรองอนุภาค ควบคุมสภาพและอุณหภูมิของน้ำ คิดว่าเป็น “ส่วนบำรุง” (Think of this as “The Nourishment”)

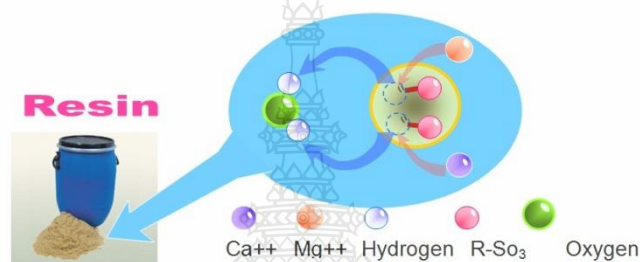
เครื่อง CNC Wire EDM มีแนวแกนการเคลื่อนที่ 5 แกน คือ แกน X, Y, Z, U, และ V เพราะในการตัดชิ้นงานนั้นสามารถตัดชิ้นงานแนวตรง และแนวเอียงเป็นมุมได้ถึง 30 องศา โดยใช้แกน U และแกน V และส่วนที่หัว Guide ด้านบนและด้านล่างปกติจะมีแรงดันน้ำสูงสุด 6-10 bar และเครื่อง CNC Wire EDM ที่ผลิตมาใช้งานภาคอุตสาหกรรมผลิต จะมีอยู่ 2 ระบบด้วยกัน [9] คือ

- 1.) เครื่อง CNC Wire-Cut ระบบน้ำฉีด (Injection System) เครื่องชนิดนี้เวลาทำงานจะอาศัยน้ำฉีดบริเวณแนวตัด โดยที่ชิ้นงานไม่ถูกแช่อยู่ในน้ำกลั่น หรือน้ำมัน บริเวณถึงโตะต้องมีฝาปิดกัน เพื่อป้องกันน้ำฉีดไม่ให้กระเด็นออกนอกเครื่อง
- 2.) เครื่อง CNC Wire-Cut ระบบน้ำแช่ (Submerge System) เครื่องชนิดนี้เวลาทำงานจะต้องเปิดน้ำให้ท่วมบริเวณชิ้นงานที่กำลังตัด โดยที่ชิ้นงานถูกแช่อยู่ในน้ำกลั่น หรือน้ำมัน ภายในถังแช่ ซึ่งความเที่ยงตรงของเครื่องจักร และความละเอียดผิวงานชิ้นงานจะมีมากกว่ารุ่นที่เป็นระบบน้ำฉีด

2.4 สารเหลวตัวกลาง

สารเหลวตัวกลางในงาน Wire EDM ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า เพื่อให้เกิด Electrical discharge ได้อย่างสมบูรณ์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนในจุดเล็กๆ ได้ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคประจุบวก และลบที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งเป็นอนุภาคที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เพราะฉะนั้นจะต้องมีการกำจัดออกไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาระยะ Gap ในการ Spark ที่เหมาะสม ไม่

ผิดเพี้ยน ค่าความต้านทานของสารเหลวตัวกลาง สามารถกำหนดได้ที่ชุดควบคุม หลังจากการที่มี การกำหนดแล้ว การควบคุมสภาพของน้ำตัวกลางจะเป็น ไปอย่างอัตโนมัติ การกำหนดค่าความต้านทาน ของน้ำตัวกลางนั้น สามารถอ้างอิงได้จากตารางค่าไฟแนะนำให้ใช้ในการตัดของเครื่องจักรแต่ละรุ่น สารเหลวตัวกลางมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ น้ำกลั่น กับ น้ำมัน (Oil) กรณีของน้ำดีไอนั้นมีความเหมาะสม สำหรับงานตัดที่ต้องการความเที่ยงตรงขนาดสูง และมีคุณภาพผิวสำเร็จค่อนข้างดีมากเมื่อเทียบกับ ชนิดน้ำมัน Deionized water (ID) คือน้ำที่ถูกกำจัดไอออนออกจนหมด มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าที่ บริสุทธิ์อย่างแท้จริงและเกือบเป็น H₂O มากที่สุด ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตยา เครื่องสำอาง แบตเตอรี่ ทำอาหาร การชุบสี Etching และ EDM ด้วย



รูปที่ 2.5 เรซินสำหรับปรับสภาพน้ำดีไอระบบแบบหมุนเวียน [1]

เรซิน (Ion Exchange Resins) คือ สารโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยน ประจุบวก และประจุลบ กับอนุภาคหลอมละลายมาจากเนื้อวัสดุคัดที่อยู่ในน้ำได้ เรซินมีอยู่ 2 ชนิด คือ เรซินประจุบวก (Cat ion Exchange Resin) และเรซินประจุลบ (Anion Exchange Resin) เรซินที่ ใช้กับ Wire EDM เป็นแบบผสม (Mixed base) ก็คือผสมกันทั้งระหว่างเรซินประจุบวกกับเรซินประจุ ลบ และปกติค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำดีไอที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 40,000 - 60,000 Ω cm [1]

2.5 เส้นลวดตัวนำไฟฟ้า

ลวดที่มีใช้ในการงานตัดด้วยเครื่อง Wire EDM จะเป็นลวดชนิด ทองเหลือง (Brass Wire) ลวดทองแดง (Copper Wire) ลวดโมลิบดีนัม (Molybdenum Wire) และลวดทังสเตน (Tungsten Wire) ชนิดลวดแต่ละชนิดจะมีค่าทนแรงดึง (Tensile Strength) ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นลวดที่ จะนำมาใช้ตัดงาน มีตั้งแต่ขนาดความโตตั้งแต่ 0.05-0.5 มิลลิเมตร โดยงานทั่วไปจะใช้ลวดขนาด 0.2 และ 0.25 มิลลิเมตร เป็นส่วนมาก ยกเว้นลวด ทังสเตนและ โมลิบดีนัม จะเป็นลวดขนาดเล็ก โดยทั่วไปใช้ 0.1 มิลลิเมตร ลักษณะของลวดจะเป็นเส้นเดี่ยวยืดหยุ่นดี ขนาดหน้าหนักรัดม้วนตั้งแต่

1.5 ถึง 20 กิโลกรัม งานปกติทั่วไปใช้ขนาด 3-5 กิโลกรัม ในการเลือกใช้งานลวดแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับลักษณะของงานตัด ชนิดของวัสดุ และค่าความละเอียดผิวชิ้นงานที่ต้องการใช้งาน

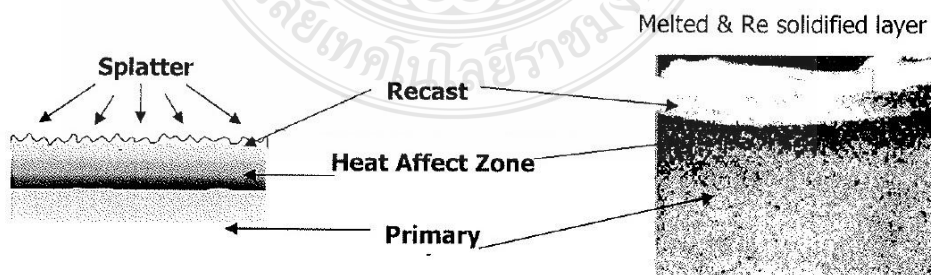


รูปที่ 2.6 ลักษณะของม้วนลวดที่ใช้ในงาน Wire EDM [9]

ปัจจุบันลวดทองเหลืองตามมาตรฐาน DIN 17677 เป็นที่นิยมใช้กันมาก เพราะมีราคาถูกกว่าลวดชนิดอื่นๆ เนื้อลวดจะเป็นทองเหลืองบริสุทธิ์ มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีสม่ำเสมอ ตามมาตรฐานเยอรมันและมีส่วนผสมพิเศษเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงาน ค่าความผิดพลาดของขนาด ± 0.001 มิลลิเมตร ไม่บิดงอ สามารถร้อยลวดด้วยมือและอัตโนมัติของเครื่องได้ ขนาดความกว้างของร่อง (Kerf) ที่เกิดจากการตัดมีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดบวกกับระยะของแก๊ปดีสชาร์จ (Discharge Gap) ทั้งสองข้าง ในกรณีที่ทำการตัดเข้ามุม รัศมีของมุมที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถเล็กกว่าค่า Gap ได้ ลวดที่มีขนาดเล็กจะสามารถรับกระแสได้น้อย จึงไม่สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่หนามากๆ ได้ เพราะขีดจำกัดของค่ากระแสไฟฟ้า และความตึงของลวด [9]

2.6 อิทธิพลทางความร้อนที่มีต่อพื้นผิวงาน EDM

กระบวนการตัดด้วย EDM ทำให้เกิดความร้อนสูง ณ บริเวณที่เส้นเดินตัดเข้าไปในเนื้อวัสดุ ผลกระทบทางความร้อนทำให้เกิดลักษณะของชั้นผิวต่างๆ ดังนี้

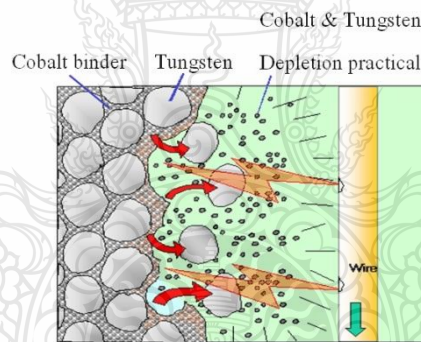


รูปที่ 2.7 ชั้นผิววัสดุที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนในกระบวนการ EDM [1]

การแตกร้าว (Cracking) ในขณะการแปรรูปด้วย Wire EDM นั้นสามารถเกิดขึ้นได้เสมอ โดยเฉพาะวัสดุที่มีการสะสมความเค้น (Stress) ภายในเนื้อวัสดุมากๆ เมื่อเกิดความร้อนจากกรรมวิธีการ EDM จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นมาได้ สาเหตุการแตกร้าวภายในเนื้อวัสดุอาจเกิดขึ้นได้ดังนี้

- 1.) เกิดความเค้นในวัสดุ Sintering ซึ่งเป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปและอบให้ความร้อน
- 2.) เหล็กเครื่องมือได้รับการอบชุบความแข็ง (Heat treatment) อย่างไม่เหมาะสม
- 3.) เกิดจากลักษณะรูปร่าง หรือเป็นข้อจำกัดในการออกแบบชิ้นส่วนต่อวัสดุนั้นๆ
- 4.) มาจากการใช้เงื่อนไข (Condition) ในการแปรรูปที่ไม่เหมาะสม

วัสดุคาร์ไบด์ผลิตจากกรรมวิธี Sintering โดยการอัดขึ้นรูปมีโคบอลต์ (Cobalt) ตัวเชื่อมประสานระหว่างผงทังสเตน (Tungsten) แต่ค่าการนำความร้อน (Heat Conductivity) ของทังสเตนนั้นต่ำกว่าโคบอลต์มาก โคบอลต์มีจุดหลอมละลายที่ 1,490 °C ส่วนทังสเตนมีจุดหลอมละลายที่ 3,379 °C การดิสชาร์จ (Discharge) จึงเกิดกับโคบอลต์ได้มากกว่า ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวสามารถหลอมละลายโคบอลต์ได้ง่ายกว่าหลอมละลายทังสเตน ดังนั้นการนำความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้การหลอมละลายออกมาของวัสดุแตกต่างกัน ทำให้ทังสเตนที่เป็นเนื้อสารหลักนั้นแตกร้าว (Cracking) นั่นเอง



รูปที่ 2.8 ลักษณะของการดิสชาร์จในงานตัด Wire EDM [1]

*การตัดหยาบ (Rough cut) ในรอบที่ 1 ปกติแล้วต้องการความเร็วในการตัดสูง ซึ่งใช้พลังงานในการตัดสูงมาก ผลที่ตามมาของการตัดหยาบก็คือ ผิวที่ได้หยาบ ความเที่ยงตรงของชิ้นงานไม่ดี ลักษณะมุมงานไม่ดี ผิวเกิด Oxide ได้ง่าย

**การตัดละเอียด (Skim cut) ตั้งแต่รอบที่ 2 ขึ้นไป ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ ความหนา และความ ต้องการผิวชิ้นสำเร็จ ปกติแล้วความเร็วและพลังงานในการตัดที่ต่ำลง แต่ความถี่สูงขึ้น Skim cut ในกรรมวิธี Wire EDM ถือว่าเป็นการนำไปสู่การแก้ไขปัญหา เรื่องของความหยาบผิวของชิ้นงาน [1]

2.7 ซีเมนต์คาร์ไบด์

ซีเมนต์คาร์ไบด์ คือ อนุภาคของผงคาร์ไบด์อัดรวมเข้าด้วยกันโดยเทคนิควิธีการของโลหะผสมวิทยาที่เรียกว่า Sintering ประกอบไปด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (WC) เป็นหลัก มีโคบอลต์ (Cobalt; Co) เป็นตัวประสาน (Binder) ปกติอนุภาคของผงคาร์ไบด์มีขนาดเล็กมากประมาณ 1-10 ไมครอน หรืออาจเล็กกว่านี้ ซีเมนต์คาร์ไบด์สามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่าเหล็กกล้ารอบสูงได้ และยังมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าเหล็กเครื่องมือขึ้นรูปเย็น (Cold Working Tool Steel) ในยุคแรก ส่วนผสมหลักเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์กับโคบอลต์ ซึ่งนำมาใช้ในการกัดชิ้นงานเหล็กหล่อและอโลหะ เพราะสามารถใช้งานที่ความเร็วตัดสูงกว่ามีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงและโลหะผสมคาร์บอน แต่พบการสึกหรอแบบ Crater wear เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อายุการใช้งานของมีดตัดค่อนข้างสั้น และไม่เหมาะกับการตัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก ในยุคหลังได้มีการเติมส่วนผสมที่ทำให้การสึกหรอลดลงได้แก่ การเติมไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และแทนทาลัมคาร์ไบด์ (TaC) นิโอเบียมคาร์ไบด์ (NbC) ลงไปด้วย ซึ่งส่วนผสมใหม่นี้สามารถใช้ในการตัดหรือกัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก นอกจากนี้อาจจะมีแร่ธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น เหล็ก นิกเกิล วานาเดียม โคลัมเบียม โครเมียม เซอร์โคเนียม โมลิบดีนัม เป็นต้น เนื่องจากซีเมนต์คาร์ไบด์มีความแข็งมากบางครั้งถูกเรียกว่า “Hard metal” [10] สามารถนำไปเคลือบผิวแข็งได้อีก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคนิคของแต่ละผู้ผลิต และดูได้จากหนังสือ “ASM Engineered Materials Reference Book” (ASM International, 1989) [11]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์ [11]

ซีเมนต์คาร์ไบด์	ความแข็ง (HV)	มอดูลัสยืดหยุ่น (Gpa)	ความต้านทานการแตกตามขวาง (MPa)	ส.ป.ส. ความร้อนและการขยายตัว (10 ⁻⁶ /K)	การนำความร้อน (W/m-K)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
WC-20% Co	1,050	490	2,850	6.4	100	13.55
WC-10% Co	1,625	850	2,280	5.5	110	14.50

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ตัวอย่างสมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์ [11]

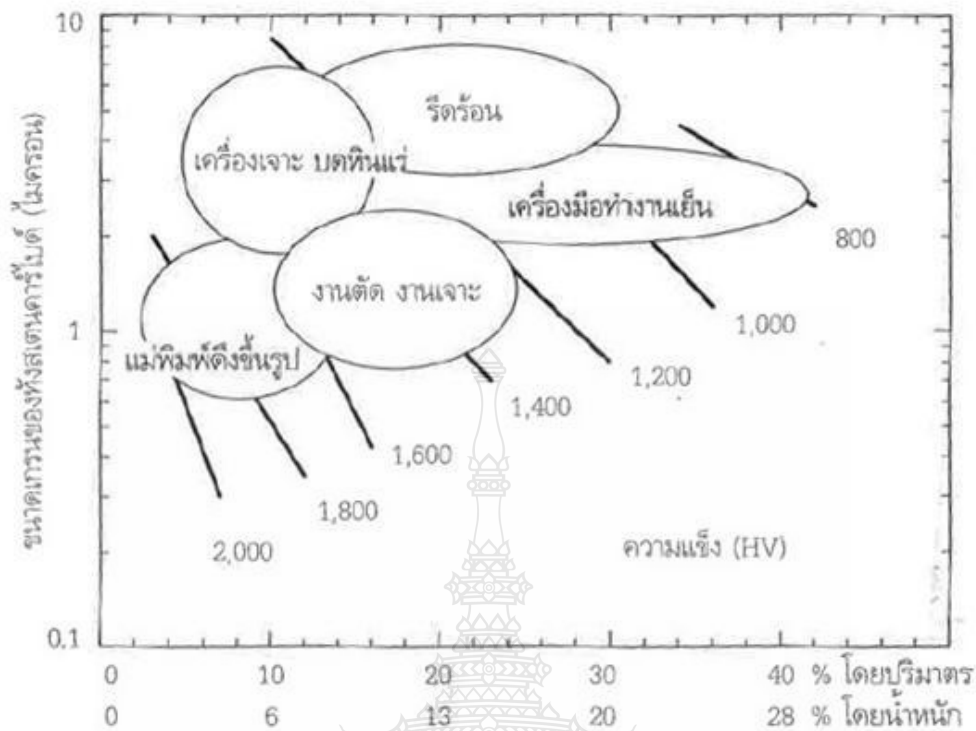
ซีเมนต์คาร์ไบด์	ความแข็ง (HV)	มอดูลัสยืดหยุ่น (Gpa)	ความต้านทานการแตกตามขวาง (MPa)	ส.ป.ส. ความร้อนและการขยายตัว ($10^{-6}/K$)	การนำความร้อน (W/m-K)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
WC-3% Co	1,900	673	1,600	5.0	110	15.25
WC-10% Co-22% (Ti, Ta, Nb) C	1,500	510	2,000	6.1	40	11.40

ในการเลือกใช้คาร์ไบด์ที่ถูกต้องจะต้องมีการระบุวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งานชัดเจน ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติเหล่านี้คือ

ความแข็ง (Hardness): ค่าความแข็งของซีเมนต์คาร์ไบด์ โดยทั่วไปมักจะวัดออกมาเป็นหน่วย HRA (อเมริกา) หรือ HV (ยุโรป) ซีเมนต์คาร์ไบด์จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าปริมาณโคบอลต์และขนาดอนุภาคของทั้งสแตนจะลดลง

ความหนาแน่น (Density): ความหนาแน่นมีหน่วยวัดเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจะมีการตรวจสอบ เพื่อเป็นการรับประกันปริมาณของโคบอลต์ที่เหมาะสมที่ถูกเติมเข้ามา ความหนาแน่นของซีเมนต์คาร์ไบด์จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของตัวประสานโคบอลต์ที่ลดลง

การแตกตามขวาง (Transverse Rupture Straight; TRS): การทดสอบนี้จะช่วยให้ทราบความแข็งแรงของคาร์ไบด์ที่วัดโดยการทดสอบการดัดแบบสามจุด ความต้านทานแรงดึง (Tensile straight) ของคาร์ไบด์จะอยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของมูลค่า TRS ขนาดของการแตกตามขวางของซีเมนต์คาร์ไบด์จะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มของโคบอลต์ และในบางกรณีโดยการลดขนาดอนุภาคของทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขนาดของหน่วยวัดดังกล่าวนี้เป็น lbs/in^2 หรือ N/mm^2 [12]



รูปที่ 2.9 ขนาดเกรน และปริมาณโคบอลต์ของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่ใช้สำหรับงานต่างๆ [12]

2.8 อัตราการตัดวัสดุ

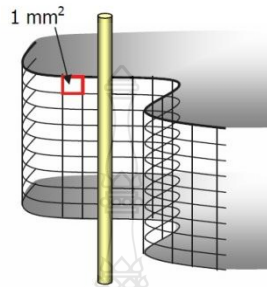
อัตราการตัดของกรรมวิธีแปรรูปด้วยวิธี EDM มีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพทางด้านความเร็วสูงสุดของเครื่องจักร เพราะถ้าเปรียบเทียบกับกรรมวิธีการแปรรูปอื่น เช่น การตัด หรือการกัด วิธี EDM จะถูกจัดให้เป็นกรรมวิธีที่มีอัตราการตัดต่ำ แต่ถ้าเปลี่ยนมาใช้เงื่อนไขที่ทำความเร็วสูงขึ้นก็อาจจะทำให้ผิวที่ได้หยาบมากยิ่งขึ้น และเกิด Over cut มากขึ้น ทำให้ความกว้างร่องตัด (Kerf) กว้างขึ้น ซึ่งจะทำให้ความละเอียดผิว และความถูกต้องของขนาดลดน้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการใช้แปรรูป วิธี EDM จะกำหนดอัตราการตัดได้จากปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกกำจัดออกไปต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งมีทั้งวิธีที่กำหนดจากน้ำหนักหรือปริมาตร เช่น g/min (ญี่ปุ่น) และ mm³/sec (ยุโรป) และ in³/h (อเมริกา) [13] ส่วนการตัดด้วยวิธี Wire EDM นั้นสามารถกำหนดจากพื้นที่ตัดต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้เช่นกัน [1]

$$\text{จากที่} \quad A_c = LxH \quad (2.1)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad CR = \frac{A_c}{t} \quad (2.2)$$

เมื่อ CR คือ อัตราการตัด (Cutting rate) [14] มีหน่วยเป็น mm²/min

L	คือ	เส้นรอบรูป หรือระยะทางเดินตัด มีหน่วยเป็น mm
H	คือ	ความหนาวัสดุ (Thickness) มีหน่วยเป็น mm
A_c	คือ	พื้นที่ตัด (Cutting area) มีหน่วยเป็น mm^2
t	คือ	เวลาที่ใช้ตัด (Cutting time) มีหน่วยเป็น min



รูปที่ 2.10 แสดงพื้นที่ตัดด้วยวิธี Wire EDM [1]

2.9 การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

ดร.เก็นนิชิ ทากูชิ (Genichi Taguchi) เป็นวิศวกรสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปลายปี ค.ศ. 1940 ท่านได้เป็นผู้นำเอาหลักการการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยพยายามปรับให้ง่ายขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ผล โดยไม่ใช้การแจกแจงทางสถิติ และตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อความสะดวกสำหรับการนำไปใช้ในงานจริง [14]

2.10.1 แนวคิดของวิธีทากูชิ

แนวคิดของวิธีทากูชิ เป็นแนวคิดที่จะรวมคุณภาพให้อยู่ในผลิตภัณฑ์แทนที่จะใช้วิธีการสุ่มตรวจสอบคุณภาพที่กระบวนการสุดท้ายซึ่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การตรวจสอบคุณภาพโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพจะถูกแยกออก แต่คุณภาพของกระบวนการยังคงเหมือนเดิม อันที่จริงแล้วกระบวนการต่างหากที่ก่อให้เกิดคุณภาพและมีความสำคัญกว่าการตรวจสอบแบบสุ่ม ดังนั้นวิธีการของทากูชิพยายามที่จะทำให้กระบวนการทำงานเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยสร้างภูมิคุ้มกันต่อสิ่งแวดล้อมที่คอยรบกวนหรือมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา [13]

2.10.2 กลยุทธ์ และเป้าหมายของการทดลองแบบทากูชิ

แบบการทดลองทากูชิ เป็นแบบการทดลองออร์ทอกอนัลอาร์เรย์ (Orthogonal Array; OA) เหมาะในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main Effects) แต่เนื่องจากเป็นแบบการทดลอง Resolution III กล่าวคือ ผลกระทบปัจจัยหลักมีโครงสร้างซ้ำซ้อนกับผลกระทบปัจจัยหลัก และ

ผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับการคัดปัจจัยทิ้ง (Screening Factors) ข้อดีของแบบการทดลองออร์ทอกอนัลอาร์เรย์ ก็คือ มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2 และสัญลักษณ์ที่ใช้เรียกแบบแผนการทดลอง คือ $L_A (B^C)$ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Sir R.A.Fisher โดย A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อแผนการทดลอง (ไม่รวมการทำซ้ำ), B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา และ C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง (จำนวนปัจจัยหลัก + จำนวนอันตรกิริยาหรือปัจจัยร่วม) ส่วนที่ดีที่สุดของแบบทดลองทางทฤษฎี ก็คือ ฟังก์ชันความสูญเสีย (Loss function) และการกำหนดค่า Setting ที่เหมาะสมโดยอาศัยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน แต่จะใช้ค่าที่ได้พัฒนาขึ้นมาเอง ได้แก่ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratios) [14]

เป้าหมายของการทดลองแบบทฤษฎีมีดังนี้คือ

- 1.) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimal) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 แบบ
 - ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-is-better) เช่น ความแข็งแรงดึง และอัตราการทำจัดวัสดุ
 - ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-is-better) เช่น เวลาในการตัด และการรั่วไหลกระแสไฟฟ้า
 - ค่าเท่ากับที่ต้องการที่สุด (Nominal-the-best) เช่น ปริมาตรบรรจุ และความหนาวัสดุ

รูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบทฤษฎีมี 3 รูปแบบดังนี้

- 1.) การออกแบบการทดลองของระบบ (System design) หาค่าผลตอบแทนที่ต้องการ
- 2.) การออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัย (Parameter design) ที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าผลตอบแทนที่ได้เข้าใกล้เป้าหมายมากที่สุด เพื่อลดความผันแปรของกระบวนการ
- 3.) การออกแบบการทดลองเพื่อหาช่วงความเชื่อมั่น (Confidence interval; CI) ของระดับปัจจัย (Parameter design) ที่ทำให้ผลตอบแทนมีค่าความผันแปรที่ยอมรับได้

ตารางที่ 2.2 ตารางออร์ทอกอนัลอาร์เรย์มาตรฐาน (Standard Orthogonal Array) [13]

OA	จำนวนแถว	จำนวนปัจจัยสูงสุด	จำนวนสูงสุดของคอลัมน์ที่ 3 ระดับ			
			1	2	3	4
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ตารางออร์ทอกอนัลอาร์เรย์มาตรฐาน (Standard Orthogonal Array) [13]

OA	จำนวนแถว	จำนวนปัจจัยสูงสุด	จำนวนสูงสุดของคอลัมน์ที่ 3 ระดับ			
			1	2	3	4
L ₁₂	12	11	11	-	-	-
L ₁₆	16	15	15	-	-	-
L ₁₆	16	5	-	-	5	-
L ₁₈	18	8	1	7	-	-
L ₂₅	25	6	-	-	-	6
L ₂₇	27	13	-	13	-	-
L ₃₂	32	31	31	-	-	-
L ₃₂	32	10	1	-	9	-
L ₃₆	36	23	11	12	-	-
L ₃₆	36	16	3	13	-	-
L ₅₀	50	12	1	-	-	11
L ₅₄	54	26	1	25	-	-
L ₆₄	64	63	63	-	-	-
L ₆₄	64	21	-	-	21	-
L ₈₁	81	40	-	40	-	-

2.10.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทากูชิ

การวิเคราะห์ของทากูชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับ (ค่า) ที่ทำให้ค่าตัววัดของทากูชิ คือ Signal-to-Noise Ratios (S/N; η) มีค่าสูงที่สุด (จุดที่ดีที่สุดคือ จุดที่ให้ค่า $\text{Max} \{ S/N \}$ ณ วิธีปฏิบัติของกลุ่มปัจจัยนั้นๆ) แบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน [14] ดังนี้คือ

- 1.) กำหนดค่าตอบสนอง (Y) ที่ใช้วัดผล และวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้น
- 2.) ระบุปัจจัยแยกเป็น 2 กลุ่ม คือปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (กรณีที่ไม่สามารถควบคุมได้ ถ้าสามารถวัดค่าได้ในขณะทดลองให้ทำการวัดค่าด้วย)
- 3.) ระบุแผนการทดลองที่ใช้สำหรับ Design Matrix (Inner Array) และ Noise Matrix (Outer Array) ซึ่งส่วนใหญ่แผนการทดลองที่ใช้ในแต่ละเมตริกซ์มักจะใช้แผนที่ทดลองน้อย เช่นการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน และการทดลองแบบ Orthogonal (เนื่องจากการทดลองที่สมบูรณ์ของทากูชิ มีค่าเท่ากับจำนวนแถวของ Design Matrix คูณด้วยจำนวนแถวของ Noise Matrix)
- 4.) ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูล และคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ (Signal-to-Noise Ratios; S/N) ตามวัตถุประสงค์ของคุณภาพของระบบที่ศึกษา คือ Larger-is-Better, Smaller-is-Better หรือ Norminal-the-Best
- 5.) กรณีศึกษาลักษณะทางคุณภาพ 2 กรณีแรก (Larger-is-Better และ Smaller-is-Better) หลังจากหาค่า S/N_L หรือ S/N_S แล้ว ให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 7 กำหนด Combinations ของปัจจัยที่ทำให้ค่าสูงสุด ส่วนกรณีที่มีค่าเป้าหมายที่ดีที่สุด Norminal-the-Best นั้น ให้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean; ANOM) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้เป็น ตัวแปรปรับค่า (Adjustment Variable) เพื่อปรับให้ค่าตอบสนองมีค่าตรงกับเป้าหมาย (หรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด)
- 6.) กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ณ จุดที่ทำให้ค่า $\text{Max} \{ S/N_r \}$ ยกเว้นตัวแปรที่ใช้ในการปรับค่า (Adjustment Variable) ให้กำหนดระดับ ณ จุดที่ทำให้ค่าตอบสนองเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด โดยสร้างสมการการพยากรณ์ (Prediction Value) ความสัมพันธ์ตามหลักการออกแบบการทดลอง
- 7.) ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลว่าค่าที่กำหนดเป็นค่าที่ดีที่สุดจริง (Confirmation Runs)

2.10.4 การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratios; S/N)

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน คือ การวิเคราะห์อัตราส่วนของสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (หรือผลตอบสนอง) เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ว่ามีความมั่นคงต่อปัจจัยรบกวน (Noise) หรือตัวแปรอิสระได้ดีเพียงใด ซึ่งการกำหนดว่าจะให้ปัจจัยใดมีค่าเท่าใดต้อง

มุ่งเน้นให้อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนค่ามากที่สุด เพราะอย่างยิ่งมีค่ามากแสดงว่ายิ่งเข้าใกล้เป้าหมายที่ทำให้กระบวนการเกิดความมั่นคง ซึ่งมี 3 กรณี ดังนี้คือ

กรณีที่ต้องการค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-is-better; LB)

$$S/N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) = -10 \log \left(\frac{1}{n} \times \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right) \right) \quad (2.3)$$

กรณีที่ต้องการค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-is-better; SB)

$$S/N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) = -10 \log \left(\frac{1}{n} \times (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2) \right) \quad (2.4)$$

กรณีที่ต้องการค่าที่ต้องการมากที่สุด (Nominal-the-best; NB หรือ Target-the-best; TB)

$$S/N_\tau = 10 \log \left[\frac{\tau^2}{\sigma^2} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ y_i คือ สิ่งที่วัดในการทดลองในแต่ละครั้งของการทดลอง หรือของปัจจัย i

n คือ จำนวนของการทดลอง (ไม่รวมการทำซ้ำ)

τ คือ ค่าที่ถูกออกแบบไว้ว่าควรจะเป็น (หรือ \bar{y})

σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของประชากร ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \left((y_1 - \tau)^2 + (y_2 - \tau)^2 + \dots + (y_n - \tau)^2 \right) \quad (2.6)$$

อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-noise Ratio; S/N) เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมกันระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าผันแปร (Single Performance Measure) จึงได้ค่าที่เหมาะสมโดยลดความผันแปรของกระบวนการ (Jiju Antony, 2006) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนนั้น เลขเศษหรือสัญญาณของอัตราส่วน คือ ความสามารถของกระบวนการในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ดี หรือความสามารถของผลิตภัณฑ์เพื่อการดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ตัวส่วน คือ ผลรวมของผลกระทบของปัจจัยแทรกซ้อนที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ การกำหนดระดับปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ทำให้สามารถผลิตคุณลักษณะด้านการงานที่ดีที่สุด (High level) ในกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ และสามารถลดอิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้เหลือน้อยที่สุด (Low noise) ดังนั้นเป้าหมายในการดำเนินการทดลองออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design) คือ การปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ให้สามารถทำงานได้อย่างดีในสิ่งแวดล้อมที่หลากหลาย (รัชดาพร กริอุณะ, 2542)

2.10.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปร (Variance) ที่เกิดขึ้นของข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าจะทำให้เกิดความผันแปร

ในข้อมูล โดยความผันแปรทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับความผันแปรเนื่องจากปัจจัยรวมที่ควบคุมได้ร่วมกับความผันแปร โดยธรรมชาติของข้อมูล จากหลักการดังกล่าวซึ่งได้จากแนวคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติหรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่มแต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูล ซึ่งถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระและมีผลต่อตัวแปรตามหรือผลตอบสนองนั่นเอง โดยเป็นข้อมูลที่วัดค่าได้หรืออาจจะเป็นข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมเอาไว้แล้ว ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีเพียงแค่ค่าเดียว แต่จะมีหลายๆค่า ซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริง แต่ระดับของปัจจัยก็ยังมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลองกำหนดระดับของตัวแปรอิสระ เพื่อหาตัวแปรตามที่จะเกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นๆ ว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ เมื่อเปรียบเทียบกับความผันแปรโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จึงมักจะทำการทำซ้ำเพื่อให้ได้จำนวนข้อมูลแต่ละการทดลองมากพอ ซึ่งผลที่ได้รับจากการทดลองดังกล่าวจะสามารถใช้สรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย มีนิยามว่า

ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูล และเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$SS_T = SS_{ir} + SS_e \quad (2.7)$$

เมื่อ SS_T คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SS_{ir} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยหรือวิธีปฏิบัติงาน

SS_e คือ ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่มหรือสิ่งที่ยธิบายไม่ได้

การหาผลรวมกำลังสอง (Sum of Square; SS) คือ การนำข้อมูลที่อยู่ในระดับเดียวกันมารวมกันโดยใช้การยกกำลังสองเพื่อหักล้างผลกระทบในเรื่องของเครื่องหมาย หาได้จากสมการดังนี้

$$SS_{ir} = \sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{an} \quad (2.8)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \left(Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{an} \right) \quad (2.9)$$

$$SS_e = SS_T - (SS_{ir1} + SS_{ir2} + \dots + SS_{irm}) \quad (2.10)$$

การหาระดับขั้นความอิสระ หรือองศาอิสระ (Degree of freedom; $d.f$) ใช้สัญลักษณ์แทนว่า ν

$$\nu_i = a - 1 \quad (2.11)$$

$$\nu_T = N - 1 \quad (2.12)$$

$$v_e = N - a \text{ หรือ } (v_T - (v_{tr1} + v_{tr2} + \dots + v_n)) \quad (2.13)$$

- เมื่อ v_i คือ ชั้นความอิสระของแต่ละสิ่งทดลอง หรือวิธีปฏิบัติงาน (หรือ v_1)
 v_T คือ ชั้นความอิสระรวม
 v_e คือ ชั้นความอิสระของความผิดพลาด (หรือ v_2)
 N คือ จำนวนสิ่งทดลอง (Treatment)
 a คือ จำนวนค่าสังเกตในแต่ละสิ่งทดลอง หรือระดับปัจจัย (Level)

การวัดความผันแปรของข้อมูลการทดลองจากปัจจัย จะได้ตัวประมาณค่าความแปรปรวน (Variance; V) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square; MS) หาได้จากสมการดังนี้

$$MS_{tr} = SS_{tr} / d.f_{tr} \quad (2.14)$$

- เมื่อ MS_{tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean of Square)
 SS_{tr} คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)
 $d.f_{tr}$ คือ องศาอิสระ (Degree of Freedom) หรือ v_i

การหาค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Error Mean Square; MS_e)

$$MS_e = SS_E / d.f_e \quad (2.15)$$

- เมื่อ MS_e คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาด (Error Mean of Square)
 SS_e คือ ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาด (Error Sum of Square)
 $d.f_e$ คือ องศาอิสระความผิดพลาด (Error Degree of Freedom) หรือ v_e

การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนหรือความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (Error of Variance) สำหรับปัจจัยควบคุมและใช้อัตราส่วนความแปรปรวน (F-Ratios) หรือค่า F_0 เป็นตัวทดสอบนั่นเอง

$$F_{tr} = MS_{tr} / MS_e \quad (2.16)$$

- เมื่อ F_{tr} คือ อัตราส่วนของความแปรปรวน หรือคอสมินี่ F_0 ในตาราง ANOVA
 MS_{tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean of Square)
 MS_e คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาด (Error Mean of Square)

ซึ่งในการเปรียบเทียบค่าทดสอบ F_0 กับค่า F_{α, v_1, v_2} อ้างอิงที่ได้จากตาราง F-distribution มีดังนี้

ถ้า $F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0 ว่ามีความแตกต่างของค่าความแปรปรวนอย่างน้อย 1 คู่

ถ้า $F_0 < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0 ว่าไม่มีความแตกต่างของค่าความแปรปรวน

- เมื่อ α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)
 v_1 คือ ชั้นของความเป็นอิสระของปัจจัย
 v_2 คือ ชั้นของความเป็นอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design; CRD) หรือแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) ซึ่งสามารถเขียนตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย ผลบวกกำลังสอง และค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาด สรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA)

แหล่งความผันแปร (Source)	องศา อิสระ (d.f)	ผลบวกกำลังสอง (Sum Square; SS)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Mean Square; MS)	ค่าทดสอบ (F ₀)
วิธีปฏิบัติงาน A	a-1	SS _A	MS _A = SS _A / (a-1)	F _A = MS _A / MS _E
ความผิดพลาด (E)	N-a	SS _E = SS _T - SS _A	MS _E = SS _E / (N-a)	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	N-1	SS _T		

ระดับความมีนัยสำคัญ (Level of Significant; α) เป็นวิธีรายงานผลของการทดสอบมาตรฐานวิธีหนึ่ง ซึ่งจะแสดงถึงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธ โดยใช้เปรียบเทียบกับค่า α ที่กำหนด และใช้วิเคราะห์การมีอิทธิพลของปัจจัยต่อค่าตอบสนองแทนการวิเคราะห์จากค่า F ได้เช่นกัน สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) นั้นค่า P-value $\leq \alpha$ ซึ่งหมายความว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนการวิเคราะห์ Lack-of-Fit นั้นค่า P-value $> \alpha$ ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองมีความพอเพียงของข้อมูลจากการทดลอง และในงานวิศวกรรมทั่วไปนิยมใช้ที่ระดับ $\alpha = 0.05$

$$\alpha_{total} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \alpha_i) \quad (2.17)$$

เมื่อ k คือ จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทดลอง

α_i คือ ระดับนัยสำคัญที่ใช้ในการทดลองครั้งที่ i

ซึ่งระดับนัยสำคัญรวมหรือความผิดพลาดรวมนั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการทดสอบมากขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determine; R^2) เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดของแบบจำลองที่สามารถอธิบายได้จากสมการประมาณการนี้ โดยที่ค่า R^2 นั้นสามารถอธิบายได้ว่าถ้ายังมีค่าสูงเท่าใด ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้ทำนายหรือพยากรณ์ผลลัพธ์นั้นย่อมมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไป R^2 จะมีค่าไม่น้อยกว่า 0.7 (หรือ 70%) ซึ่งหมายความว่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ กันระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ และโดยที่ 1 แสดงว่าความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามค่า R^2 เป็นการ

ประมาณ Goodness of fit ที่เกินจริง จึงมักใช้ค่า R^2_{adj} ในการวัด Goodness of fit แทน โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าต่ำกว่า R^2 เล็กน้อย โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R^2 = \frac{SS_{tr}}{SS_T} \text{ หรือที่ปรับค่าแล้ว } R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_E / d.f_E}{SS_T / d.f_T} \quad (2.18)$$

2.10.6 ความเหมาะสมของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการพิจารณาระดับต่างๆ ของตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลหรือผลตอบสนองที่ได้มาจากการทดลอง ด้วยตัวแบบสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อต้องการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานจริง จำเป็นจะต้องตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบของข้อมูลที่สมมติขึ้น (Assumption underlying the analysis) ว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยข้อสมมติ (Assumption) สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีกล่าวไว้ว่า หากค่าความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนในการทดลองมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า $\epsilon_{ij} \approx NID(0, \sigma^2)$ นั้นมีความถูกต้องตรงตามข้อสมมติ แสดงว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีวิธีการตรวจสอบดังนี้ คือ

1.) การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ในการตรวจสอบข้อสมมติทางด้านการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถทำได้โดยใช้วิธีการพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งถ้าข้อสมมติมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)

2.) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) ในการตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันนั้น เป็นการพล็อตกราฟค่าระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับที่ของการทดลองจากการทดลองแบบสุ่ม โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter plot) ค่าความผิดพลาดจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ หากเงื่อนไขของข้อสมมติมีความเป็นอิสระต่อกันเป็นจริง ค่าส่วนตกค้างดังกล่าวควรมีแนวโน้มการกระจายเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการกระจายของจุดซึ่งแทนข้อมูลจะมีการกระจายสม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่างของกราฟ อย่างไรก็ตามหากเกิดลักษณะของแนวโน้มในทิศทางเดียว ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น ย่อมแสดงว่าข้อสมมติดังกล่าวเกิดความผิดพลาดขึ้น การออกแบบที่ใช้ในการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสมจึงมีส่วนสำคัญในการทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีลักษณะตรงตามข้อสมมติ

3.) การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ (Variance stability) ในการตรวจสอบความแปรปรวนคงที่นั้น เป็นการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับค่าประมาณการทดลองที่ระดับ i

ใดๆ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายเมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณของการทดลองที่ระดับต่างๆ หากพบว่าค่าส่วนตกค้างดังกล่าวมีการกระจายสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความไม่เสถียรของความแปรปรวนซึ่งเข้าข่ายข้อสมมุติ อย่างไรก็ตามหากเกิดแนวโน้มของกราฟเป็นลักษณะรูปดอกลำโพง ย่อมแสดงว่าข้อสมมุติดังกล่าวเกิดความผิดปกติขึ้น

2.10.7 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการทดลอง (Analysis the Result)

หลังจากที่ได้ผลลัพธ์ของการทดลองที่ถูกต้องแล้ว การสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองนำมาทำนายค่าตอบสนองที่ดีที่สุดของการรวมกันของระดับปัจจัย (Optimal Factor Level Combination) ซึ่งได้จากการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวน เพื่อหาความสัมพันธ์ที่สำคัญของหลายปัจจัยมาเป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Optimal Factors) ขั้นตอนนี้เรียกว่าการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of mean; ANOM) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ดังที่จะกล่าวในข้อที่ 1 และ 2 ส่วนการวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดจากวิธีการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน ดังที่จะกล่าวในข้อที่ 3 และ 4 สามารถทำได้ดังต่อไปนี้คือ

1.) วิธีการรวมเข้า (Pulling)

การพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อค่าตอบสนองที่ศึกษา พิจารณาจากค่าอัตราส่วนความแปรปรวน (F-ratios) ของปัจจัยนั้นที่ระดับการยอมรับ $1 - \alpha$ โดยทำการทดสอบค่า F_r ของปัจจัยนั้นเทียบกับค่า F_{α, v_1, v_2} อ้างอิง ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ได้จากการเปิดตารางการแจกแจงแบบปกติ F-Distribution เช่น กรณีที่พบว่าค่า F_{α, v_1, v_2} มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าคำนวณ F_r แสดงว่าปัจจัยการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่าปัจจัยในการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง

ในการทดลองบางครั้ง พบว่าค่าผลบวกกำลังสองของแต่ละปัจจัย (SS_r) ของบางปัจจัยนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นซึ่งมีค่ามาก ดังนั้นแนวทางของวิธีทาคูชิ คือ ให้นำปัจจัยที่มีค่าน้อยนั้นรวมเข้ากับปัจจัยของความคลาดเคลื่อน เรียกหลักการนี้ว่า การรวมเข้า (Pulling) โดยเริ่มจากทดสอบค่า F_r ของปัจจัยที่มีค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นอันดับแรกก่อน ถ้าผลการทดสอบอยู่ในขอบเขตของค่า F_{α, v_1, v_2} อ้างอิงจากตาราง F-Distribution ดังกล่าว ก็จะทำการรวมเอาค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัยนั้นเข้ากับค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MS_e) และจะทดสอบกับปัจจัยที่ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองที่มีค่าน้อยในลำดับที่สูงขึ้นถัดไปจนกว่าจะไม่ผ่านการทดสอบเมื่อเทียบกับค่า F_{α, v_1, v_2} อ้างอิง การพิจารณาการรวมปัจจัยที่มีค่าผลบวกกำลังสองของแต่ละปัจจัย (SS_r) ที่มีค่าน้อยเข้ากับค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MS_e) ได้นั้น จำเป็นต้องทำการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนเสียก่อน ซึ่งหาได้ดังสมการที่ 2.16 โดยที่ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองสำหรับปัจจัยควบคุมในการทดลอง (MS_r) นั้นนั้น หาได้จากสมการที่ 2.14 และค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม (MS_e) สำหรับปัจจัยควบคุม ดังสมการที่ 2.15

2.) วิธีการพิจารณาอิทธิพลของปัจจัย (Percent Contribution; % ρ)

วิธีการทดสอบค่า F_r ด้วยการเปรียบเทียบกับค่า F_{α, v_1, v_2} อ้างอิง จากตาราง F-Distribution บอกได้เพียงเฉพาะตัวปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง ส่วนอิทธิพลของปัจจัยนั้นจะอธิบายได้ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการทดลองด้วยอัตราส่วนที่เท่าใดเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด

$$\% \rho = (SS_r / SS_T) \times 100 \quad (2.19)$$

จำนวนประชากรบางส่วนมีค่าเฉลี่ย (μ) ที่เราสนใจ ขนาดของสิ่งตัวอย่างที่ชักมาจากประชากรอาจมีขนาดที่แตกต่างเท่ากัน ประชากรสามารถพิจารณาให้เป็นเซตของสิ่งทดลอง ซึ่งมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง (Response) และถือว่าในสิ่งทดลอง (Treatment) เป็นปัจจัย 1 ปัจจัยที่สนใจในระดับต่างๆ ค่าเฉลี่ยแต่ละค่าเป็นค่าตอบสนองเฉลี่ยที่ได้มาจากสิ่งทดลอง (เปมิกา, 2554)

3.) วิธีการ One-half rule of thumb

เป็นหลักเกณฑ์การพิจารณาการมีอิทธิพลของปัจจัย โดยถือว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมากคือปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (Significant) ปัจจัยที่มีผลกระทบน้อยคือปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ (No Significant) ซึ่งพิจารณาค่าของปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่ว่าเกินกว่าครึ่งหนึ่งของค่าของปัจจัยก่อนหน้านั้นหรือไม่ โดยจะเริ่มพิจารณาจากค่าของปัจจัยที่น้อยที่สุดก่อนและทำไปเรื่อยๆ ทีละปัจจัย ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็วสำหรับการพิจารณาในการคัดปัจจัยทิ้ง (Screening factors)

4.) วิธีการกราฟ (Graphical method)

เป็นการวิเคราะห์ผลลัพท์กราฟ ซึ่งกราฟที่มีความชันมากก็คือ ปัจจัยที่มีนัยสำคัญ (Significant) และถ้าทำการทดลองหลายการทดลองก็ให้ใช้จากค่าเฉลี่ย

2.10.8 การทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation the Experiment)

ในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบกระบวนการที่มั่นคง ซึ่งเป็นการพิสูจน์ค่าระดับปัจจัย ที่ทำให้ค่าผลตอบสนองในสิ่งที่ต้องการจะปรับปรุงนั้นดีที่สุด และได้มาจากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM อย่างมีเหตุผล ให้ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลโดยใช้ระดับปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดดังกล่าวนั้นอีกครั้ง ซึ่งถ้าเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจริง ก็สามารถสรุปผลการทดลองและสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

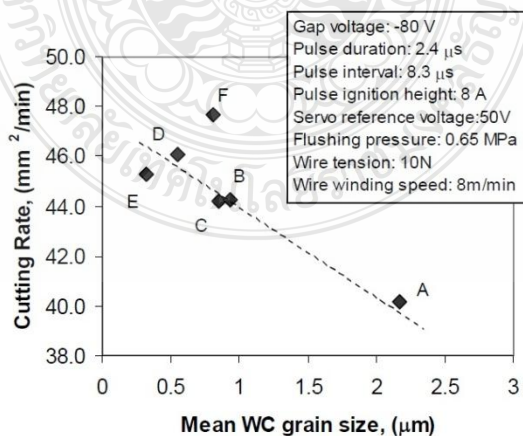
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ 2 ส่วน ดังนี้คือ

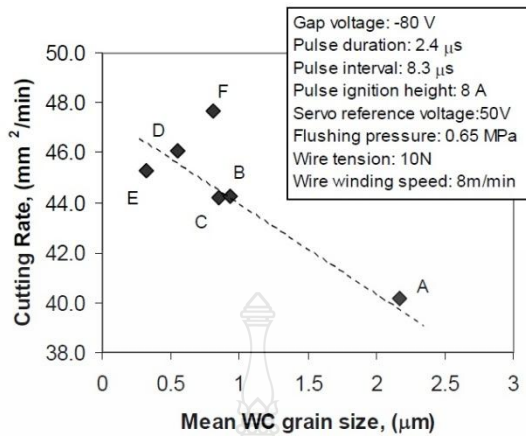
2.10.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการตัดวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์ด้วยวิธี Wire EDM

ขรรค์ชัย โฆสิต และคณะ [13] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้า เครื่องมือ SKD11 ด้วยวิธี Wire EDM โดยปรับ 5 ปัจจัยๆ ละ 3 ระดับ ได้แก่ กระแสตัด (4, 7, 10 A) เวลาหยุดตัด (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) L_{27} ตามวิธีของทากูชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ชิ้นงานมีความกว้างของรอยตัดน้อยที่สุด ความเรียบผิวที่ดีที่สุด และอัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) พวกเขาพบว่าปัจจัยที่ ส่งผลต่อความเรียบผิวที่ดีที่สุดคือ กระแสตัด สำหรับเวลาหยุดตัด ความเร็วลวดและความ ตึงเส้นลวด มีผลปานกลาง ส่วนระยะห่างลวดไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างรอยตัดของชิ้นงาน มากที่สุดคือ กระแสตัดและระยะห่างลวด สำหรับความเร็วลวดและความตึงลวด มีผลปานกลาง ส่วนเวลาหยุดตัดไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสตัด ส่วน เวลาหยุดตัด ความเร็วลวด ความตึงลวด ส่วนระยะห่างลวด ไม่มีผล

Bert Lauwers และคณะ [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดเม็ดเกรนและส่วนผสมโคบอลต์ ของวัสดุผสมที่มีพื้นฐานเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์มาทำการตัดด้วย Wire EDM เพื่อศึกษาผลกระทบที่มี ต่ออัตราการตัดวัสดุ พวกเขาพบว่าขนาดเกรนและสัดส่วนโคบอลต์ผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการตัด ขนาดของเกรนและส่วนผสมโคบอลต์จะบ่งบอกถึงคุณสมบัติในการนำความร้อนและจุดหลอมเหลว ค่าการนำความร้อนและจุดหลอมเหลวที่ต่ำจะมีผลทำให้อัตราการตัดสูง ค่าความแข็งแรงดัด (Bending straight) และความเหนียวของคาร์ไบด์ทุกชนิดจะลดลง โดยเฉพาะทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีเม็ดขนาดเกรน เล็กละเอียดซึ่งจะลดลงอย่างมากหลังจากผ่านกระบวนการ EDM

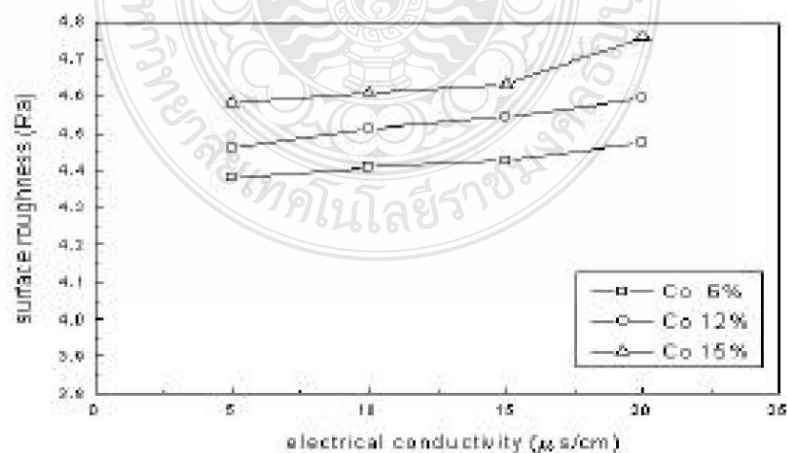


รูปที่ 2.11 แสดงผลกระทบของขนาดของเม็ดเกรนที่มีต่ออัตราการตัด [15]



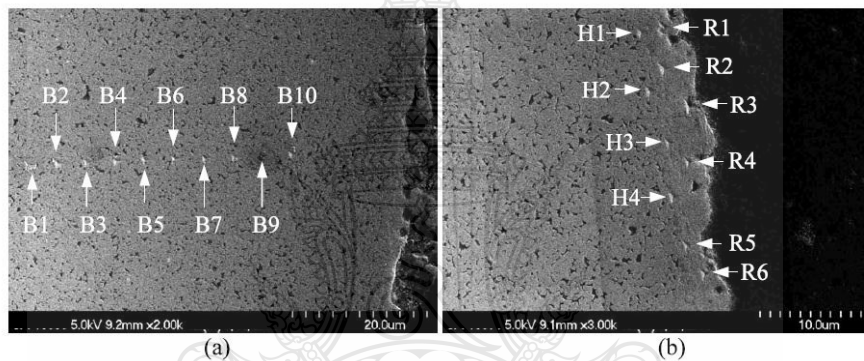
รูปที่ 2.12 แสดงผลกระทบของส่วนผสม โคบอลต์ที่มีต่ออัตราการตัด [15]

Chang-Ho Kim และคณะ [16] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวกลางและสัดส่วนของโคบอลต์ที่มีผลต่ออัตราการตัดและความหยาบผิวเฉลี่ยของคาร์ไบด์ซินเตอร์ด้วยวิธีการตัด Wire EDM พวกเขาพบว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีสัดส่วนของโคบอลต์ต่ำทำให้อัตราการตัดสูง ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงจะทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยยิ่งแย่ลง และค่าการนำไฟฟ้าของสารตัวกลางต่ำ มีผลทำให้อัตราการตัดสูง ธาตุผสม TiC และ TAC ในคาร์ไบด์ ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกัดกร่อน ส่วนใหญ่ปัญหาเกิดจากส่วนผสมของโคบอลต์ในคาร์ไบด์ และการวิเคราะห์ EDS พบธาตุองค์ประกอบของเส้นลวดอิเล็กโทรดติดอยู่บนผิวตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ในการทดลอง



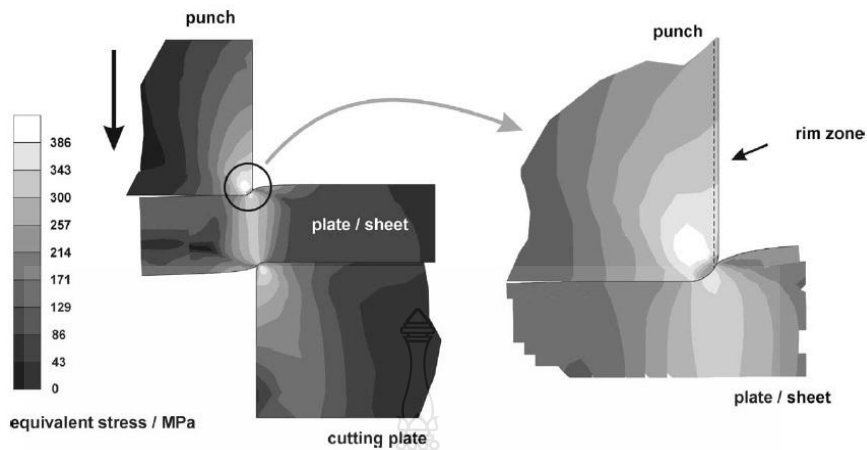
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของส่วนผสม โคบอลต์ที่มีต่อความหยาบผิวของซีเมนต์คาร์ไบด์ [16]

Jun Qu และคณะ [17] ได้ศึกษารอยกดทดสอบขนาดเล็กบนภาคตัดขวางของแต่ละขอบเขตชั้นผิวของชิ้นงานทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์รูปทรงกระบอกที่ตัดด้วย Wire EDM ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ชั้นหล่อหลอมใหม่ (Recast layer) ชั้นผิวที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และวัสดุพื้นฐาน (Base) เพื่อแยกแยะระหว่างลักษณะของรอยกดสภาพปกติ (Regular nano-indentations) กับสภาพที่ผิดปกติ (Irregular nano-indentations) ของทั้งสามขอบเขต พวกเขาพบว่าลักษณะการแตกของรอยกดทดสอบที่มีสภาพผิดปกติเกิดขึ้นจากความพรุนในเนื้อวัสดุ และปริมาณการแยกตัวออกไปของตัวประสานโคบอลต์ ส่วนการแตกร้าวของสภาพรอยกดแบบปกตินั้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นแล้วปรากฏว่า ชั้นผิวหลอมเหลวใหม่มีความแข็งและมอดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าวัสดุพื้นฐาน และบริเวณที่ได้ผลกระทบเนื่องจากความร้อน (HAZ)



รูปที่ 2.14 รอยกดทดสอบความแข็งและ โมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นผิวบนภาคตัดขวางชิ้นงาน [17]

H. Jühr และคณะ [18] ได้ศึกษาการตัดทั้งสแตนไทเทเนียมคาร์ไบด์ (WC-(TiC)-Co) ชิ้นส่วนพื้นซ์ด้วย Wire EDM ในการตัดหลักและการตัดละเอียด โดยพิจารณาแนวทางในการดำเนินงานคือ 1.ลดแรงดันไฟฟ้าแก่ปดิสชาร์จ 2.ลดเวลาเปิด 3.ลดพลังงานของพัลส์ 4.ลดเวลาปิด และ 5. ออกแบบปรับรูปร่างพัลส์พลังงานใหม่ ได้มีการจำลองรูปแบบของพัลส์และใช้เทคนิคโปรแกรมเฉพาะทางในการจำลองใส่โหนดความร้อนไปบนพื้นผิวคมตัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแหล่งพลังงานที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการตัดวัสดุชนิดนี้ พวกเขาพบว่าการเสื่อมสภาพทางคุณสมบัติของผิววัสดุสามารถแก้ไขได้โดยการควบคุมพัลส์ซึ่งใช้พลังงานตัดสูงในขณะที่ทำการตัดหลัก และด้วยการเพิ่มขนาดของช่วงเวลาเปิดที่น้อยกว่า 500 นาโนวินาที ซึ่งสูงกว่าระดับที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้น สามารถนำไปใช้ได้โดยไม่มีปัญหา และการนำแหล่งพลังงานใหม่นี้ไปใช้ในการตัดนั้นประสบความสำเร็จ ทำให้ค่าความแข็งแรงดัด (Bending straight) เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ย 30%



รูปที่ 2.15 แสดงองค์ประกอบความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะตัดชิ้นงานโลหะแผ่น [18]

Sanjiv Kumar และคณะ [19] ได้ศึกษาการตัดวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด 94%WC-6%Co ด้วยวิธี Wire EDM โดยปรับระดับ 4 ปัจจัย ละ 2 ระดับในขั้นตอนตัดหยาบ คือ เวลาเปิด (T_{ON}), เวลาปิด (T_{OFF}), แรงเคลื่อนไฟฟ้าเซอร์โว (V_s), และกระแสไฟฟ้าคิซาร์จ (I_p) โดยออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal array (OA) L_{30} เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความเร็วตัดและการคลาดเคลื่อนขนาด และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามวิธีมาตรฐาน Response surface metrology (RSM) ที่เรียกว่า Central composite design (CCD) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าตอบสนองในกระบวนการ และแสดงออกมาในลักษณะของกราฟิก โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับตัดทังสเตนคาร์ไบด์ชนิดนี้ และพวกเขาพบว่าสมการกำลังสองของ Variance (VS) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (Two factor interactive; 2FI) นั่นคือความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มของเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าคิซาร์จ ในขณะที่เดียวกันที่ไม่มีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนขนาด ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเซอร์โวและเวลาปิดที่น้อยที่สุดมีผลทำให้ค่าความเร็วตัดที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งมีผลในทางตรงกันข้ามกับค่าความคลาดเคลื่อนขนาด ในการออกแบบการทดลอง ค่าความเร็วตัดสูงสุดคาดการณ์อยู่ที่ 0.8695 ในขณะที่ค่ายืนยันผลเท่ากับ 0.819174 และสำหรับค่าความคลาดเคลื่อนขนาดคาดการณ์ไว้ที่ 0.028 ในขณะที่ค่ายืนยันผลเป็น 0.0466

Pardeep Kumar และคณะ [20] ได้ศึกษาการตัดวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ชนิด 76%WC-24%Co ด้วยวิธี Wire EDM โดยปรับ 4 ปัจจัย ละ 2 ระดับ ในขั้นตอนการตัดหยาบคือ เวลาเปิด (T_{ON}), เวลาปิด (T_{OFF}), แรงเคลื่อนไฟฟ้าเซอร์โว (V_s), และกระแสไฟฟ้าคิซาร์จ (I_p) โดยออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal array (OA) L_{30} เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความเร็วตัดและการคลาดเคลื่อน

ขนาด และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามวิธีมาตรฐาน Response surface metrology (RSM) ที่เรียกว่า Central composite design (CCD) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงสุดที่เหมาะสมสำหรับตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ชนิดนี้ และพวกเขาพบว่าสมการกำลังสองของความแปรปรวน (VS) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (Two factor interactive, 2FI) จากเส้นโค้งที่เปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาด ความคลาดเคลื่อนขนาดลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าดิสชาร์จ และเวลาปิดดิสชาร์จ

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของทั้งสแตนคาร์ไบด์กรณีการเจียรไน

J. Yang และคณะ [21] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจียรไนซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-13%Co เกรนละเอียด ต่อความสมบูรณ์ของพื้นผิวและค่าความแข็งแรงดัด (Bending straight) โดยเปรียบเทียบสามสภาพพื้นผิวที่แตกต่างกันคือ พื้นผิวเจียรไน, พื้นผิวขัดเงาเหมือนกระจก (สำหรับอ้างอิง) และพื้นผิวเจียรไนแล้วนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิสูง 920° เซลเซียส และทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของพื้นผิวและลักษณะสมบัติทางกลต่างๆ ด้วยวิธีการศึกษาผิวหน้าการแตกหัก (Fractography) พวกเขาพบว่าการเจียรไนมีผลกระทบอย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของพื้นผิวและค่าความแข็งแรงดัด ในระหว่างการเจียรไนด้วยแรงบดอัดสูงของล้อหินเจียรไนทำให้เกิดความเสียหายของชั้นบางๆ เนื่องจากความเค้นตกค้าง ซึ่งชั้นผิวดังกล่าวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบสภาพผิวขัดเงาที่ใช้อ้างอิง ผลจากการศึกษาผิวหน้าการแตกหัก พบว่ามีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเจียรไน ระดับของค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจะมีมากที่สุดจากตำแหน่งพื้นผิวเจียรไน และจะลดลงไปจนถึง HAZ ส่วนการผ่อนคลายความเค้นตกค้างด้วยการอบคลายความเครียดมีผลดีต่อการแปรรูป แต่ไม่มีประโยชน์ต่อชั้นผิวบางๆ ที่ได้รับความเสียหายแล้ว



รูปที่ 2.16 ความสมบูรณ์ของชั้นผิวเจียรไน (a), ผิวขัดเงา (b), ผิวเจียรไนอบคลายเครียด (c) [21]

2.11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์สูงจะทำให้มีอัตราการตัดต่ำ การปรับปรุงความเร็วตัดหรืออัตราการตัดทำได้โดยการควบคุมพัลส์พลังงานตัดหลักได้แก่ เวลาเปิด (T_{ON}), เวลาปิด (T_{OFF}), แรงเคลื่อนเซอร์โว (V_S), และกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (I_p) อัตราการตัดเพิ่มขึ้นได้เพิ่มเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ แม้การเลี้ยวเบนจะทำให้ชิ้นผิวบางๆ เกิดความเสียหายจากการบดอัดของลวดหินเจียร์ ฉะนั้นการศึกษางานวิจัยนี้ คือ พยายามลดความลึกของผลกระทบทางความร้อนจากพลังงานการดิสชาร์จ ในขณะที่ตัดที่เกิดจากปัจจัยหลักที่มีผลกระทบโดยตรงต่อความเร็วตัดไปยังพื้นผิวตัด ซึ่งอาจช่วยลดปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดของคาน์ของโลหะแข็งซึ่งแปรรูปมาจากวิธี Wire EDM

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ชนิดวัสดุ	ตัวแปรอิสระ	ผลตอบสนอง
Bert Lauwers และคณะ	WC-Co	Grain size and %Co	Cutting rate
Chang-Ho Kim และคณะ	WC-Co	Dielectric conductivity and %Co	Cutting rate and Ra
Jun Qu และคณะ	WC-Co	Indentation and MHV	Comparison result
H. Juhr และคณะ	WC-(TiC)-Co	$I_p, T_{ON}, T_{OFF}, V_G$	T.R.S
Sanjiv Kumar และคณะ	WC-6%Co	$I_p, T_{ON}, T_{OFF}, V_S$	Cutting speed and Dimension deviation
Pardeep Kumar และคณะ	WC-24%Co	$I_p, T_{ON}, T_{OFF}, V_S$	Cutting speed and Dimension deviation
ขรรค์ชัย โมสิต และคณะ	SKD11	$I_p, T_{OFF}, W_S, W_T, W_G$	MRR, Ra and Kerf
J.Yang และคณะ	WC-13%Co	Grind, Polishing and Grind+ Stress release	Surface integrity and Mechanical strength

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดเส้นลวด สำหรับใช้ทำเป็นกมตัดของคายนินเอร์คแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่มีความละเอียดสูง เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง และบรรลุตามวัตถุประสงค์มากที่สุด ผู้ทำวิจัยจึงได้วางแผนในการดำเนินงานวิจัย โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้จำเป็นต้องพิจารณากรรมวิธีการตัดอย่างละเอียดรอบคอบ รวมถึงควบคุมขั้นตอนในการทดลองอย่างถูกต้อง เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ในทุกขั้นตอนปฏิบัติ และได้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำ จึงได้กำหนดเครื่องจักร และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ในการใช้แปรรูปชิ้นงานทดลองมีดังต่อไปนี้คือ

3.1.1 เครื่อง CNC Wire EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS ประเภทตัดใต้น้ำ (Submerge)



รูปที่ 3.1 เครื่อง CNC Wire EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS

3.1.2 สารเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid)

DI มีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electricity resistance) คุณภาพที่ผลิต $> 10 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ และควบคุมช่วงของค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity sensitive; CS) ขณะทำการตัดให้อยู่ในระหว่าง 1.4-3.0 mA และมีความจุของบ่อสารเหลวตัวกลางแบบระบบไหลหมุนเวียนที่สามารถรองรับได้สูงสุดถึง 604 ลิตร [1]



รูปที่ 3.2 น้ำดีไอ (Deionization Water; DI)

3.1.3 เส้นลวดทองเหลือง (Blass Wire)

เส้นลวดทองเหลือง ยี่ห้อ Sumitomo ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มม. ประเภท Non-Paraffin มีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ไม่ต่ำกว่า 1.4 mA [1]



รูปที่ 3.3 เส้นลวดทองเหลือง ยี่ห้อ Sumitomo

3.1.4 เครื่องมือสำหรับทดสอบ และ วัดบันทึกค่าจากการทดลองมีดังนี้

1.) นาฬิกาจับเวลา (Watcher) ยี่ห้อ FBT รุ่น JS-609



รูปที่ 3.4 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ FBT รุ่น JS-609

2.) เครื่องเจียรระโนราบ (Surface grinder)

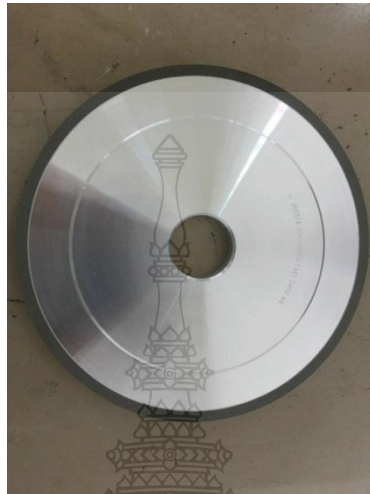
สถานการณ์ทดสอบด้วยวิธีการเจียรระโนราบในขวางกับแนวคมตัดที่ศึกษาขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยเครื่องเจียรระโนราบ ยี่ห้อ Okamoto รุ่น Grind-X ซึ่งจะอ้างอิงกับสถานการณ์ทำงานในปัจจุบันดังนี้ คือ มีความเร็วขอบสูงสุด 40 เมตร/นาที, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางล้อหินเจียรระโน 180 มิลลิเมตร, ความเร็วรอบ 4,244 รอบ/นาที, และอัตราไหลสารหล่อเย็นชนิดพ่นแบบท่วม (Floating) 20-30 ลิตร/นาที



รูปที่ 3.5 เครื่องเจียรระโนราบ ยี่ห้อ Okamoto รุ่น Grind-X

3.) ล้อหินเจียรไนชนิดคอมอนเรซิน (Resin diamond wheel)

ล้อหินเจียรไนเป็นแบบจานชนิดคอมอนเทียม Ø 180 มม. ใช้เจียรไนซ่อมแซมคมตัดแม่พิมพ์ในการปฏิบัติงานจริง และซึ่งได้เลือกตามคำแนะนำของผู้ขาย (Alpha diamond, 2012)



รูปที่ 3.6 ล้อหินเจียรไน 14A1 RESIN(D) SDC#SDC#400 ขนาด D180 H31.75 T13 X5 U10

4.) น้ำมันหล่อเย็น (Coolant oil)

เป็นน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ สำหรับหล่อลื่น เซลล์เจียรไน และระบายความร้อน



รูปที่ 3.7 น้ำมันหล่อเย็น METALINA D202 (Houghton, 2012)

5.) กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนวัดขนาด (Measuring Microscope; MM)



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์วัดขนาด ยี่ห้อ Nikon รุ่น MM-400 (DP-E1)

6.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)
SEM ซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ธาตุพลังงาน (Energy Dispersive X-ray spectroscopy; EDS)



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-5410V (มว., 2557)

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ศึกษางานวิจัยนี้คือ แผ่นซีเมนต์คาร์ไบด์ WC-12%Co มีขนาดเกรน 0.3-0.5 μm มีความแข็ง 93.1 HRA มีขนาดความกว้าง 100 มม. ความยาว 100 มม. และความหนา 16 มม.



รูปที่ 3.10 แผ่นซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co

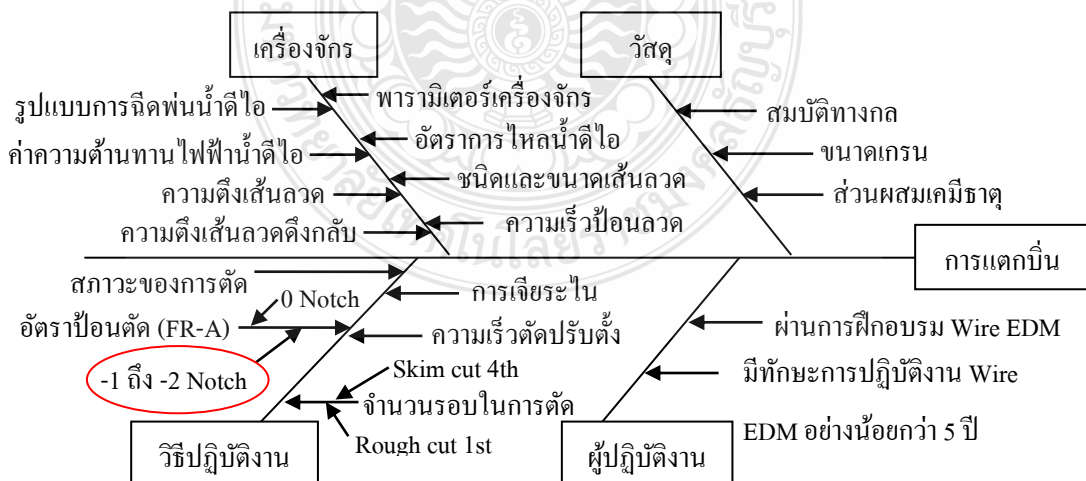
ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชนิดของคาร์ไบด์ขึ้นมาใช้งานกันอย่างหลากหลาย ซีเมนต์คาร์ไบด์เกรดนี้มีชื่อทางการค้าว่า “NF12” เมื่อสังเกตคุณสมบัติในใบรับรองวัสดุ (Material certificate) จะเห็นว่าได้ระบุส่วนผสมไว้คือ WC+E.T.C-12%Co ซึ่งแสดงว่ามีแร่ธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย แต่อาจเป็นเพราะด้วยเหตุผลทางการค้า ทางผู้ผลิตจึงได้ปกปิดชื่อและปริมาณธาตุที่เติมผสมลงไปในซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดนี้ และเนื่องจาก NF12 นั้นมีความแข็งค่อนข้างสูง จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับการนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในเรื่องของการคั่นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ดังกล่าวเป็นอย่างดี

Chemical Composition (Weight percent)										
WC + E.T.C Wt% (0.3-0.5 μm)						Co Wt %				
88						12				
Physical Properties										
Density	Hardness	T.R.S	4 $\pi\sigma$	HC	T.C	Porosity			Photomicrograph	
g/cm ³	HRA	Kgf/mm ²	Gcm ² /g	Oe	(%)	A	B	C	Grain size	η graph
14.15	93.1	354	200	-	-	00	00	00	Photo	NONE
		4 ^T X8 ^W X25 ^L	-			MicroscopeX200			MicroscopeX1000	

รูปที่ 3.11 คุณสมบัติของซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co (Handevise carbide; 2013)

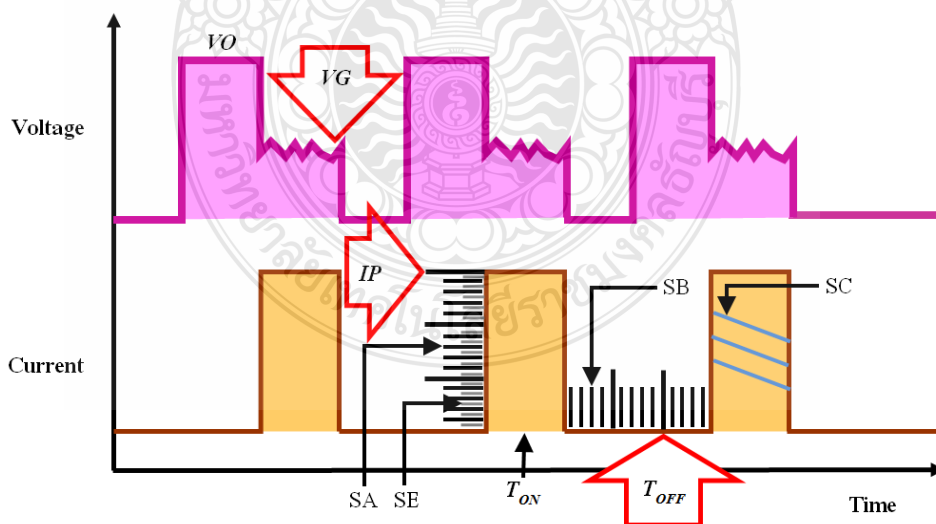
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการทดลองขั้นต้น

ในทางปฏิบัติสิ่งที่หวังผลโดยทั่วไปของการปฏิบัติงาน Wire EDM ก็คือต้องการอัตราการตัดที่สูง มีความเสถียร มีความเที่ยงตรงขนาด และมีความเรียบผิวที่ดี เครื่องจักร Wire EDM แต่ละยี่ห้อ มักจะมีตารางค่าไฟมาตรฐานที่ผู้ผลิตเครื่องจักรออกแบบไว้ให้ใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงาน แต่เนื่องจากในท้องตลาดมีวัสดุหลากหลายชนิด และพัฒนาขึ้นมาเพื่อสนองกับความต้องการของแต่ละผู้ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุผสมชนิดใหม่ๆ เมื่อนำมาตัดแปรรูปด้วยวิธี Wire EDM ปัญหาประการแรกที่มีมักจะพบอยู่เสมอคือความไม่เสถียร (Instability) หรือเส้นลวดขาดบ่อยครั้งขณะตัดหยาบในเที่ยวแรก การขาดของเส้นลวดบ่อยครั้งทำให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมของเครื่อง Wire EDM ลดลง เพราะว่าสูญเสียเวลาในการต่อเส้นลวด กรณีซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดนี้ก็ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดภายหลังจากที่นำไปใช้ตัดเดือนชิ้นงาน ซึ่งไม่พบปัญหาดังกล่าวกับซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดอื่นๆ ซีเมนต์คาร์ไบด์ส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาค่อนข้างสูง กรณีที่ปัจจัยควบคุมนั้นมีมากในการออกแบบการทดลองขั้นแรก โดยทั่วไปมักจะเริ่มจากการปรับปัจจัยควบคุมหลายปัจจัยพร้อมๆ กัน 2 ระดับ คือ ต่ำและสูง เพื่อคัดปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบหรือมีน้อยทิ้งไป ซึ่งเรียกว่าการคัดกรองปัจจัย (Screening factors) [16] จากนั้นค่อยนำปัจจัยที่มีผลกระทบหลักหรือมีผลกระทบร่วมมาพิจารณาออกแบบการทดลองในลำดับต่อไป เพื่อให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ภายใต้ทรัพยากรที่มี ผู้ทำวิจัยจึงเลือกวิธีการประชุมระดมสมอง (Brainstorming) กันระหว่างผู้เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงาน Wire EDM โดยตรงแทน โดยใช้แผนภูมิเหตุและผล (Cause Effected Diagram) มาช่วยวิเคราะห์หาสาเหตุกรณีปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็ก ดังรูปที่ 3.12 จึงเป็นที่มาของการศึกษางานวิจัยนี้



รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์ปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยแผนภูมิเหตุและผล

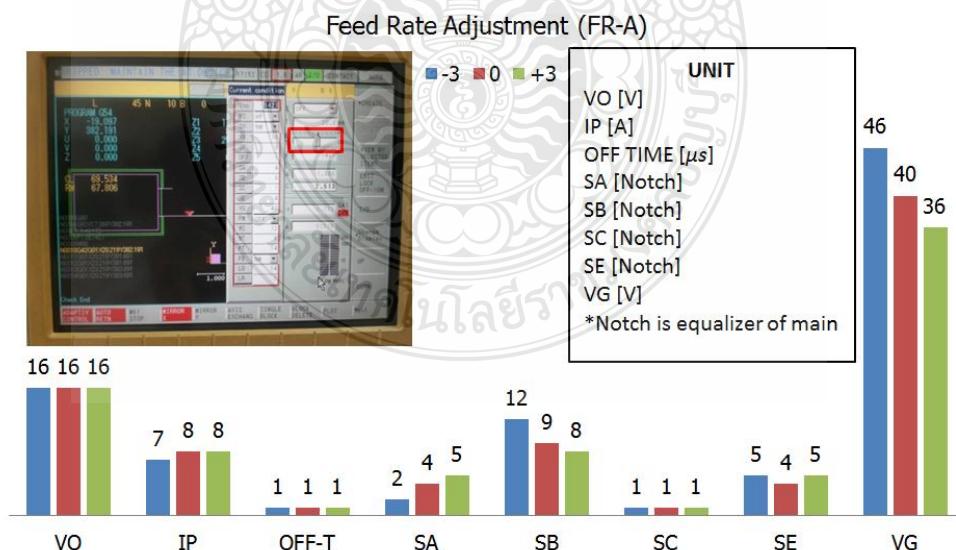
การวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิเหตุและผล พบว่าวิธีปฏิบัติงานได้มีการปรับลดความเร็วตัด (Feed rate adjustment; FR-A) ลง -1 ถึง -2 ระดับตามที่ผู้ผลิตเครื่องจักรแนะนำ [1] ทำให้การตัดมีความเสถียรดีขึ้น แต่ปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กยังคงมีอยู่ ผู้ทำวิจัยจึงทำการทดลองขั้นต้น (Pre-testing) ด้วยการปรับปัจจัย FR-A ถือว่าเป็นปัจจัยตัวแทนซึ่งควบคุมค่าปัจจัยภายในแบบอัตโนมัติผ่านฟังก์ชันการทำงานที่เรียกว่า Adaptive control ไว้ที่ 3 ระดับ คือ -3, 0 และ +3 เพื่อตัดหยาบวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์สองชนิด คือ WC-12%Co กับ RD50 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ RD50 เป็นวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดหนึ่งซึ่งไม่พบปัญหาการแตกบิ่น จากนั้นนำไปตรวจสอบค่าความแข็งของพื้นผิวที่ตัดแบบสุ่ม 3 จุด พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าวัสดุพื้นฐาน (Base) แม้ว่าความแข็งจะลดลงน้อยกว่าที่กรณีของ FR-A ระดับ +3 และเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวตัดของวัสดุ RD50 ไม่มีความแตกต่างทางกายภาพมากนัก ในขณะที่ผิวตัดของวัสดุ WC-12%Co นั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดแต่ยังไม่สามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 3.15 เป็นไปได้ว่าวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ต่างชนิดกันได้รับผลกระทบทางความร้อนจากกระบวนการ Wire EDM สภาวะเดียวกันแต่กลับมีผลต่างกัน และค่าระดับปัจจัยภายในที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการปรับ FR-A ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (I_p) แรงดันไฟฟ้าแก๊ปดิสชาร์จ (V_G) เวลาปิดย่อยชุดบี (SB) ส่วนแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (V_0) เวลาปิด (T_{OFF}) และ SC มีค่าคงที่ทุกความหนาวัสดุ ส่วน SA และ SE เป็นปัจจัยการทำงานย่อยของปัจจัย I_p สำหรับงานตัดละเอียดเป็นพิเศษ [1] ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าระดับปัจจัยน้อยมาก ดังรูปที่ 3.14 และความหมายของพารามิเตอร์อื่นๆ สามารถดูเพิ่มเติมได้จากตารางที่ ก.3



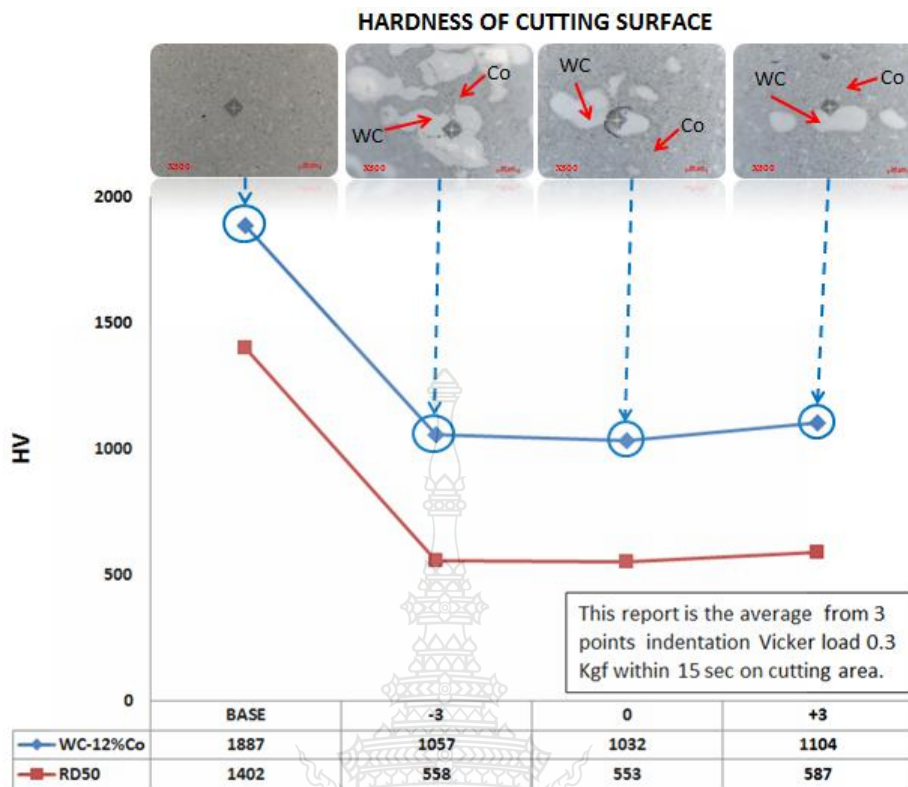
รูปที่ 3.13 ทฤษฎีค่าไฟในงานตัดของ Wire EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น AF10PS

จากทฤษฎีค่าไฟในงานตัดของ Wire EDM ดังรูปที่ 3.13 และจากผลงานศึกษาวิจัยของ Sanjiv Kumar และ Pardeep Kumar ซึ่งเคยศึกษาการตัดซีเมนต์คาร์ไบด์ต่างชนิดกันด้วยวิธี Wire EDM โดยปรับปัจจัยกระบวนการตัดหยาบ 4 ปัจจัยแต่ละปัจจัย 2 ระดับ ได้แก่ เวลาเปิด (T_{ON}), เวลาปิด (T_{OFF}), แรงดันเคลื่อนไฟฟ้าเซอร์โว (V_s หรือ V_G นั่นเอง), และกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ (I_p) ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันคือ พวกเขาพบว่าความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มเวลาเปิดและกระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ [19],[20] ทำให้ผู้ทำวิจัยค่อนข้างมั่นใจว่าความเร็วการตัด (FR-A) ของกระบวนการ Wire EDM น่าจะมีผลต่อลักษณะพื้นผิวตัดและชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ (Recast layer) และส่งผลกระทบต่อขนาดเล็กน้อยของขอบตัด โดยเฉพาะกับคายนีออนลิธด์ที่แปรรูปจากซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ดังกล่าวนี้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถที่จะสรุปได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้นำบันทึกผลขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กในกรณีปรับความเร็วการตัด (FR-A) ที่ได้จากการทดลองขั้นต้นไปวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) ต่อในหัวข้อ 4.1 ของบทที่ 4 เพื่อที่จะใช้สนับสนุนในการตัดสินใจคัดเลือกปัจจัยควบคุมสำหรับการออกแบบการทดลอง Orthogonal array ตามวิธีแบบทากูชิ เพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อไปอีกครั้งหนึ่ง ฉะนั้นสรุปวิธีการคัดเลือกปัจจัยควบคุมในงานวิจัยนี้ได้มาจาก 3 แนวทางซึ่งประกอบกันดังนี้คือ

- 1.) ศึกษาคู่มือปฏิบัติงานเครื่องจักร และทฤษฎีค่าไฟ Wire EDM ของ Mitsubishi รุ่น AF10PS
- 2.) ใช้ประสบการณ์โดยตรงผ่านการประชุมระดมสมองกันระหว่างผู้ปฏิบัติงาน Wire EDM
- 3.) อ้างอิงปัจจัยที่ได้เคยศึกษาไว้ในงานวิจัยของ Sanjiv Kumar และ Pardeep Kumar [19],[20]



รูปที่ 3.14 ระดับค่าปัจจัยภายในที่เปลี่ยนแปลงจากการปรับความเร็วตัดในการตัดหยาบ



รูปที่ 3.15 ค่าความแข็งและลักษณะพื้นผิวตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า

3.4 แผนการดำเนินงานวิจัยและเงื่อนไขการทดลอง

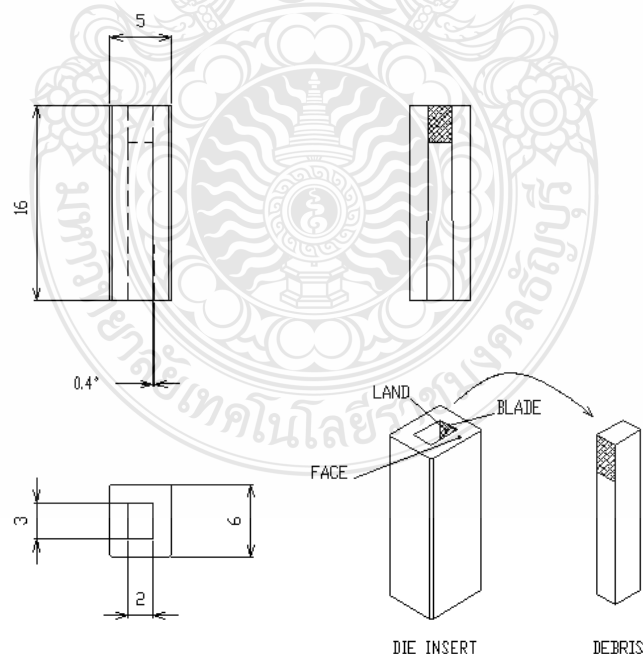
เพื่อให้คงสถานะในการตัดดาบ์อินเลิร์ตเหมือนกับการปฏิบัติงานจริงมากที่สุด และลดโอกาสความผันแปรเนื่องจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เล็กน้อยที่สุด ผู้ทำวิจัยจึงกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ไว้ดังนี้คือ

3.4.1 ดาบ์อินเลิร์ต (Die insert) ในที่นี้เรียกว่า “ชิ้นทดลอง” มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกสี่เหลี่ยมผืนผ้ากลวง มีมิติด้านในเป็นรูปทรงเท่ากับความกว้าง 2 มม. ความยาว 3 มม. และความสูง 16 มม. และมีมิติด้านนอกเป็นรูปทรงเท่ากับขนาด ความกว้าง 5 มม. ความยาว 6 มม. และความสูง 16 มม. (ดูภาพผนวก ก) พื้นผิวด้านในที่เกิดขึ้นจากการตัดจะมีลักษณะเป็นช่องคมตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียกว่า “ผิวข้างคมตัด” (Die live) เป็นพื้นผิวที่ใช้ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ และเมื่อประกอบกับผิวหน้าคมตัด (Die face) จะกลายเป็นขอบคมตัด (Die blade) เหตุผลที่ทำชิ้นทดลองให้เป็นดาบ์อินเลิร์ตก็เพื่อป้องกันปัญหาการแตกบิ่นของขอบคมตัดในระหว่างการขนย้ายไปทดสอบเจียรไน, การทำความสะอาด, และการส่งกล้องเพื่อตรวจวัดขนาด วิธีการแปรรูปคมตัดของดาบ์ดังกล่าวนี้ซึ่งเทียบเคียงกับวิธีการแปรรูป Button Die ด้วยวิธี Wire EDM โดยทั่วไป ปกติแล้วผิวข้างคมตัดจะมีความสูงประมาณ 3-5 เท่าของความหนาชิ้นงานที่ตัด มีมุมเอียงเส้นลวดเท่ากับมุม 1/150 องศา

(ประมาณ 0.4 องศา) หลบเข้าข้างใน ผิวเอียงที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นปากแตรคว่ำลงไปถึงพื้นล่างคายน์อินเล็ต เพื่อให้เศษชิ้นงาน (Scrap) ร่วงหล่นไปได้ง่าย อ้างอิง Standard components for press dies hand book (Misumi, 2011)

3.4.2 ลำดับขั้นตอนในการตัดชิ้นทดลองและการตรวจวัดขนาดรอยแตกบิ่น

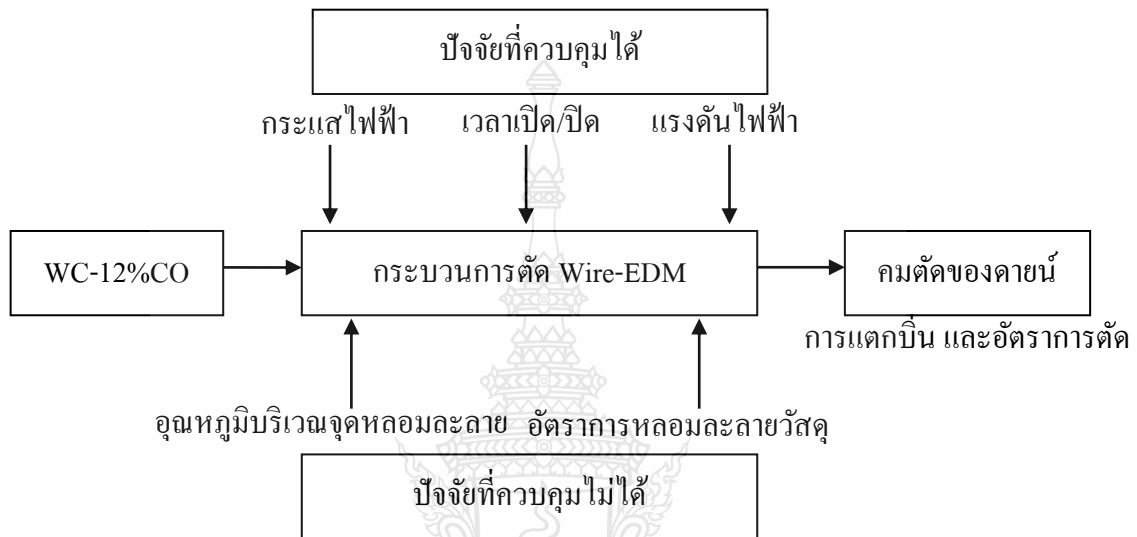
- 1.) ตัดหยาบ (Rough cut) ส่วนตรงตามเส้นรูปร่างคมตัดด้วยค่าปัจจัยการทดลองและบันทึกเวลาตัดจริงด้วยนาฬิกาจับเวลา
- 2.) ตัดหยาบส่วนมุมเอียง (Angle rough cut) เพียงครั้งเดียว และตัดละเอียด (Skim cut) ส่วนตรงของคมตัดอีก 4 ครั้ง ด้วยค่าปัจจัยสำหรับทั้งสแตนคาร์ไบด์ความหนา 20 มม. (ดูภาคผนวก ก)
- 3.) ตัดหยาบ (Rough cut) ตามเส้นรูปร่างภายนอกเที่ยวเดียวด้วยค่าปัจจัยเดียวกันกับข้อที่ 2 เพื่อให้ชิ้นทดลองหลุดออกจากแผ่นซีเมนต์คาร์ไบด์ และเขียนหมายเลขกำกับการทดลองไว้ทุกชิ้น
- 4.) พื้นผิวของเศษคาร์ไบด์ (Debris) ที่อยู่ระดับเสมอกับผิวข้างคมตัด (Die live) ที่ศึกษาซึ่งมีความสูง 3 มิลลิเมตร จะถูกนำมาใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคพื้นผิวตัดและภาคตัดขวางกับแนวตัด
- 5.) ตรวจวัดขนาดรอยแตกบิ่นมากที่สุดบนขอบคมตัดด้านที่ลื้อหินเงียระในราบบนหมุนเข้าตัด ดังรูปที่ 3.19 โดยผู้ชำนาญการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน ดังรูปที่ ก.10 วิธีการเงียระในทดสอบ คือทำการเงียระในขวางกับขอบตัดช่วงของระยะตรวจวัด 2 มม. (พื้นผิวแรงเงา) ซึ่งเงียระในกึ่งลึก (Depth of cut) ที่ละไม่เกิน 3 ไมครอน โดยผู้ชำนาญงานซ่อมแซมและประกอบแม่พิมพ์โลหะ ดังรูปที่ ก.9



รูปที่ 3.16 แบบชิ้นทดลองและพื้นผิวตัดที่ทำการศึกษา

3.5 การออกแบบการทดลอง

จากความสัมพันธ์ของปัจจัยในกระบวนการตัดด้วยวิธี Wire EDM เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้นำไปสู่การวิเคราะห์ที่ตรงกับวัตถุประสงค์ ผู้ทำวิจัยจึงได้พิจารณาปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และให้เกิดประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานจริงให้ได้มากที่สุดภายใต้ทรัพยากรเท่าที่มีอยู่



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการตัด Wire EDM

ปัจจัยต้นหรือตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ได้จากแนวคิดดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 ที่ผ่านมา ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่สามารถควบคุมได้ ส่วนปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น อุณหภูมิบริเวณจุดหลอมละลายและอัตราการหลอมละลายวัสดุ ลำดับขั้นตอนการออกแบบการทดลองดังต่อไปนี้คือ

1.) ปัจจัยควบคุมที่ใช้สร้างพลังงานตัดหลัก และมีผลต่อความเร็วตัดหรืออัตราการตัดวัสดุ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะถูกกำหนดให้เป็นค่าที่ใช้ในปัจจุบัน และเนื่องจากเครื่องจักรนี้ไม่ได้ระบุปัจจัยเวลาเปิด (T_{ON}) เอาไว้ ถึงแม้เป็นที่ทราบกันดีว่าสามารถคำนวณหาได้จากสมการ Duty cycle แต่ในที่นี้ก็ยังไม่สามารถกำหนดค่าปัจจัย T_{ON} เป็นการเฉพาะให้กับเครื่องจักรทำงานได้ ส่วนปัจจัยเวลาปิด (T_{OFF}) นั้นมีค่าคงที่เท่ากับ 1 ของทุกความหนาวัสดุสำหรับการตัดหยาบ [1] จึงไม่สะดวกที่จะปรับค่าระดับปัจจัยที่ต่ำกว่านี้ได้อีก จากทฤษฎีค่าไฟในการตัด Wire EDM ของเครื่องจักรนี้ ดังรูปที่ 3.13 ผู้ทำวิจัยจึงเปลี่ยนมาใช้ค่าระดับปัจจัยเวลาปิดย่อยชดเชย (Stabilizer B; SB) แทน เพราะว่าเป็นฟังก์ชันทำงานย่อยที่คล้ายกับการทำงานของเวลาปิด (T_{OFF}) [22] ดังนั้นการกำหนดชื่อปัจจัยควบคุมสำหรับศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ กระแสไฟฟ้าคัทซาร์จ (I_p), เวลาปิด (T_{OFF} หรือ SB), และแรงดันไฟฟ้าเก็บคัทซาร์จ (V_G)

- 2.) กำหนดระดับปัจจัยในการทดลองแต่ละปัจจัยไว้ที่ 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.1
- 3.) เลือก OA มาตรฐาน L_{27} และกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง $n = 2$ [23]

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยควบคุมในการทดลอง

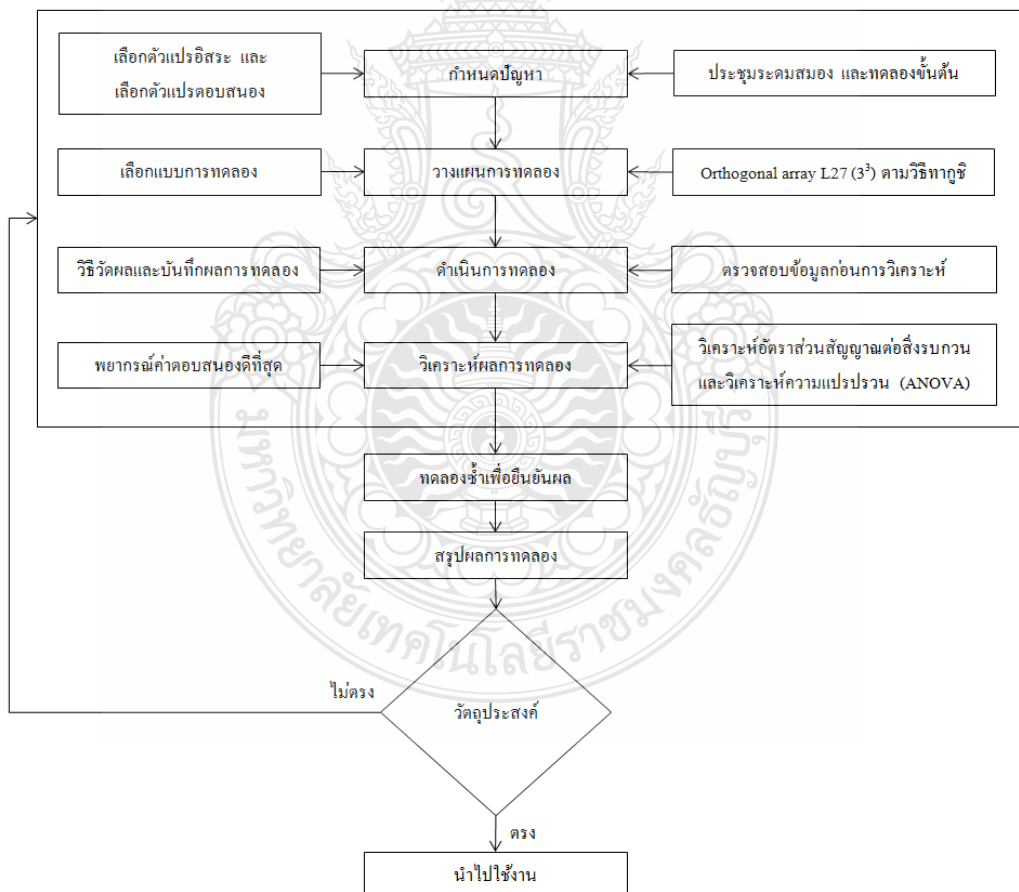
Factor	Level 1	Level 2	Level 3
I_p (Amp)	5	7	9
T_{OFF} (μ s)	6	9	12
V_G (Volt)	37	40	43

ตารางที่ 3.2 ตารางการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array $L_{27}(3^3)$

No.	I_p (A)	T_{OFF} (μ s)	V_G (V)
1	5	6	37
2	5	6	40
3	5	6	43
4	5	9	37
5	5	9	40
6	5	9	43
7	5	12	37
8	5	12	40
9	5	12	43
10	7	6	37
11	7	6	40
12	7	6	43
13	7	9	37
14	7	9	40
15	7	9	43
16	7	12	37
17	7	12	40
18	7	12	43

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) การออกแบบการทดลอง Orthogonal Array L₂₇ (3³)

No.	I _p (A)	T _{OFF} (μs)	V _G (V)
19	9	6	37
20	9	6	40
21	9	6	43
22	9	9	37
23	9	9	40
24	9	9	43
25	9	12	37
26	9	12	40
27	9	12	43



รูปที่ 3.18 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

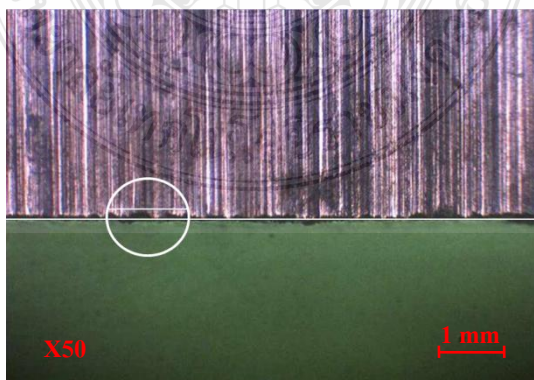
3.6 ลำดับขั้นตอนการทดลองและการเก็บบันทึกข้อมูล

หลังจากที่เลือกตาราง OA, L₂₇ (3³) ตามวิธีแบบทฤษฎี ดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

- 1.) เตรียม Machining Parameter ของ Wire EDM สำหรับตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ (ดูภาคผนวก ก)
- 2.) สร้างเส้น 2D CAD และ CAM แล้วแปลงออกมาให้เป็นชุดคำสั่ง NC Program (G-Code & M-Code) เพื่อที่จะใช้สั่งให้เครื่องจักรทำงาน จากนั้นบันทึก NC Program ลงเครื่องจักร Wire EDM

3.) เรียก NC Program ที่บันทึกไว้ขึ้นมาเพื่อทำการตัดชิ้นทดลองทีละชิ้นแบบสุ่ม (Random) ภายใต้เงื่อนไขการทดลองในหัวข้อ 3.4 ตามลำดับ ในขณะที่เครื่องจักรเริ่มตัดให้หยุดเครื่องจักรเป็นวิธีขัดจังหวะการทำงาน (Interrupt) เพื่อแก้ไขระดับค่าปัจจัยการทดลองที่ควบคุมได้ โดยกระทำผ่านทางหน้าต่างค่าไฟ (E-Condition) บนหน้าจอมอนิเตอร์ควบคุม (ดูภาคผนวก ก) เฉพาะค่าปัจจัยการทดลองที่ได้ออกแบบการทดลองตามในตารางที่ 3.2 ส่วนปัจจัยอื่นกำหนดให้เป็นค่าปัจจัยในปัจจุบันทำการบันทึกเวลาตัดจริงในขณะที่ทำการตัด และกรณีที่เส้นลวดขาดในขณะที่ตัดให้ทำการหยุดจับเวลาชั่วคราว เพื่อต่อลวดใหม่ให้เรียบร้อย จากนั้นจึงทำการจับเวลาต่อไปจนเสร็จ และจดบันทึกช่วยจำเป็นจำนวนนับครั้งที่ลวดขาดเอาไว้ จากนั้นคำนวณหาอัตราการตัดวัสดุ (Cutting rate; CR) จากสมการ 2.1 และ 2.2 ในบทที่ 2 ตามลำดับ แล้วบันทึกค่าอัตราการตัดที่ได้ลงไว้ในตารางที่ 4.3

4.) นำชิ้นทดลองไปเจียรระนาบทดสอบคมตัดด้วยเครื่องเจียรระนาบภายใต้สภาวะเดียวกัน ดังรูปที่ ก.9 ทำความสะอาดชิ้นทดลอง และวัดขนาดรอยแตกบิ่นที่มากที่สุดเข้าไปจากแนวตรงบนขอบของคมตัด ตามข้อที่ 5 ในหัวข้อ 3.4.2 ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่า ขนาดการแตกบิ่นมีหน่วยเป็นไมโครเมตร การเก็บบันทึกค่าวัดไว้ในตารางที่ 4.8 และบันทึกภาพถ่ายด้วยโปรแกรมช่วยถ่ายภาพ นำเสนอการเทียบเคียงลักษณะกายภาพขอบคมตัดของชิ้นทดลอง ดังตารางที่ ข.3 ซึ่งเรียกวิธีการเทียบเคียงนี้ว่า การศึกษาผิวหน้าแตกหัก (Fractography) [24]



รูปที่ 3.19 วิธีการวัดขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยกล้อง MM กำลังขยาย 50 เท่า

5.) การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการทดลองขั้นต้นมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณแนวโน้มของความสัมพันธ์ของปัจจัยตัวแทนของชุดปัจจัยภายใน ในที่นี้คือความเร็วตัด (FR-A) ต่อการแตกบิ่นขนาดเล็ก ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกปัจจัยควบคุมเพื่อนำไปออกแบบการทดลองแบบทากูชิใน ส่วนที่สอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมและกินหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุดต่อไป การปรับ FR-A ซึ่งจะมีผลเฉพาะในขั้นตอนการตัดหยาบเท่านั้น และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้มีลำดับขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

5.1) การวิเคราะห์ผลทดลองขั้นต้น

- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลของค่าผลตอบสนองเฉลี่ยจากข้อมูล 3 ชุด ด้วยการทดสอบการกระจายตัว (Normality test) ของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นแบบปกติ (Normal distribution)

- หาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองต่อค่าตอบสนองที่สนใจศึกษา ได้แก่ ปัญหาของการแตกบิ่นขนาดเล็ก

- วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยอัตราป้อน โดยพิจารณาการมีอิทธิพลของความเร็วตัดต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กจากค่า P-value

- พิจารณาความเหมาะสมของการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยพิจารณาส่วนตกค้าง (Residual) หรือข้อผิดพลาดจากการทดลอง เพื่อหาข้อสรุปจากผลการทดลองขั้นต้น

5.2) การวิเคราะห์การมีอิทธิพลของปัจจัยและสรุปผลการทดลองขั้นต้น

ส่วนที่สองนี้เป็นการออกแบบการทดลอง Orthogonal array $L_{27}(3^3)$ ของปัจจัยที่คัดเลือกตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ส่วนปัจจัยอื่นที่เหลือให้ใช้ค่าระดับปัจจัยที่เป็นปัจจุบัน

- ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลของค่าผลตอบสนองเฉลี่ยจากข้อมูล 2 ชุด ด้วยการทดสอบการกระจายตัว (Normality test) ของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นแบบปกติ (Normal distribution)

- การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratios, S/N; η) มีรูปแบบการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิดังนี้คือ

- หาค่า S/N – Ratios ในรูปแบบ Smaller-is-better สำหรับการแตกบิ่นขนาดเล็ก (Micro chipping; mC)

- หาค่า S/N – Ratios ในรูปแบบ Larger-is-better สำหรับอัตราการตัด

(Cutting rate; CR)

- วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบการมีอิทธิพลของปัจจัยควบคุมต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กและอัตราการตัด ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนความแปรปรวน (F-ratios) หรือค่า F_0 และใช้วิธีรวมเข้า (Pulling) การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าผลลัพธ์ที่เป็นค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean; ANOM) ซึ่งหาได้จากทั้งอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนหรือค่าตอบสนองเฉลี่ย

- หาค่าเฉลี่ยและผลต่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน เพื่อพิจารณาอันดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยควบคุม โดยใช้หลักการ “One-half rule of thumb” อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.10.7

- พล็อตกราฟอัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย เพื่อบอกชื่อและบ่งชี้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยที่มากที่สุด $\text{Max} \{S/N - \text{Ratios}\}$ เป็นค่าที่ดีที่สุด เพื่อพยากรณ์ (Prediction) ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

6.) การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดลองตามวัตถุประสงค์ เมื่อทราบระดับปัจจัยที่ทำให้ขนาดของการแตกบิ่นน้อยที่สุดและอัตราการตัดมากที่สุดแล้ว ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อให้เกิดความมั่นคงของกระบวนการ และใช้เปรียบเทียบกับกระบวนการแบบดั้งเดิมก่อนการปรับปรุงหรือเป็นกระบวนการซึ่งใช้ปฏิบัติงานอยู่ในปัจจุบัน เพื่อหาข้อสรุปผลในการดำเนินงานวิจัยนี้ต่อไป

3.7 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab R14 มาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ จากผลการทดลองทั้งหมดแทนการคำนวณด้วยมือ ซึ่งมีวิธีการที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลามาก และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งสร้างมาจากสมการทางสถิติต่างๆ ดังนี้

3.7.1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality test) และหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ เป็นการทดสอบเพื่อดูการกระจายตัวและเป็นอิสระของข้อมูล ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นการทดสอบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ว่าผลการทดลองนั้น มีความผันแปรโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่กำหนด หรือเกิดจากธรรมชาติของกระบวนการ

ค่า R^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง $0 < R^2 < 1$ ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าสูง แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่กำหนด แต่ถ้าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ แสดงว่าความผันแปรเกิดขึ้นจากธรรมชาติของกระบวนการ เช่น $R^2 > 0.7$ หมายความว่าความผันแปรในค่าตอบสนองเกิดมาจากปัจจัยที่กำหนดนั้นมีมากนั่นเอง แต่ถ้า $R^2 < 0.7$ หมายความว่าแผนการทดลองที่ใช้ไม่เหมาะสม

กรณีที่ยังยั้งที่กำหนดสามารถอธิบายความผันแปรที่เกิดขึ้นต่อค่าตอบสนองได้มากกว่าหรือเท่ากับ 70% ถึงจะวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ต่อไป

3.7.2 การวิเคราะห์ค่าอัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N – Ratio)

ในแนวทางของทฤษฎีนั้น เป็นการพิจารณาส่วนของฟังก์ชันการสูญเสีย (The loss function) ซึ่งพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N ratios) ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเป็นค่ากำลังสองเฉลี่ยซึ่งถือว่าเป็นสัญญาณ (Signal) ชนิดหนึ่ง และค่ากำลังสองของความผิดพลาดซึ่งถือว่าเป็นสิ่งรบกวน (Noise) ชนิดหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นในที่นี้เราจะใช้แนวทางดังกล่าวในการเลือกระดับปัจจัยที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่มีค่ามากที่สุด ((Max {S/N ratios})) มาเป็นระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อที่จะพยากรณ์ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ฉะนั้นจากเงื่อนไขอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N - ratio) ยิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-is-better) กรณีการแตกบิ่นขนาดเล็ก และยิ่งมากยิ่งดี (Larger-is-better) กรณีอัตราการตัด จึงข้ามการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลลัพธ์ค่าเฉลี่ย (ANOM) ไปยังส่วนของการหาค่าตอบสนองที่ดีที่สุดจาก S/N_L กรณีการแตกบิ่นขนาดเล็ก และ S/N_L กรณีอัตราการตัด ซึ่งเป็นการหามาจากส่วนที่อยู่ตรงกันข้ามกับกำลังสองค่าเฉลี่ย (Mean Square; MS) ได้เช่นกัน สำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N – ratios) ในงานวิจัยมีลำดับนี้

1.) รูปแบบของการออกแบบการทดลองแบบทฤษฎีในงานวิจัย

ต้องการค่าตอบสนองที่ดีที่สุดเป็นค่าที่มากที่สุดโดยวิเคราะห์จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N – Ratios) ในรูปแบบของ Larger-is-better (LB) ดังสมการดังนี้คือ

$$S / N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ S / N_L คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของแต่ละการทดลอง
 n คือ จำนวนของการทดลอง (ไม่รวมการทำซ้ำ)
 y_i คือ ค่าตอบสนองในแต่ละครั้งของแต่ละการทดลอง
 ($i=1, 2, 3, \dots, r$)

ต้องการค่าตอบสนองที่ดีที่สุดเป็นค่าที่น้อยที่สุดโดยวิเคราะห์จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N – Ratios) ในรูปแบบของ Smaller-is-better (SB) ดังสมการดังนี้คือ

$$S / N_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ S / N_s คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนในแต่ละการทดลอง
 n คือ จำนวนของการทดลอง (ไม่รวมการทำซ้ำ)
 y_i คือ ค่าตอบสนองในแต่ละครั้งของแต่ละการทดลอง

$$(i=1, 2, 3, \dots, r)$$

2.) หาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน S/N – Ratios
การหาค่าเฉลี่ยรวมของ S/N – Ratio ในการทดลอง โดยใช้สมการดังนี้

$$\overline{S/N} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n S/N_i \right] \quad (3.3)$$

เมื่อ $\overline{S/N}$ คือ ค่าเฉลี่ยรวมของ S/N – Ratios

S/N_i คือ ค่า S/N-Ratios ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย i

i คือ ลำดับที่ของการทดลอง (ในที่นี้ $i = 1, 2, 3, \dots, 27$)

ฉะนั้นค่าเฉลี่ยของ S/N – Ratio ทั้งกรณี Larger-is-better (LB) และกรณี Small-is-better (SB) มีดังนี้

$$\overline{S/N}_{L/s} = \frac{1}{27} \left[\sum_{i=1}^{27} S/N_{L/s} \right] \quad (3.4)$$

หาค่าเฉลี่ยของ S/N – Ratios ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย A โดยใช้สมการ

$$S/N : A_1 = \frac{1}{3} (S/N_{A1} + S/N_{A2} + S/N_{A3}) \quad (3.5)$$

$$S/N : A_2 = \frac{1}{3} (S/N_{A4} + S/N_{A5} + S/N_{A6}) \quad (3.6)$$

$$S/N : A_3 = \frac{1}{3} (S/N_{A7} + S/N_{A8} + S/N_{A9}) \quad (3.7)$$

หาค่าเฉลี่ยของ S/N – Ratios ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย B โดยใช้สมการ

$$S/N : B_1 = \frac{1}{3} (S/N_{B1} + S/N_{B4} + S/N_{B7}) \quad (3.8)$$

$$S/N : B_2 = \frac{1}{3} (S/N_{B2} + S/N_{B5} + S/N_{B8}) \quad (3.9)$$

$$S/N : B_3 = \frac{1}{3} (S/N_{B3} + S/N_{B6} + S/N_{B9}) \quad (3.10)$$

หาค่าเฉลี่ยของ S/N – Ratios ของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย C โดยใช้สมการ

$$S/N : C_1 = \frac{1}{3} (S/N_{C1} + S/N_{C6} + S/N_{C8}) \quad (3.11)$$

$$S/N : C_2 = \frac{1}{3} (S/N_{C2} + S/N_{C4} + S/N_{C9}) \quad (3.12)$$

$$S/N : C_3 = \frac{1}{3} (S/N_{C3} + S/N_{C5} + S/N_{C7}) \quad (3.13)$$

3.) วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ (ANOVA)

หาค่าผลบวกกำลังสองเฉลี่ยรวม (Grand Total Sum of Square; GTSS) จากสมการ

$$GTSS = \sum_{i=1}^n (S/N_i)^2 \quad (3.14)$$

เมื่อ	GTSS	คือ	ผลบวกกำลังสองเฉลี่ยรวม (Grand Total Sum of Squares)
	S/N	คือ	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย (S/N-Ratio)
	i	คือ	ลำดับที่ของการทดลอง (ในที่นี้ $i = 1, 2, 3, \dots, 27$)

ฉะนั้นค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratios ทั้งกรณี Larger-is-better (LB) และกรณี Small-is-better (SB) ดังนี้

$$GTSS_{L/s} = \sum_{i=1}^{27} (S/N_{L/s}) \quad (3.15)$$

และจากที่นิยามของค่าผลบวกกำลังสองเฉลี่ยรวม (GTSS) ซึ่งมีอยู่ว่า

$$GTSS = SS_{tr} + SS_e \quad (3.16)$$

หาค่าผลบวกกำลังสองของ S/N-Ratios ของแต่ละการทดลองที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยกำลังสองเฉลี่ย

$$SS_{tr} = n \times (\overline{S/N})^2 \quad (3.17)$$

เมื่อ	SS_{tr}	คือ	ผลบวกกำลังสอง (Sum of Squares)
	$\overline{S/N}$	คือ	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย
	n	คือ	จำนวนของการทดลอง (ไม่รวมการทำซ้ำ)

หาค่าผลบวกกำลังสองของค่า S/N-Ratio ในแต่ละการทดลองที่คลาดเคลื่อนไปจากผลบวกกำลังสองเฉลี่ยรวม (GTSS) จากสมการ

$$SS_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{27} (S/N_i - \overline{S/N})^2 \quad (3.18)$$

เมื่อ	SS_e	คือ	ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน
	S/N_i	คือ	ค่า S/N-Ratio ของแต่ละการทดลอง
	$\overline{S/N}$	คือ	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยจากการทดลอง

หาผลบวกกำลังของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย A ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสมการ

$$SS_A = n_{A1} \times \left[(S/N_{A1} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{A2} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{A3} + \overline{S/N})^2 \right] \quad (3.19)$$

หาผลบวกกำลังของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย B ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสมการ

$$SS_B = n_{B1} \times \left[(S/N_{B1} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{B2} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{B3} + \overline{S/N})^2 \right] \quad (3.20)$$

หาผลบวกกำลังของ S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย C ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมจากสมการ

$$SS_C = n_{C1} \times \left[(S/N_{C1} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{C2} - \overline{S/N})^2 + (S/N_{C3} + \overline{S/N})^2 \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ	SS_i	คือ	ผลบวกกำลังสองที่เกิดจากแต่ละปัจจัย i
	S/N_{ij}	คือ	ค่า S/N-Ratio แต่ละระดับ j ของปัจจัย i
	n_{ij}	คือ	การทดลองแต่ละระดับ j ของปัจจัย i

หาผลรวมกำลังสองรวม (Sum of Square; SS) ได้จากสมการดังนี้

$$SS_T = (SS_A + SS_B + SS_C) + SS_e \quad (3.22)$$

หาค่าขึ้นความอิสระหรือองศาอิสระ (Degree of freedom; d.f) สำหรับ Orthogonal Array $L_{27}(3^3)$ ที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ซึ่งจะมีจำนวนการทดลอง 27 หน่วย และจะมีค่า 26 d.f และในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยรวมของ Orthogonal Array ใดๆ จะใช้ d.f สำหรับผลบวกกำลังสองของค่าที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 26 d.f คำนวณได้จากสมการ

$$d.f_T = (n-1) \quad (3.23)$$

$$d.f_T = (27-1) = 26$$

เมื่อ $d.f_T$ คือ องศาอิสระของผลบวกกำลังสองที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมหาค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของแต่ละปัจจัย (Mean Square; MS_{tr})

$$MS_{tr} = \frac{SS_{tr}}{d.f_{tr}} \quad (3.24)$$

หาค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Error Mean Square; MS_e)

$$MS_e = \frac{SS_e}{d.f_e} \quad (3.25)$$

หาอัตราส่วนของความแปรปรวน (F-Ratios) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการทดสอบระดับความมีนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัยเทียบกับค่า F_{α, v_1, v_2} ที่เปิดจากตาราง F-distribution สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$F_{tr} = \frac{MS_{tr}}{MS_e} \quad (3.26)$$

เมื่อ F_{tr} คือ อัตราส่วนของความแปรปรวน (F-Ratios)

MS_{tr} คือ ค่าผลบวกกำลังสองเฉลี่ยของการทดลอง

MS_e คือ ค่าผลบวกกำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด

ปกติการนิยามอิทธิพลของปัจจัยของการทดลองได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองเฉลี่ยของปัจจัยนั้นๆ (MS_{tr}) เทียบกับค่ากำลังสองเฉลี่ยของความผิดพลาด (MS_e) เพื่อต้องการดูความแปรปรวนของค่าตอบสนองที่เกิดจากความผันแปรของระดับปัจจัย ซึ่งเรียกว่าการประมาณค่าจากความคลาดเคลื่อน ถือว่าเป็นวัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และในการสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความแปรปรวนในการทดลองที่เกิดจากแต่ละปัจจัย F_{tr} กับค่าสถิติ F_{α, v_1, v_2} ที่ได้จากการเปิดตาราง F-distribution วิธีการประมาณค่าจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว สามารถบอกได้เพียงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยจากเกณฑ์ค่าระดับความมีนัยสำคัญที่กำหนด F_{tr} จะเป็นตัวทดสอบในการแจ้งสัดส่วนความแปรปรวน แต่ยังไม่สามารถระบุ

ลำดับอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้ ซึ่งจะจัดอันดับของการมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้ผ่านวิธีการ Pulling และส่วนวิเคราะห์ความเหมาะสมของความแปรปรวนจากส่วนตกค้าง (Residual) ต่างๆ มีดังนี้

- การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution)
- การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent)
- ตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่ (Variance stability)

หาร้อยละการมีอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Percentage contribution; % ρ) ที่มีผลต่อค่าตอบสนองดังนี้

$$\% \rho = (SS_{ir} / SS_T) \times 100 \quad (3.27)$$

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หลายปัจจัยพร้อมกัน

Source	d.f	SS	MS	F_0	% ρ
A	a-1	SS_A	MS_A	MS_A / MS_E	$(SS_A / SS_T) \times 100$
B	b-1	SS_B	MS_B	MS_B / MS_E	$(SS_B / SS_T) \times 100$
C	c-1	SS_C	MS_C	MS_C / MS_E	$(SS_C / SS_T) \times 100$
Error	abc(n-1)	SS_E	MS_E		
Total	abcn-1	SS_T			

4.) หาผลต่างค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน ($\Delta S/N$) และจัดอันดับของการมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยด้วยหลักการ “One-half rule of thumb” และการหาอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย โดยคำนวณหาค่าเฉลี่ย S/N-Ratio ในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยทั้งหมดของ S/N-Ratios จากการทดลอง หาได้จากสมการดังนี้

อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ 1

$$\Delta A_1 = (\overline{S/N_{A_1}} - \overline{S/N}) \quad (3.28)$$

อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ 2

$$\Delta A_2 = (\overline{S/N_{A_2}} - \overline{S/N}) \quad (3.29)$$

อิทธิพลของปัจจัย A ระดับที่ 3

$$\Delta A_3 = (\overline{S/N_{A_3}} - \overline{S/N}) \quad (3.30)$$

อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ 1

$$\Delta B_1 = (\overline{S/N_{B_1}} - \overline{S/N}) \quad (3.31)$$

อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ 2

$$\Delta B_2 = (\overline{S/N_{B_2}} - \overline{S/N}) \quad (3.32)$$

อิทธิพลของปัจจัย B ระดับที่ 3

$$\Delta B_3 = (\overline{S/N_{B_3}} - \overline{S/N}) \quad (3.33)$$

อิทธิพลของปัจจัย C ระดับที่ 1

$$\Delta C_1 = (\overline{S/N_{C_1}} - \overline{S/N}) \quad (3.34)$$

อิทธิพลของปัจจัย C ระดับที่ 2

$$\Delta C_2 = (\overline{S/N_{C_2}} - \overline{S/N}) \quad (3.35)$$

อิทธิพลของปัจจัย C ระดับที่ 3

$$\Delta C_3 = (\overline{S/N_{C_3}} - \overline{S/N}) \quad (3.36)$$

5.) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย (S/N-Ratios) ของแต่ละระดับในแต่ละปัจจัย จากนั้นบอกชื่อและบ่งชี้ระดับปัจจัยเหมาะสมที่ให้คำตอบสนองที่ดีที่สุด โดยใช้หลักเกณฑ์ตามวิธีแบบทากูชิ

6.) หากค่าพยากรณ์ (Prediction) คือการคาดการณ์ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในการทดลองจากระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย (S/N - Ratios; η) ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยพิจารณาอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยที่ตีรวมกับผลรวมของผลต่างค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ได้จากแต่ละปัจจัย ในที่นี้ขอแสดงตัวอย่างในรูปแบบ Larger-is-better (LB) ให้ l_{LB} เป็นการพิจารณาฟังก์ชันการสูญเสีย (The loss function) จากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนจากสมการดังนี้

$$l_{LB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3.37)$$

$$\eta = -10 \log(l_{LB}) \quad (3.38)$$

ดังนั้น

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{j=1}^i (\bar{\eta}_j - \eta_m) \quad (3.39)$$

เมื่อ $\hat{\eta}$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ดีที่สุดจากการพยากรณ์

η_m คือค่าเฉลี่ยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ตีรวม

$\bar{\eta}_j$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่ดีที่เกิดจากแต่ละปัจจัย i

i คือจำนวนของปัจจัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการทดลองขั้นต้นโดยปรับความเร็วตัด (FR-A) 3 ระดับคือ -3, 0 และ +3 และดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง Orthogonal array $L_{27}(3^3)$ ของวิธีทากูชิ โดยปรับปัจจัยควบคุมแต่ละปัจจัย 3 ระดับคือ กระแสไฟฟ้าดิซชาร์จ (I_p), เวลาปิด (T_{OFF}) และแรงดันไฟฟ้าแก๊ปดิซชาร์จ (V_G) ต่อผลตอบสนองบริเวณพื้นผิวตัดซึ่งเป็นผิวข้างคมตัดของดาบนี้ ได้แก่ การแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดหลังเจียรระโนทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกันและอัตราการตัด บันทึกผลการทดลองที่ได้นำมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Minitab R14 เข้ามาช่วย เพื่อลดเวลาในการวิเคราะห์ผลการทดลองตั้งแต่หัวข้อที่ 4.1 จนถึง 4.2 เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย และระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ผลตอบสนองที่สนใจศึกษาค่าที่ดีที่สุด และส่วนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งมีดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นต้น

โดยทั่วไปอัตราการตัด (CR) จริงจะแปรผันตรงกับความเร็วจัด (FR-A) ปรับค่าได้ อัตราการตัดจะมีความหนาวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงเป็นเหตุผลที่ว่าระดับความเร็วจัดค่าหนึ่งเมื่อใช้ตัดวัสดุที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการตัดลดลง (ดูหัวข้อที่ 2.8) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีและจุดหลอมละลายของวัสดุ [15] การทดลองขั้นต้นให้ FR-A เป็นปัจจัยตัวแทนของชุดค่าระดับปัจจัยภายใน (ดูตารางที่ ก.1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์ระหว่าง FR-A กับขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็ก (mC) และได้ข้ามการแสดงผลการวิเคราะห์ในส่วนของอัตราการตัดไป การวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจะใช้หลักของการทดลองสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design; CRD) หรือว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดลองขั้นต้นของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด

การทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ความเร็วตัด (FR-A; Notch)	-3	0	+3*	-3	0	+3*	-3	0*	+3*
การแตกบิ่นขนาดเล็ก (mC; μm)	23	14	9	25	17	8	28	16	10

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ "*" หมายถึงการตัดไม่เสถียร คือ มีเส้นลาวติเล็กโทรดขนาดอย่างน้อยหนึ่งครั้ง

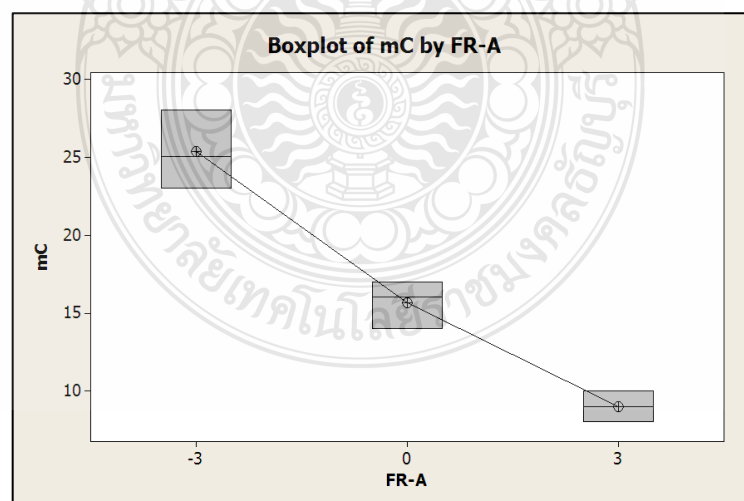
ความเร็วตัดในงานเครื่องมือกล หมายถึง ระยะเดินตัดต่อเวลา ในที่นี้ระบุหน่วยไว้เป็นระดับ (Notch) ตารางที่ 4.1 เป็นผลการทดลองขั้นต้นซึ่งเกิดจากการปรับระดับความเร็วตัด (FR-A) 3 ระดับ คือ -3, 0, และ +3 Notch โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ ในกระบวนการตัด Wire EDM เป็นสภาวะการทำงานในปัจจุบันทั้งหมด จากนั้นทำการทดลองแบบสุ่มอย่างต่อเนื่องซ้ำ 3 ครั้ง ค่าปัจจัยดังกล่าว แสดงไว้ในตารางค่าไฟมาตรฐาน ดังรูปที่ ก.5 และอธิบายความหมายของแต่ละปัจจัย ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ One-Way ANOVA ของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด

Source	d.f	SS	MS	F ₀	P
FR-A	2	404.67	202.33	62.79	0.000
Error	6	19.33	3.22		
Total	8	424.00			

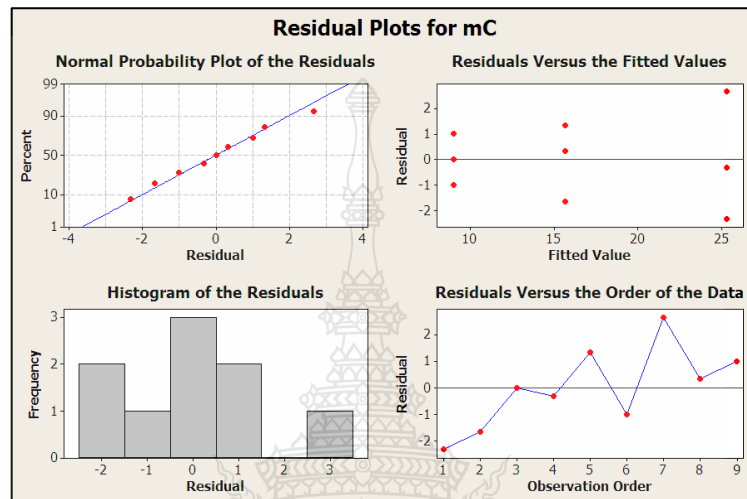
S = 1.795 R-Sq = 95.44% R-Sq(adj) = 93.92%

จากตารางที่ 4.2 พิจารณาค่า P-value ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการพิจารณาอิทธิพลของความเร็วตัด (FR-A) มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าความเร็วตัดมีอิทธิพลต่อขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ และพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) พบว่าค่า R^2 (adj) เท่ากับ 93.92% ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ 70% หมายความว่าผลการทดสอบขั้นต้นมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.1 กราฟแผนภาพกล่องแสดงการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด

ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับความเร็วตัดจากแผนภาพกล่อง ดังรูปที่ 4.1 สรุปเบื้องต้นได้ว่าการแตกบิ่นขนาดเล็กลดลงเมื่อระดับของความเร็วตัดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการกระจายในส่วนตกค้าง (Residuals) ของข้อมูล จากรูปที่ 4.2 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมีความเป็นอิสระ (Independent) ไม่สามารถทำนายรูปแบบที่แน่นอนได้



รูปที่ 4.2 กราฟวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการแตกบิ่นขนาดเล็กกรณีความเร็วตัด

ผลจากการวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นต้นพบว่า ความเร็วตัดมีความสัมพันธ์กับขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็กในลักษณะผกผันกัน ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้ตัดสินใจกำหนดปัจจัยควบคุมหลัก ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 สำหรับใช้ในการออกแบบการทดลอง Orthogonal array $L_{27}(3^3)$ ในงานวิจัยฉบับนี้

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

4.2.1 อัตราการตัด (Cutting rate; CR)

อัตราการตัด หมายถึงขนาดของพื้นที่ตัดที่ลวดเดินตัดเซาะเข้าไปยังเนื้อวัสดุต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในที่นี้ขนาดของพื้นที่มีค่าคงที่เท่ากับ 160 mm^2 เวลาตัดได้จากการจับเวลาตัดจริงด้วยนาฬิกาจับเวลา จากนั้นคำนวณหาอัตราการตัดตามสมการที่ 2.2 โดยใช้ข้อมูลเวลาในตารางที่ ข.2 อัตราการตัดมีหน่วยเป็น mm^2/min เช่น

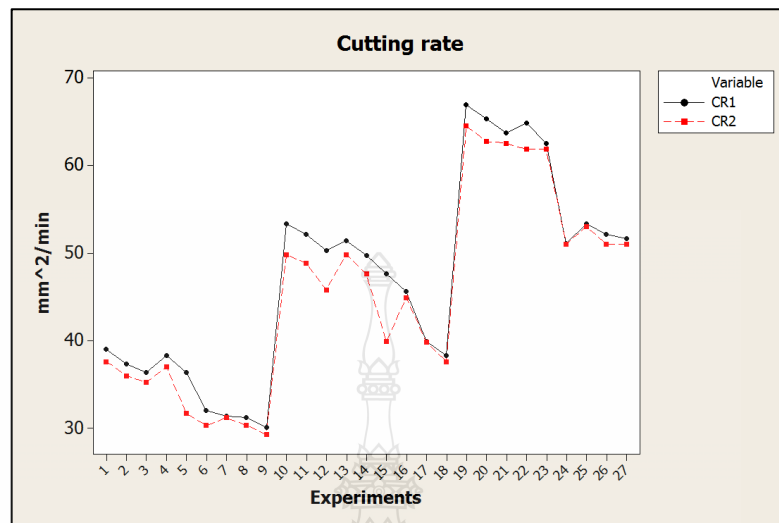
$$\text{การทดลองที่ } i = 1; \quad \text{CR}_i = \frac{A_c}{t_i} = \text{CR}_1 = \frac{160}{4.1} = 39.0$$

และอัตราการตัดของแต่ละการทดลองก็ใช้วิธีคำนวณดังกล่าวอย่างแบบนี้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยควบคุมและอัตราการตัด

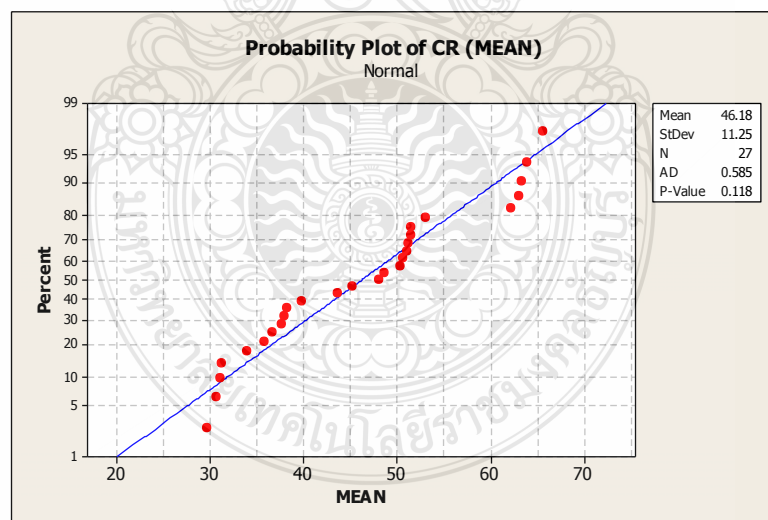
การทดลอง	ปัจจัยควบคุม			อัตราการตัด (mm ² /min)		
	I _p (A)	T _{OFF} (μs)	V _G (V)	CR1	CR2	CR-Mean
1	5	6	37	39.0	37.6	38.3
2	5	6	40	37.3	36.0	36.7
3	5	6	43	36.4	35.2	35.8
4	5	9	37	38.3	37.0	37.6
5	5	9	40	36.4	31.7	34.0
6	5	9	43	32.0	30.3	31.2
7	5	12	37	31.4	31.2	31.3
8	5	12	40	31.2	30.3	30.7
9	5	12	43	30.1	29.3	29.7
10	7	6	37	53.3	49.8	51.6
11	7	6	40	52.1	48.8	50.4
12	7	6	43	50.3	45.8	48.1
13	7	9	37	51.4	49.8	50.6
14	7	9	40	49.7	47.6	48.7
15	7	9	43	47.6	39.9	43.8
16	7	12	37	45.6	44.9	45.3
17	7	12	40	39.9	39.8	39.9
18	7	12	43	38.3	37.6	38.0
19	9	6	37	66.9	64.5	65.7
20	9	6	40	65.3	62.7	64.0
21	9	6	43	63.7	62.5	63.1
22	9	9	37	64.8	61.8	63.3
23	9	9	40	62.5	61.8	62.1
24	9	9	43	51.1	51.0	51.0
25	9	12	37	53.3	53.0	53.2
26	9	12	40	52.1	51.0	51.5
27	9	12	43	51.6	51.0	51.3

เมื่อนำอัตราการตัดที่ได้จากการทดลองอย่างต่อเนื่องแบบสุ่ม ของทั้ง 2 ชุด มาพล็อตกราฟ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟข้อมูลในการทดลองของอัตราการตัด

4.2.1.1 วิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล (Normality Test)



รูปที่ 4.4 กราฟการแจกแจงแบบปกติของอัตราการตัดเฉลี่ย

ตรวจสอบการกระจายตัว (Normality test) ของแบบจำลองนี้ คือ อัตราตัดเฉลี่ย โดยพิจารณาจากกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) โดยทั่วไปค่า P-Value > 0.05 จากการ

ตรวจสอบพบว่าการกระจายตัวของข้อมูลที่มีลักษณะเรียงตัวกันใกล้เคียงกับเส้นตรง และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.118 ซึ่งมากกว่า 0.05 ดังรูปที่ 4.4 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และมีความเป็นอิสระ

4.2.1.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

ค่า R^2 ทั่วไปจะมีเกณฑ์ประเมินอยู่ที่ 70% ขึ้นไป และจากการทดลองพบว่าค่า $R^2 = 98.1\%$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 70% แสดงว่าปัจจัยการทดลองมีผลกระทบต่ออัตราการผลิต และ $R^2(\text{Adj}) = 97.6\%$ แสดงว่าจำนวนข้อมูลเพียงพอและมีความน่าเชื่อถือสูง จึงตัดสินใจทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

Estimated Model Coefficients for S/N-Ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	33.0246	0.06457	511.474	0.000
IP 5	-2.4602	0.09131	-26.942	0.000
IP 7	0.2105	0.09131	2.305	0.032
T-OFF 6	0.7925	0.09131	8.679	0.000
T-OFF 9	0.1459	0.09131	1.598	0.126
VG 37	0.4621	0.09131	5.061	0.000
VG 40	0.0453	0.09131	0.496	0.625

S = 0.3355 R-Sq = 98.1% R-Sq(adj) = 97.6%

4.2.1.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความแปรปรวน (F_0) และหาอัตราส่วนของการมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด (Percentage Contribution; $\% \rho$)

ตารางที่ 4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) S/N-Ratios ของอัตราการผลิตเฉลี่ย

Source	DF	SS	MS	F_0	$\% \rho$
I_p	2	100.421	50.2105	446.07	83.20
T_{OFF}	2	13.769	6.8845	61.16	11.41
V_G	2	4.258	2.1289	18.91	3.53
Error	20	2.251	0.1126		
Total	26	120.699			

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยใดๆ ที่มีต่ออัตราการตัด โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความแปรปรวน (F-ratios) ของปัจจัย F_r ในการทดลองเทียบกับค่าสถิติ $F_{0.05,2,26}$ อ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเปิดได้จากตารางการแจกแจง F-Distribution ดังรูปที่ ก.10 มีค่าเท่ากับ 3.37 ดังนั้นผลลัพธ์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ S/N-Ratios กรณีของอัตราการตัด มีดังนี้คือ

ค่าทดสอบ F_{IP} ของปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซซาร์จเท่ากับ 446.07 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่ากระแสไฟฟ้าคิซซาร์จมีอิทธิพลต่ออัตราการตัดอย่างมีนัยสำคัญชัดเจนอย่างมาก และมีอัตราส่วนอิทธิพลของปัจจัย ρ_{IP} เท่ากับ 83.20% ถือว่าเป็นอันดับหนึ่งของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

ค่าทดสอบ F_{T-OFF} ของปัจจัยเวลาปิดเท่ากับ 61.16 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่าเวลาปิดมีอิทธิพลต่ออัตราการตัดอย่างมีนัยสำคัญอย่างชัดเจน และมีอัตราส่วนอิทธิพลของปัจจัย ρ_{T-OFF} เท่ากับ 11.41% ถือว่าเป็นอันดับสองของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

ค่าทดสอบ F_{VG} ของปัจจัยแรงดันไฟฟ้าแก๊ปคิซซาร์จเท่ากับ 18.91 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าแก๊ปคิซซาร์จมีอิทธิพลต่ออัตราการตัดอย่างมีนัยสำคัญ และมีอัตราส่วนอิทธิพล ρ_{VG} เท่ากับ 3.53% ถือว่าเป็นอันดับสามของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

4.2.1.4 หาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N-Ratios)

นำค่าอัตราการตัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ชุด ในตารางที่ 4.3 นำมาคำนวณหาค่า S/N-Ratios ซึ่งเป็นรูปแบบ Larger-is-better หมายถึง ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่มากที่สุดจะให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด จากสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

แทนค่าในสมการ เพื่อคำนวณหาค่า S/N Ratios

$$\begin{aligned} S/N_L &= -10 \log \left[\frac{1/(39.0^2) + 1/(37.6^2)}{2} \right] \\ &= 31.6596 \text{ dB} \end{aligned}$$

และในการคำนวณหา S/N Ratios ค่าอื่นๆ ก็ใช้วิธีการคำนวณแบบนี้เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปัจจัยความคุมและ S/N - Ratios ของอัตราการผลิตเฉลี่ย

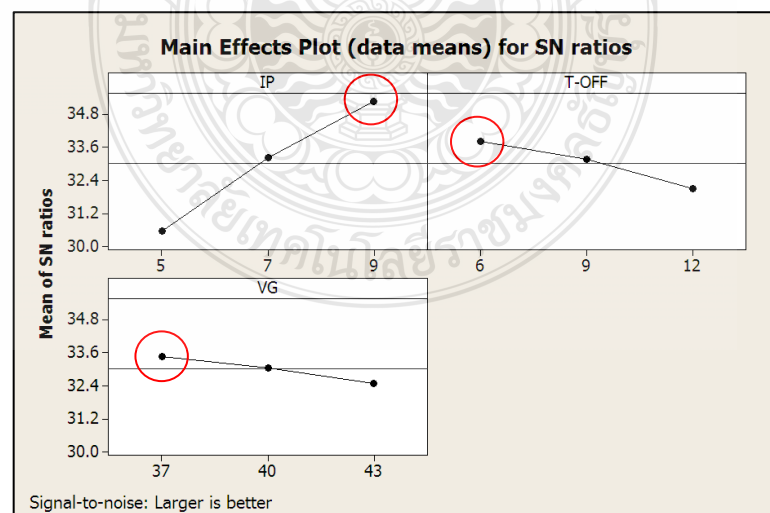
Treatment	Factors			(S/N-Ratios) dB
	I_p (A)	T_{OFF} (μ s)	V_G (V)	
1	5	6	37	31.6596
2	5	6	40	31.2774
3	5	6	43	31.0740
4	5	9	37	31.5114
5	5	9	40	30.5802
6	5	9	43	29.8595
7	5	12	37	29.9108
8	5	12	40	29.7541
9	5	12	43	29.4528
10	7	6	37	34.2296
11	7	6	40	34.0433
12	7	6	43	33.6053
13	7	9	37	34.0798
14	7	9	40	33.7356
15	7	9	43	32.7185
16	7	12	37	33.1116
17	7	12	40	32.0085
18	7	12	43	31.5831
19	9	6	37	36.3470
20	9	6	40	36.1182
21	9	6	43	35.9994
22	9	9	37	36.0208
23	9	9	40	35.8684
24	9	9	43	34.1599
25	9	12	37	34.5100
26	9	12	40	34.2431
27	9	12	43	34.2019

วิเคราะห์ค่าผลต่างค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย ($\Delta : \overline{S/N}$) เพื่อจัดอันดับ (Rank) จากมากไปหาน้อย โดยพิจารณาปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ที่มากที่สุดก่อน จากนั้นพิจารณาปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ถัดมาด้วยหลักการ “One-half rule of thumb” ซึ่งเป็นวิธีการคัดปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ น้อยกว่าไม่ถึงครึ่งหนึ่งของค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ก่อนหน้านี้ออกไป แล้วกำหนดให้ค่าผลต่างของอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยที่มากที่สุด {Max} $\Delta : \overline{S/N}$ เป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดมากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ผลต่าง S/N - Ratios เฉลี่ยของอัตราการตัดเฉลี่ย

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย ของ CR (dB)			ผลต่าง (Max - Min)	ลำดับ
	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3		
I_p	30.56	33.24	35.27	4.71	1
T_{OFF}	33.82	33.17	32.09	1.73	2
V_G	33.49	33.07	32.52	0.97	3

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยมากที่สุดคือกระแสไฟฟ้าดิซซาร์จมีค่าเท่ากับ 4.71 ถัดลงมา คือ เวลาปิดมีค่าเท่ากับ 1.73 และแรงดันไฟฟ้าเก็บดิซซาร์จมีค่าเท่ากับ 0.97 ตามลำดับ หากพิจารณาตามหลัก “One-half rule of thumb” แล้ว พบว่ากระแสไฟฟ้าดิซซาร์จเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่ออัตราการตัดมากที่สุด และสามารถบ่งชี้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการตัดมากที่สุดด้วยวิธีพล็อตกราฟดังนี้



รูปที่ 4.5 กราฟ S/N-Ratios ของอัตราการตัดเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.5 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Optimal factors) สำหรับการตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ ชนิด WC-12%Co ด้วยวิธี Wire EDM ที่ให้อัตราการตัดมากที่สุดตามวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 9 Amp, เวลาปิด 6 μ s และแรงดันไฟฟ้าแก๊ปดิสชาร์จ 37 Volt เนื่องจาก กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ เป็นปัจจัยหลักที่สร้างพลังงานความร้อนในการตัดให้แก่กระบวนการ Wire EDM พลังงานความร้อนที่สูงที่เกิดจากปัจจัยกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ทำให้อนุภาคของโลหะซึ่งเป็น ส่วนผสมของวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ละลายตัวออกมาได้เร็ว ดังนั้นจึงมีอัตราการตัดสูงขึ้นนั่นเอง แต่อยู่ที่ ระดับกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่สูงมากเกินไป ย่อมจะทำให้กระบวนการตัดมีความไม่เสถียรเกิดขึ้นได้

4.2.1.5 การทดลองยืนยันผลอัตราการตัด

เมื่อทราบค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ให้คำนวณหาค่าพยากรณ์ของอัตราการตัดที่ดีที่สุดตาม สมการที่ 3.39 ในที่นี้ใช้โปรแกรม Minitab R14 ประมวลผลได้อัตราการตัดที่ $64.9 \text{ mm}^2/\text{min}$ และเมื่อนำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมชุดดังกล่าวมาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ซึ่งได้อัตราการตัดที่ $65.2 \text{ mm}^2/\text{min}$ ซึ่งถือว่ามีความถูกต้อง และใกล้เคียงกัน คิดเป็นความผิดพลาดที่ 0.46 %

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการตัด

ผลตอบสนอง	ปัจจัยดั้งเดิม ($I_p 7, T_{OFF} 9, V_G 40$)	ปัจจัยที่ดีที่สุด		ค่าผิดพลาด (%)
		ค่าคาดการณ์	ค่ายืนยันผล	
การแตกบิ่นขนาดเล็ก	50.5	64.9	65.2	0.46

4.2.2 การแตกบิ่นขนาดเล็ก (Micro chipping; mC)

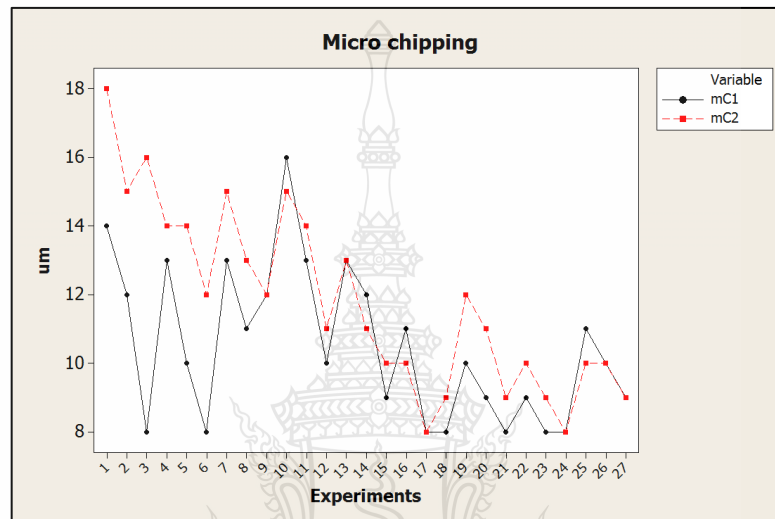
การแตกบิ่นขนาดเล็ก หมายถึงการกะเทาะหลุดออกไปของเนื้อโลหะบริเวณขอบคมตัด หลัง การเจียรระโนทดสอบในสภาวะเงื่อนไขเดียวกัน และทำการตรวจวัดขนาดของการแตกบิ่นที่มากที่สุด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบวัดขนาด (Measure microscope; MM) กำลังขยาย 50 เท่า และมีหน่วยเป็น ไมโครเมตร คู่มือการตรวจวัดขนาดการแตกบิ่นในหัวข้อที่ 3.4.2 และ 3.6 และรูปถ่ายในตารางที่ ข.3

ตารางที่ 4.8 ปัจจัยควบคุมและการแตกบิ่นขนาดเล็ก

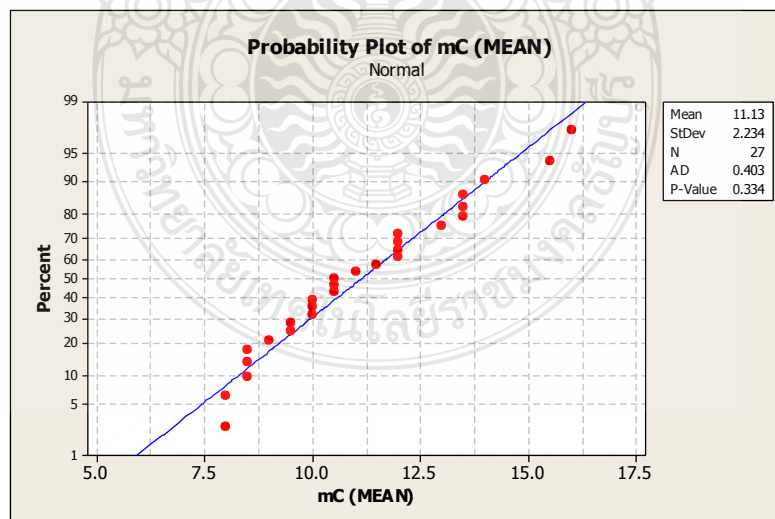
การทดลอง	ปัจจัยควบคุม			การแตกบิ่น (μm)		
	I_p (A)	T_{OFF} (μs)	V_G (V)	mC1	mC2	mC-Mean
1	5	6	37	14.0	18.0	16.0
2	5	6	40	12.0	15.0	13.5
3	5	6	43	8.0	16.0	12.0
4	5	9	37	13.0	14.0	13.5
5	5	9	40	10.0	14.0	12.0
6	5	9	43	8.0	12.0	10.0
7	5	12	37	13.0	15.0	14.0
8	5	12	40	11.0	13.0	12.0
9	5	12	43	12.0	12.0	12.0
10	7	6	37	16.0	15.0	15.5
11	7	6	40	13.0	14.0	13.5
12	7	6	43	10.0	11.0	10.5
13	7	9	37	13.0	13.0	13.0
14	7	9	40	12.0	11.0	11.5
15	7	9	43	9.0	10.0	9.5
16	7	12	37	11.0	10.0	10.5
17	7	12	40	8.0	8.0	8.0
18	7	12	43	8.0	9.0	8.5
19	9	6	37	10.0	12.0	11.0
20	9	6	40	9.0	11.0	10.0
21	9	6	43	8.0	9.0	8.5
22	9	9	37	9.0	10.0	9.5
23	9	9	40	8.0	9.0	8.5
23	9	9	40	8.0	9.0	8.5
24	9	9	43	8.0	8.0	8.0
25	9	12	37	11.0	10.0	10.5
26	9	12	40	10.0	10.0	10.0
27	9	12	43	9.0	9.0	9.0

4.2.2.1 วิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูล (Normality Test)

ตรวจสอบการกระจายตัว (Normality test) ของแบบจำลองนี้ คือ การแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย โดยพิจารณาจากกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) โดยทั่วไปค่า P-Value > 0.05 และพบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลที่มีลักษณะเรียงตัวกันใกล้เคียงกับเส้นตรง มีค่า P-value เท่ากับ 0.334 ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และมีความเป็นอิสระ



รูปที่ 4.6 กราฟข้อมูลในการทดลองของการแตกบิ่นขนาดเล็ก



รูปที่ 4.7 กราฟการแจกแจงแบบปกติของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย

4.2.2.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

ค่า R^2 ทั่วไปจะมีเกณฑ์ประเมินอยู่ที่ 70% ขึ้นไป และจากการทดลองพบว่าค่า $R^2 = 80.7\%$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 70% แสดงว่าปัจจัยการทดลองมีผลกระทบต่อค่าการแตกบิ่นขนาดเล็ก และ $R^2(\text{Adj}) = 74.9\%$ แสดงว่าจำนวนข้อมูลเพียงพอและมีความน่าเชื่อถือ จึงตัดสินใจทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

Estimated Model Coefficients for S/N-Ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-20.8060	0.1674	-124.294	0.000
IP 5	-1.3583	0.2367	-5.738	0.000
IP 7	0.0256	0.2367	0.108	0.915
T-OFF 6	-0.8849	0.2367	-3.738	0.001
T-OFF 9	0.3855	0.2367	1.628	0.119
VG 37	-1.0934	0.2367	-4.619	0.000
VG 40	0.0816	0.2367	0.345	0.734

S = 0.8698 R-Sq = 80.7% R-Sq(adj) = 74.9%

4.2.2.3 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองโดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความแปรปรวน (F_0) และหาอัตราส่วนของการมีอิทธิพลของแต่ละปัจจัยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด (Percentage Contribution; $\% \rho$)

ตารางที่ 4.9 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) S/N-Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย

Source	DF	SS	MS	F_0	$\% \rho$
I_p	2	32.59	16.2966	21.54	41.57
T_{OFF}	2	10.63	5.3151	7.03	13.56
V_G	2	20.03	10.0155	13.24	25.55
Error	20	15.13	0.7566		
Total	26	78.39			

จากตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยใดๆ ที่มีต่อการแตกบิ่นขนาดเล็ก โดยพิจารณาจากค่าอัตราส่วนความแปรปรวน (F-ratios) ของปัจจัย F_{ir} ในการทดลองเทียบกับค่าสถิติ $F_{0.05,2,26}$ อ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเปิดได้จากตารางการแจกแจง F-Distribution ดังรูปที่ ก.10 และมีค่าเท่ากับ 3.37 ดังนั้นผลลัพธ์จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีของการแตกบิ่นขนาดเล็ก มีดังนี้คือ

ค่าทดสอบ F_{IP} ของปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซซาร์จเท่ากับ 21.54 ซึ่งมีความมากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่ากระแสไฟฟ้าคิซซาร์จมีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญชัดเจนอย่างมาก และมีอัตราส่วนอิทธิพลของปัจจัย ρ_{IP} เท่ากับ 41.57% ถือว่าเป็นอันดับหนึ่งของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

ค่าทดสอบ F_{VG} ของปัจจัยแรงดันไฟฟ้าแก๊ปคิซซาร์จเท่ากับ 13.24 ซึ่งมีความมากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าแก๊ปคิซซาร์จมีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญอย่างชัดเจน และมีอัตราส่วนอิทธิพลของปัจจัย ρ_{VG} เท่ากับ 25.55% ถือว่าเป็นอันดับสองของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

ค่าทดสอบ F_{T-OFF} ของปัจจัยเวลาปิดเท่ากับ 7.03 ซึ่งมีความมากกว่าค่า $F_{0.05,2,26}$ หมายความว่าเวลาปิดมีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญ และมีอัตราส่วนอิทธิพลของปัจจัย ρ_{T-OFF} เท่ากับ 13.56% ถือว่าเป็นอันดับสามของอิทธิพลจากปัจจัยทั้งหมด

4.2.2.4 หาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N-Ratios)

นำค่าการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ชุด ในตารางที่ 4.8 นำมาคำนวณหาค่า S/N-Ratios ซึ่งเป็นรูปแบบ Smaller-is-better หมายถึง ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนน้อยสุดให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด จากสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$S / N_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

แทนค่าในสมการ เพื่อคำนวณหาค่า S/N Ratios

$$\begin{aligned} S / N_s &= -10 \log \left[\frac{(14^2) + (18^2)}{2} \right] \\ &= -24.1497 \text{ dB} \end{aligned}$$

และในการคำนวณหา S/N Ratios ค่าอื่นๆ ก็ใช้วิธีการคำนวณแบบนี้เช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ปัจจัยควบคุมและ S/N - Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉื่อย

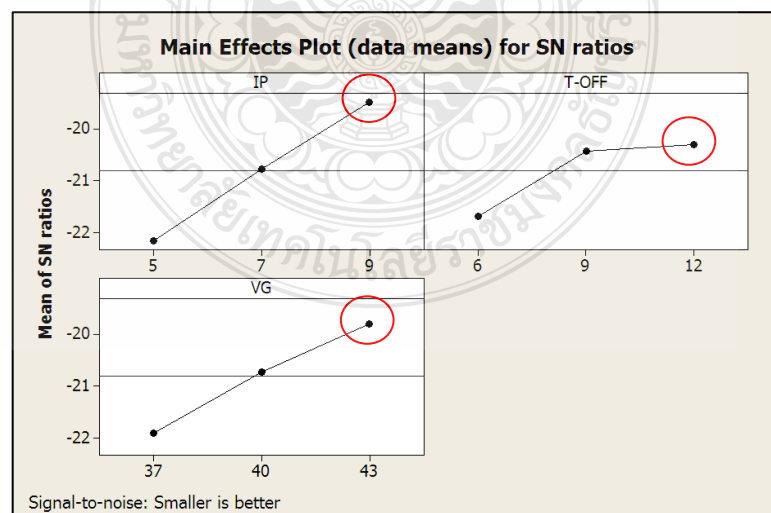
Treatment	Factors			(S/N-Ratios) dB
	I_p (A)	T_{OFF} (μ s)	V_G (V)	
1	5	6	37	-24.1497
2	5	6	40	-22.6600
3	5	6	43	-22.0412
4	5	9	37	-22.6126
5	5	9	40	-21.7026
6	5	9	43	-20.1703
7	5	12	37	-22.9447
8	5	12	40	-21.6137
9	5	12	43	-21.5836
10	7	6	37	-23.8112
11	7	6	40	-22.6126
12	7	6	43	-20.4336
13	7	9	37	-22.2789
14	7	9	40	-21.2222
15	7	9	43	-19.5665
16	7	12	37	-20.4336
17	7	12	40	-18.0618
18	7	12	43	-18.6034
19	9	6	37	-20.8636
20	9	6	40	-20.0432
21	9	6	43	-18.6034
22	9	9	37	-19.5665
23	9	9	40	-18.6034
24	9	9	43	-18.0618
25	9	12	37	-20.4336
26	9	12	40	-20.0000
27	9	12	43	-19.0849

วิเคราะห์ค่าผลต่างค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ย ($\Delta : \overline{S/N}$) เพื่อจัดอันดับ (Rank) จากมากไปหาน้อย โดยพิจารณาปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ที่มากที่สุดก่อน จากนั้นพิจารณาปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ถัดมาด้วยหลักการ “One-half rule of thumb” ซึ่งเป็นวิธีการคัดปัจจัยที่มีค่า $\Delta : \overline{S/N}$ น้อยกว่าไม่ถึงครึ่งหนึ่งของค่า $\Delta : \overline{S/N}$ ก่อนหน้านี้ออกไป และให้ค่าผลต่างของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยที่มากที่สุด {Max} $\Delta : \overline{S/N}$ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กมากที่สุด

ตารางที่ 4.11 ผลต่าง S/N-Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย ของ mC			ผลต่าง (Max - Min)	ลำดับ
	1	2	3		
I_p	-22.16	-20.78	-19.47	2.69	1
V_G	-21.90	-20.72	-19.79	2.11	2
T_{OFF}	-21.69	-20.42	-20.31	1.38	3

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าดิซซาร์จมีค่าเท่ากับ 2.69 ถัดลงมา คือ แรงดันไฟฟ้าเก็บดิซซาร์จมีค่าเท่ากับ 2.11 และ เวลาปิดมีค่าเท่ากับ 1.73 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามหลัก “One-half rule of thumb” แล้ว พบว่าทั้งสามปัจจัยมีผลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็ก โดยกระแสไฟฟ้าดิซซาร์จมีผลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กมากที่สุด และบ่งชี้ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กน้อยที่สุดด้วยวิธีพล็อตกราฟ



รูปที่ 4.8 กราฟ S/N-Ratios ของการแตกบิ่นขนาดเล็กเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.8 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม (Optimal factors) สำหรับการตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ด้วยวิธี Wire EDM ที่ให้ขนาดของการแตกบิ่นน้อยที่สุดตามวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ คือกระแสไฟฟ้าคิซาร์จ 9 Amp, แรงดันไฟฟ้าเก็บคิซาร์จ 43 Volt และเวลาปิด 12 μ s

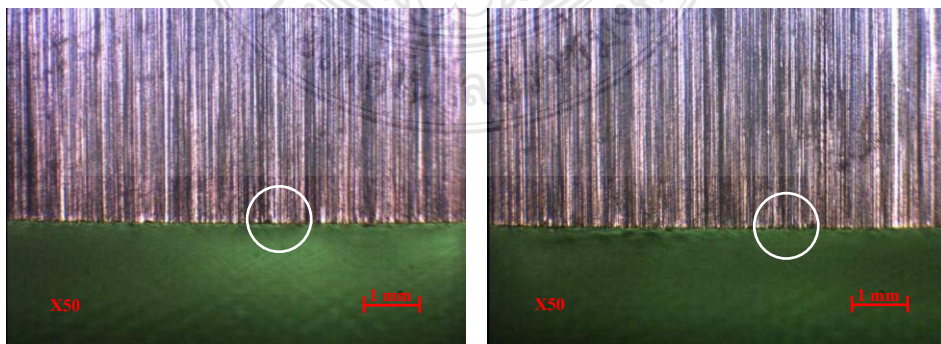
สังเกตว่านอกจากกระแสไฟฟ้าคิซาร์จจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบโดยตรงกับอัตราการตัดดังสรุปในหัวข้อที่ 4.2.1 แล้ว ยังพบว่ายังมีผลกระทบโดยตรงต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กด้วยเช่นกัน แสดงว่าค่าระดับปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซาร์จที่สูงจะให้อัตราการตัดที่สูง ซึ่งจะช่วยลดความลึกของผลกระทบทางความร้อนและทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กลดลง สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของผลการทดลองขึ้นต้นในหัวข้อที่ 4.1 ดังนั้นจึงสามารถที่จะใช้อธิบายความสัมพันธ์แบบผกผัน (Inverse Correlation) ระหว่างอัตราการตัด (หรือความเร็วตัด) กับการแตกบิ่นขนาดเล็กดังกล่าวในที่นี่ได้

4.2.2.5 การทดลองยืนยันผลการแตกบิ่นขนาดเล็ก

เมื่อทราบระดับปัจจัยที่เหมาะสม คำนวณหาค่าพยากรณ์ของการแตกบิ่นที่น้อยที่สุดตามสมการที่ 3. 39 ในที่นี้ใช้โปรแกรม Minitab R14 ประมวลผลได้การแตกบิ่นขนาดเล็กที่ 7.5 ไมครอน และเมื่อนำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมชุดดังกล่าวมาทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง ซึ่งได้การแตกบิ่นขนาดเล็กที่ 6.5 ไมครอน ถือว่ามีความถูกต้องและใกล้เคียงกัน คิดเป็นความผิดพลาดที่ 13.3 %

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบการแตกบิ่นขนาดเล็ก

ผลตอบสนอง	ปัจจัยดั้งเดิม		ปัจจัยที่ดีที่สุด		ค่าผิดพลาด (%)
	$(I_p 7, T_{OFF} 9, V_G 40)$		$(I_p 9, T_{OFF} 12, V_G 43)$		
	ค่าคาดการณ์	ค่ายืนยันผล			
การแตกบิ่นขนาดเล็ก	12	7.5	6.5		13.3



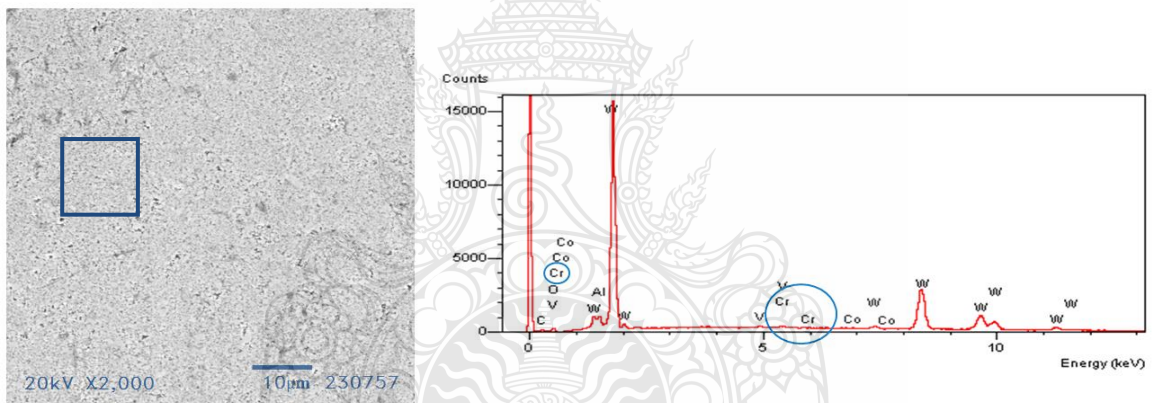
รูปที่ 4.9 ขอบคมตัดของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลองซ้ำยืนยันผล

4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเชิงตั้งกตการณ์

การตรวจสอบพื้นผิวหลังกระบวนการ EDM โดยทั่วไปมักจะนิยมถ่ายภาพกำลังการขยายสูง เพื่อช่วยอธิบายถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากกระบวนการ Wire EDM ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าระดับปัจจัย การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการกระจายของธาตุพลังงาน (EDS) จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้นำมาใช้ประกอบการพิจารณา เพื่อหาข้อสรุปผลลัพธ์จากการทดลองที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ดังนี้

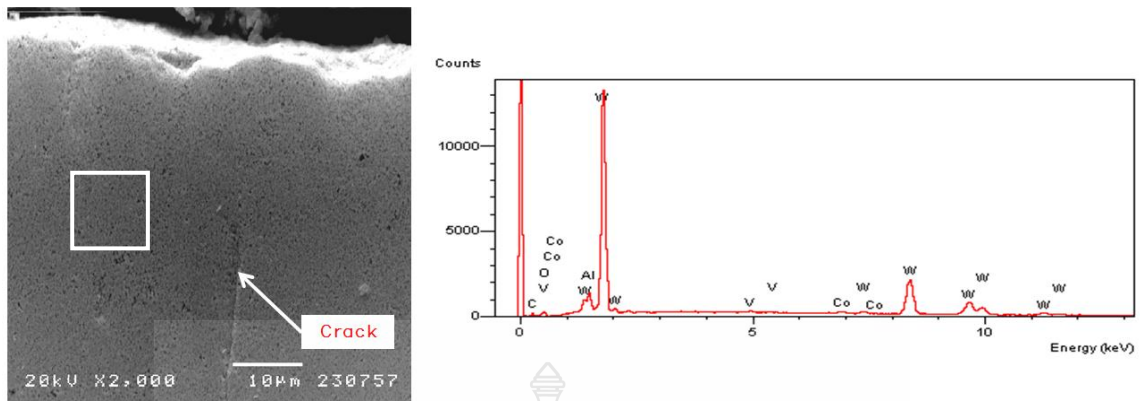
4.3.1 การวิเคราะห์ SEM บนพื้นผิวตัด กรณีอัตราการตัด

ก่อนการวิเคราะห์พื้นผิวตัดด้วยวิธี SEM ผู้ทำวิจัยได้ทำการตรวจสอบพื้นผิววัสดุใน 3 ลักษณะ ได้แก่ พื้นผิววัสดุพื้นฐาน (Base) ที่ไม่ผ่านการตัด Wire EDM สำหรับใช้อ้างอิง, พื้นผิวที่เกิดจากอัตราการตัดแบบดั้งเดิม (Initial) หรือในปัจจุบัน, และพื้นผิวที่เกิดจากการตัดด้วยอัตราการตัดที่ดีที่สุด (Optimal) ในการทดลองของงานวิจัยนี้ เพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดลอง



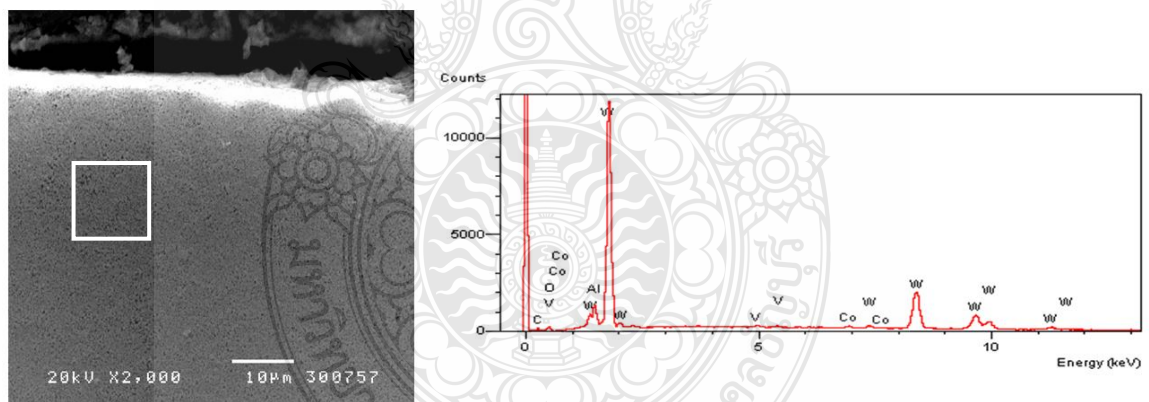
รูปที่ 4.10 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) ของพื้นผิววัสดุพื้นฐาน (Base)

ตรวจสอบ EDS บริเวณรอบสี่เหลี่ยมซึ่งถือเป็นพื้นผิวตัวแทนข้างคมตัดของดาบ (Die live) ที่เกิดจากการดิสชาร์จของชุดค่าปัจจัยควบคุมในการทดลองที่ออกแบบไว้ ไปยังพื้นผิวตัดที่สนใจศึกษา รูปที่ 4.10 เผยให้เห็นว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co นี้ มีธาตุผสมอื่นนอกเหนือไปจากทังสเทนและตัวประสานโคบอลต์ อาทิเช่น วานเดียม โครเมียม อะลูมิเนียม คาร์บอน และ ออกซิเจน



รูปที่ 4.11 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) พื้นผิวตัดด้วยอัตราการตัดแบบดั้งเดิม

จากรูปที่ 4.11 เป็นพื้นผิวที่เกิดจากอัตราการตัดด้วยปัจจัยแบบดั้งเดิม คือ $I_p=7$, $T_{OFF}=9$ และ $V_G=40$ พบว่ากระบวนการตัด Wire EDM ทำให้ธาตุบนพื้นผิวตัดมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม ส่วนการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro cracking) บางตำแหน่งบนพื้นผิวตัดอาจเกิดขึ้นจากการละลายตัวของโคบอลต์บริเวณนั้นสูง [1] เนื่องจากผลกระทบทางความร้อนของอัตราการตัดด้วยปัจจัยแบบดั้งเดิม



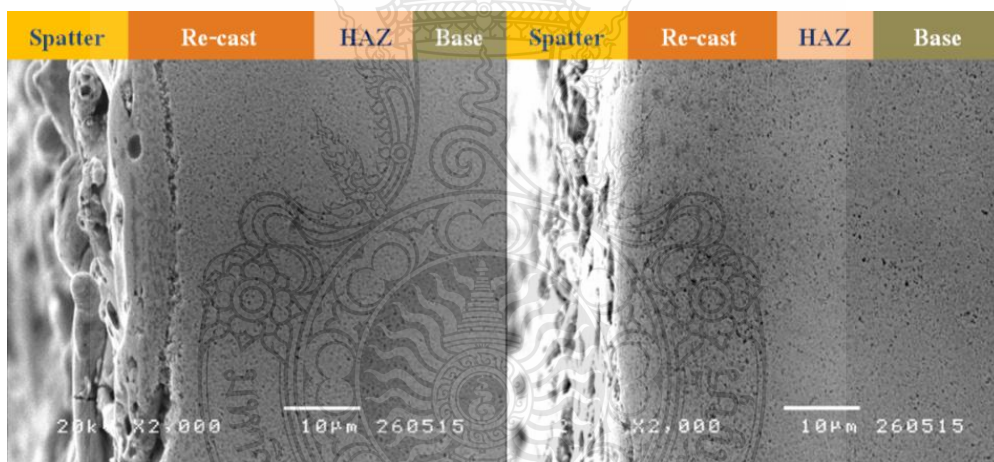
รูปที่ 4.12 SEM (ซ้าย) และ EDS (ขวา) พื้นผิวตัดด้วยอัตราการตัดที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.12 เป็นพื้นผิวที่เกิดจากอัตราการตัดที่ดีที่สุดจากปัจจัยในการทดลองของงานวิจัยนี้ คือ $I_p=9$, $T_{OFF}=6$ และ $V_G=37$ พบว่าธาตุทั้งสแตนบนพื้นผิวตัดด้วยวิธี Wire EDM นั้นลดลง แม้ว่าธาตุทั้งสแตนบนพื้นผิวที่เกิดจากอัตราการตัดที่ดีที่สุดจะลดลงน้อยกว่าพื้นผิวตัดที่เกิดจากอัตราการตัดแบบ

ดั้งเดิม แต่ทั้งสองกรณีถือได้ว่ากระบวนการตัดด้วยวิธี Wire EDM นั้นทำให้พื้นผิวตัดเสื่อมสภาพลงเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของวัสดุพื้น (ดูรูปที่ 4.14 ประกอบการพิจารณา)

4.3.2 การวิเคราะห์ SEM บนภาคตัดขวางการตัด กรณีการแตกบิ่นขนาดเล็ก

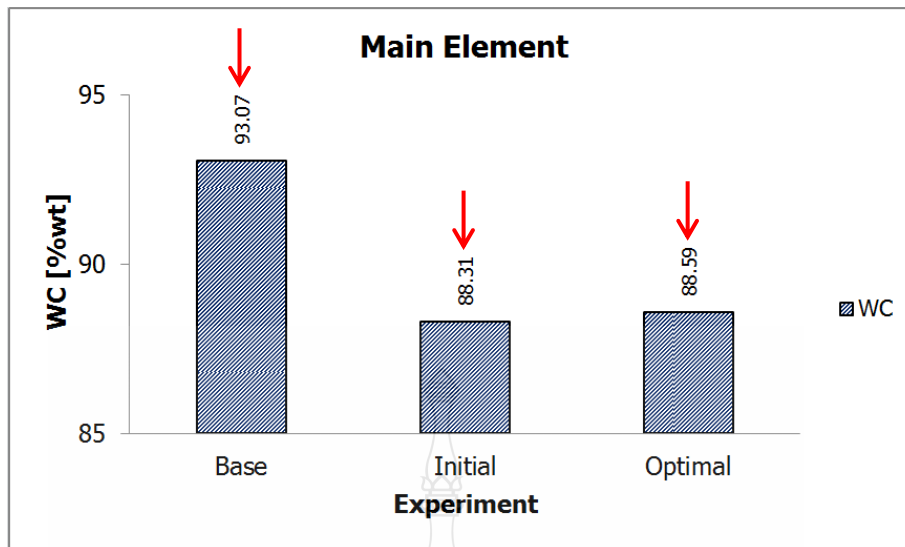
การพิจารณา SEM ภาคตัดขวาง (Cross cut section) กับแนวตัดมีส่วนสำคัญในการช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมของโลหะที่ได้รับแรงกระทำต่างๆ เช่น ทางกล, ความร้อน, และเคมี เป็นต้น นิยมนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ (Recast layer) เนื่องจากผลกระทบทางความร้อนจากกระบวนการ Wire EDM และรูปที่ 4.13 เผยให้เห็นว่าความกว้างของขอบเขตชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ที่เกิดจากการตัดด้วยระดับปัจจัยที่ดีที่สุดในการทดลอง (ขวา) นั้นแคบกว่าขอบเขตชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ที่เกิดจากการตัดด้วยปัจจัยดั้งเดิม (ซ้าย) แสดงว่าขอบเขตชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ที่แคบลงเป็นเพราะความลึกของความร้อนจากกระบวนการตัดซึ่งน้อยกว่าที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยปัจจัยแบบดั้งเดิมแม้จะเพียงเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าขอบเขตชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ที่แคบลงนั้น ทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กจากการทดสอบด้วยวิธีเงียระโนราบซึ่งเป็นแรงบดอัด ลดลงไปด้วย



รูปที่ 4.13 SEM ภาคตัดขวางที่เกิดจากปัจจัยดั้งเดิม (ซ้าย) และจากปัจจัยที่ดีที่สุด (ขวา)

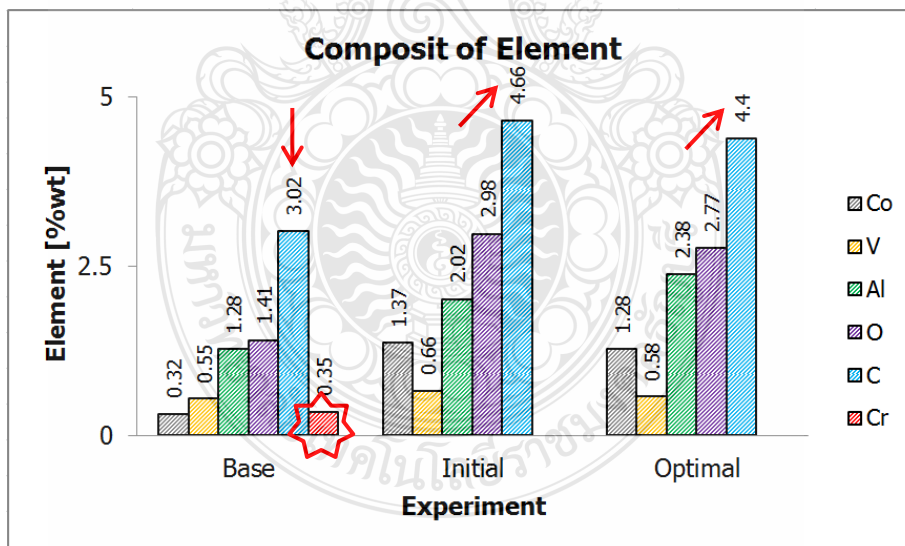
4.3.3 การวิเคราะห์การกระจายธาตุพลังงาน (EDS) บนพื้นผิวตัด

เนื่องจากสัดส่วนทั้งสแตนซึ่งเป็นธาตุผสมหลักของซีเมนต์คาร์ไบด์โดยทั่วไป ซึ่งสูงกว่าโคบอลต์และธาตุประกอบอื่นๆ โดยทั่วไปทั้งสแตนจะมีจุดหลอมละลายที่สูงกว่ามาก ผู้ทำวิจัยจึงได้แยกกราฟการนำเสนอผลการตรวจสอบการกระจายธาตุพลังงาน (EDS) ของธาตุประกอบเอาไว้ต่างหาก เพื่อความสะดวกในการอธิบาย ซึ่งจะได้แสดงในลำดับต่อไปดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 โดยลำดับดังนี้



รูปที่ 4.14 กราฟ EDS เปรียบเทียบธาตุทั้งสตนบนพื้นผิวตัด

จากรูปที่ 4.14 พบว่าสัดส่วนของทั้งสตนซึ่งเป็นธาตุหลักแสดงตัวบนพื้นผิวตัดน้อยกว่าพื้นผิววัสดุพื้นฐาน แสดงว่ากระบวนการตัด Wire EDM ทำให้พื้นผิวตัดวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์เสื่อมสภาพลง



รูปที่ 4.15 กราฟ EDS การเปรียบเทียบธาตุประกอบบนพื้นผิวตัด

จากรูปที่ 4.15 พบว่าธาตุประกอบบนพื้นผิวตัดแสดงตัวออกมามากกว่าพื้นผิววัสดุพื้นฐาน ย่อมหมายถึงว่าธาตุประกอบโดยส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในอัตราที่แตกต่างกันเนื่องจาก

ผลกระทบทางความร้อน กรณีของ โครเมียม (Cr) นั้นพบบนพื้นผิววัสดุพื้นฐานอยู่ประมาณ 0.35%wt ส่วนคาร์บอน (C) มีอยู่ประมาณ 0.32%wt โครเมียมเป็นธาตุที่สามารถรวมกับคาร์บอนกลายเป็น โครเมียมคาร์ไบด์ได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิตั้งนั้นสูงกว่า 510 – 788° องศาเซลเซียส และละลายเข้าไปใน เกรน ทำให้บริเวณใกล้ๆ กับขอบเกรนเหลือโครเมียมน้อย (ซึ่งในที่นี้จึงไม่ปรากฏโครเมียมให้เห็นอีก) พฤติกรรมดังกล่าวนี้ทำให้เกิดสภาวะการสูญเสียโครเมียมที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานแรงกระทำตามแนวขวางลดลง [25]



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 4 ของการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัด และการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดของดาบน์หลังเจียรไนทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกัน ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลกระทบและสามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด เมื่อประกอบกับผลพิสูจน์ทางโครงสร้างจุลภาค จึงสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ผลทดลองขั้นต้น

ในส่วนของการทดลองขั้นต้นเพื่อพิสูจน์ปัจจัยตัวแทนของชุดปัจจัยควบคุมภายในงานวิจัยนี้ คือ ความเร็วตัด (FR-A) ซึ่งออกแบบโดยผู้ผลิตเครื่องจักร ต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กบนคมตัดของดาบน์วัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-Way ANOVA) และพบว่าความเร็วตัดมีความสัมพันธ์ต่อขนาดการแตกบิ่นขนาดเล็ก สรุปเบื้องต้นได้ว่าอัตราการตัดจริงซึ่งมักจะแปรผันตามความเร็วตัดที่ปรับตั้งค่าได้มีความสัมพันธ์ในลักษณะผกผันกับขนาดของการแตกบิ่นขนาดเล็ก นั่นคือ อัตราการตัดสูงขึ้นจะทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดลดลง

5.2 สรุปผลการวิเคราะห์ผลทดลองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ในส่วนของการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยควบคุม และค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้ตารางการออกแบบการทดลองมาตรฐาน Orthogonal Array $L_{27}(3^3)$ ตามวิธีแบบทากูชิ ด้วยการวิเคราะห์อัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio; S/N) ในกรณี Larger-is-better สำหรับอัตราการตัด และกรณี Small-is-better สำหรับการแตกบิ่นขนาดเล็ก ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยและผลต่างค่าเฉลี่ย สามารถจัดอันดับอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบ จากนั้นบอกชื่อและบ่งชี้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากหลักเกณฑ์ที่ว่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนเฉลี่ยที่มากที่สุดเป็นปัจจัยที่ดีที่สุด ซึ่งจากการทดลองในส่วนของการตัด พบว่าปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ, เวลาปิด และแรงดันไฟฟ้าเก็บคิซซาร์จ มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ โดยกระแสไฟฟ้าคิซซาร์จที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตัดมากที่สุด ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการตัดมากที่สุดในงานวิจัยนี้คือ กระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ 9 Amp, เวลาปิด 6 μ s และแรงดันไฟฟ้าเก็บคิซซาร์จ 37 Volt และในส่วน

ของปัญหาการแตกบิ่นขนาด พบว่าปัจจัยกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ, แรงดันไฟฟ้าเก็บดิสชาร์จ และเวลาปิด มีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญตามลำดับ โดยกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่มีอิทธิพลต่อการแตกบิ่นขนาดเล็กมากที่สุดเป็นอันดับแรกด้วยเช่นกัน ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้การแตกบิ่นขนาดเล็กน้อยที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 9 Amp, แรงดันไฟฟ้าเก็บดิสชาร์จ 43 Volt และเวลาปิด 12 μ s

และเมื่อทราบระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์แล้ว ได้ทำการกำหนดปัจจัยดังกล่าวสำหรับทดลองซ้ำยืนยันผลเพื่อให้เกิดความมั่นคงของกระบวนการทดลอง และในการหาค่าพยากรณ์ (Prediction value) นั้นได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab R14 ช่วยในการประมวลผลผลลัพธ์ เพื่อเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองที่ต้องการที่เกิดจากระดับปัจจัยที่ดีที่สุดระหว่างค่าที่คำนวณ ได้กับค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำยืนยันผล และพบว่าอัตราการตัดที่ดีที่สุดจากการทดลองซ้ำยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 65.2 mm^2/min ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพยากรณ์คิดเป็นค่าผิดพลาด 0.46% การดำเนินงานทดลองมีการปรับปรุงที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากระดับปัจจัยแบบดั้งเดิม ซึ่งมีอัตราการตัดที่สูงกว่าอัตราการตัดที่เกิดจากปัจจัยแบบดั้งเดิม 14.7 mm^2/min ส่วนกรณีการแตกบิ่นขนาดเล็กที่ดีที่สุดจากการทดลองซ้ำยืนยันผลมีค่าเท่ากับ 6.5 ไมครอน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าพยากรณ์คิดเป็นค่าผิดพลาด 13.3% การดำเนินงานทดลองมีการปรับปรุงที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากระดับปัจจัยแบบดั้งเดิม ซึ่งมีขนาดของการแตกบิ่นขนาดเล็กซึ่งน้อยกว่าขนาดของการแตกบิ่นขนาดเล็กที่เกิดจากการตัดด้วยปัจจัยแบบดั้งเดิม 5.5 ไมครอน

5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวตัดพร้อมกับการกระจายธาตุพลังงาน (EDS) สำหรับกรณีอัตราการตัด และการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางแนวตัด สำหรับกรณีการแตกบิ่นขนาดเล็ก ซึ่งพฤติกรรมทางโครงสร้างจุลภาคเหล่านี้เกิดขึ้นจากระดับปัจจัยในการทดลองของกระบวนการตัดด้วยวิธี Wire EDM เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ โครงสร้างจุลภาคพื้นผิววัสดุพื้นฐาน (Base) และพื้นผิวที่เกิดจากปัจจัยการตัดแบบดั้งเดิม (Initial) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่า และผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพื้นผิววัสดุพื้นฐานพบว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์ WC-12%Co ชนิดดังกล่าวนี้ พบว่ามีธาตุผสมอื่นนอกเหนือไปจากทั้งสแตนเลสและโคบอลต์ เช่น วานาเดียม โครเมียม อะลูมิเนียม คาร์บอน และออกซิเจน กระบวนการตัดด้วยวิธี Wire EDM ทำให้พื้นผิวตัดเสื่อมสภาพลงกว่าพื้นผิววัสดุพื้นฐาน และเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานแรงกระแทกตามแนวขวาง (TRS) ลดลง

[25] อัตราการตัดที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ทำให้การเสื่อมสภาพพื้นผิวตัดลดลง และความกว้างชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ (Recast layer) แคบลง ซึ่งพฤติกรรมทั้งสองมีผลทำให้ปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กลดลง

5.4 ข้อเสนอแนะ

จากบทสรุปผลการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมาในกระแสไฟฟ้าคิซาร์จมีผลกระทบโดยตรงทั้งต่ออัตราการตัดและการแตกบิ่นขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการวิเคราะห์ SEM และ EDS แล้วสามารถที่จะอธิบายได้ว่าอิทธิพลของปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซาร์จนั้นมีผลต่ออัตราการตัดและการแตกบิ่นขนาดเล็ก โดยสรุปว่า อัตราการตัดที่สูงขึ้นเป็นเพราะปัจจัยกระแสไฟฟ้าคิซาร์จที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าการตัดจะเกิดปัญหาความไม่เสถียรตามมา แต่ทำให้ปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง กระบวนการตัดด้วยวิธี Wire EDM ทำให้พื้นผิวซีเมนต์คาร์ไบด์เสื่อมสภาพลงเนื่องจากความร้อน และในกรณีศึกษาซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ของงานวิจัยนี้ พบว่ามีกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เกิดขึ้นเนื่องจากพฤติกรรมของโครเมียมที่ผสมอยู่ในซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดนี้ เมื่อได้รับผลกระทบทางความร้อน และการพยายามตัดด้วยอัตราการตัดที่สูงขึ้นนั้น มีผลทำให้การเสื่อมสภาพของผิวตัดและความกว้างของชั้นผิวหล่อหลอมใหม่ลดลง ย่อมหมายความว่าพื้นผิวที่เกิดจากการตัดซึ่งเป็นผิวข้างคมตัดของดาบ สามารถรับแรงกระแทกตามแนวขวาง (TRS) ได้ดีขึ้นและมีความแข็งที่ผิวลดลงโดยลำดับแม้ว่าจะเพียงเล็กน้อยก็ตาม ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดในงานแม่พิมพ์ปั๊มตัดขึ้นรูปโลหะได้

ในทางปฏิบัตินั้นการตัดที่ไม่เสถียรหรือเส้นลวดอิเล็กโทรดขาดบ่อยครั้งจะทำให้ประสิทธิภาพของการปฏิบัติงาน Wire EDM โดยรวมลดลง แต่ไม่สำคัญเท่ากับคุณภาพของคมตัดขั้นสำเร็จที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเพิ่มค่าระดับปัจจัยเวลาปิดและแรงดันไฟฟ้าแก่ปิสตาร์จขึ้นเพื่อรักษาความเสถียรในขณะตัด แต่อาจจะยังไม่เพียงพอสำหรับงานวิจัยนี้ ปัญหาดังกล่าวนี้อาจเป็นการบ่งบอกถึงขีดจำกัดของการนำซีเมนต์คาร์ไบด์ WC-12%Co ชนิดนี้ ซึ่งมีธาตุโครเมียมและสัดส่วนของตัวประสานโคบอลต์ที่สูงมาตัดแปรรูปด้วยวิธี Wire EDM โดยเฉพาะกับการนำมาใช้ในงานผลิตชิ้นส่วนคมตัดแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูง แต่อย่างไรก็ดีคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงสูงและมีราคาที่ย่อมเยากว่าซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิดอื่น ยังมีความท้าทายที่ต้องการจะศึกษาเพื่อพัฒนาสู่การนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกในคราวต่อไป ดังนั้นข้อเสนอแนะที่อาจจะเป็นไปได้ของการศึกษาเพื่อปรับปรุงแก้ไขปัญหาการแตกบิ่นดังกล่าว มี 2 แนวทางต่อไปนี้คือ 1.) ส่วนของ Wire EDM คือ เพิ่มอัตราเร็วลวด (Wire speed) และเพิ่มอัตราการฉีดพ่นสารเหลวตัวกลาง (Flow balance rate) เพื่อชะล้างอนุภาคโลหะที่หลุดออกมาจากบริเวณหลอมละลายให้เร็วที่สุด 2.) ส่วนของกระบวนการเจียรไน คือ การสรรหาชนิดของล้อหินเจียร (Grinding wheel) และประเภทของการหล่อเย็น (Cooling condition) ที่เหมาะสม

บรรณานุกรม

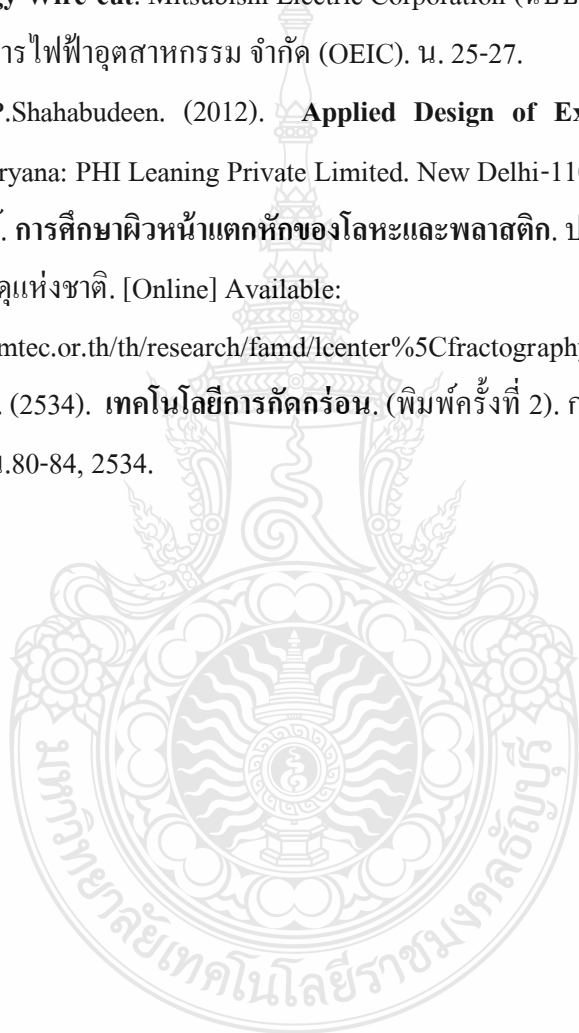
- [1] อำนาจ เหมือนจินดา. (2551). ความรู้ความเข้าใจในงาน Wire EDM. Mitsubishi Electric Automation (Thailand) Co. Ltd, (MEATH). น.1-38.
- [2] เทคโนโลยีการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า. (2553). [Online] Available:
<https://toolengineer.files.wordpress.com> เทคโนโลยีการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า
- [3] สุทัศน์ ทิพย์ปริกมาศ. (2554). เทคโนโลยีแม่พิมพ์ตัดความเที่ยงตรง. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. น. 283, 304-310 และ 421.
- [4] ชาญชัย ทรัพย์ากร, ประสิทธิ์ สวัสดิศรธรรม และวิรุฬ ประเสริฐวรนนท์. (2543). การออกแบบแม่พิมพ์. (พิมพ์ครั้งที่ 14) กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. น. 9-16.
- [5] อำนาจ แก้วสามัคคี. (2545). เทคนิคการซ่อมบำรุงออกแบบแก้ไขและการตัดเฉือนแม่พิมพ์. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. น.2-7.
- [6] วสวัชร นาคเขียว. กระบวนการกำจัดเศษด้วยวิธีการกัดสี: กระบวนการผลิต. ภาควิชาอุตสาหกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [7] Wire EDM Machining. (2554). [Online]: Available:
[https://toolengineer.files.wordpress.com/2011/01/Wire EDM Machining](https://toolengineer.files.wordpress.com/2011/01/Wire-EDM-Machining).
- [8] ศิริศักดิ์ ฤทธิงาม. (2544). การสร้างชิ้นส่วนแม่พิมพ์พลาสติกโดยใช้เครื่อง WIRE CUT EDM. สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน: กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. น.3.
- [9] คู่มือการฝึกอบรม P39T4G07 เครื่องจักรเฉพาะทางขั้นสูง CNC EDM, CNC Wire-cut. (2550). กรุงเทพฯ: โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ สถาบัน ไทย-เยอรมัน. น.103-108.
- [10] เทคโนโลยีเครื่องมือตัด. [Online] Available:
http://202.28.32.233/pics_upload/CUTTING%20TOOL%20TECHNOLOGY.pdf. น.11-13.
- [11] สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ และประสิทธิ์ แพงเพชร. (2555). พัฒนาโลหะมีค่าชนิดทังสเตนคาร์ไบด์ผ่านการใช้เซลล์หมุนเวียนมาใช้ใหม่เพื่อผลิตชิ้นส่วนลดความแข็งสูง. กรุงเทพฯ: วิศวกรรม การจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. น.34-35.
- [12] วาภูมิ เปรมานนท์ และอรจิรา เดี่ยววณิชย์. (2554). วัสดุทำแม่พิมพ์และชิ้นงาน: งานขึ้นรูปโลหะ. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. น.147-164.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] ขรรค์ชัย โนมิต. (2555). ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยวิธีดีเอ็ม ชนิดเส้นลวด. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. น.18-27.
- [14] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ที่อป. น. 283-289 และ 295-324.
- [15] Bert Lauwers, Weidong Liu, Wesley Eeraerts. (2006). **Influence of the composition of WC-based cermets on manufacturing by wire-EDM.** Journal of Manufacturing Process. pp. 83-89.
- [16] Chang-Ho Kim, Jean Pierre Kruth. (2001). **Influence of the Electrical Conductivity of Dielectric on WEDM of Sintered Carbide.** Dept. of Mechanical Engineering. Dong-Eui University: Pusan Korea. pp.1-6.
- [17] Jun Qu, Laura Riester, Albert J. Shih, Ronald O. Scattergood, Edgar Lera-Curzio, Thomas R. Watkins. (2003). **Nanoindentation characterization of surface layers of electrical discharge machined WC-Co.** Materials Science and Engineering A344. pp.125-131.
- [18] H. Jühr, H-P Schulze, Wollenberg, K. Künanz.(2004). **Improved cemented carbide properties after wire-EDM by pulse shaping.** Journal of Journal of Materials Processing Technology. pp.178-183.
- [19] Sanjiv Kumer, Jatinder Kumer. (2014). **Modeling and Experimental Investigation of Process Parameters in WEDM of WC-6%Co Composite using Response Surface Methodology.** Materials Science and International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 9 No.7. pp.791-800.
- [20] Pardeep Kumer, Jatinder Kumer. (2014). **Modeling and Experimental Investigation of Process Parameters in WEDM of WC-24%Co Composite using Response Surface Methodology and Desirability Function.** Materials Science and International Journal of Advanced Mechanical Engineering, ISSN 2250-3234 Volume 4. No.6. pp.657-666.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] J.Yang, M. Odén, M.P. Johansson-Jöesaar, L.Llanes. (2014). **Grinding effects on surface integrity and mechanical strength of WC-Co cemented carbides.** Procedia CIPP 13. pp.257-263.
- [22] **CNC Technology Wire-cut.** Mitsubishi Electric Corporation (ฉบับภาษาไทย). กรุงเทพฯ: บริษัทบูรพาการไฟฟ้าอุตสาหกรรม จำกัด (OEIC). น. 25-27.
- [23] K.Krishnaiah., P.Shahabudeen. (2012). **Applied Design of Experiments and Taguchi Methods.** Haryana: PHI Learning Private Limited. New Delhi-110001. pp.221-241.
- [24] สยาม แก้วคำไสย์. การศึกษาผิวหน้าแตกหักของโลหะและพลาสติก. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. [Online] Available:
<http://www2.mtec.or.th/th/research/famd/lcenter%5Cfractography.pdf>.
- [25] กัญจนา ตระกูลคู. (2534). **เทคโนโลยีการกัดกร่อน.** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เอ็กซ์เพรส มีเดีย. น.80-84, 2534.



ภาคผนวก

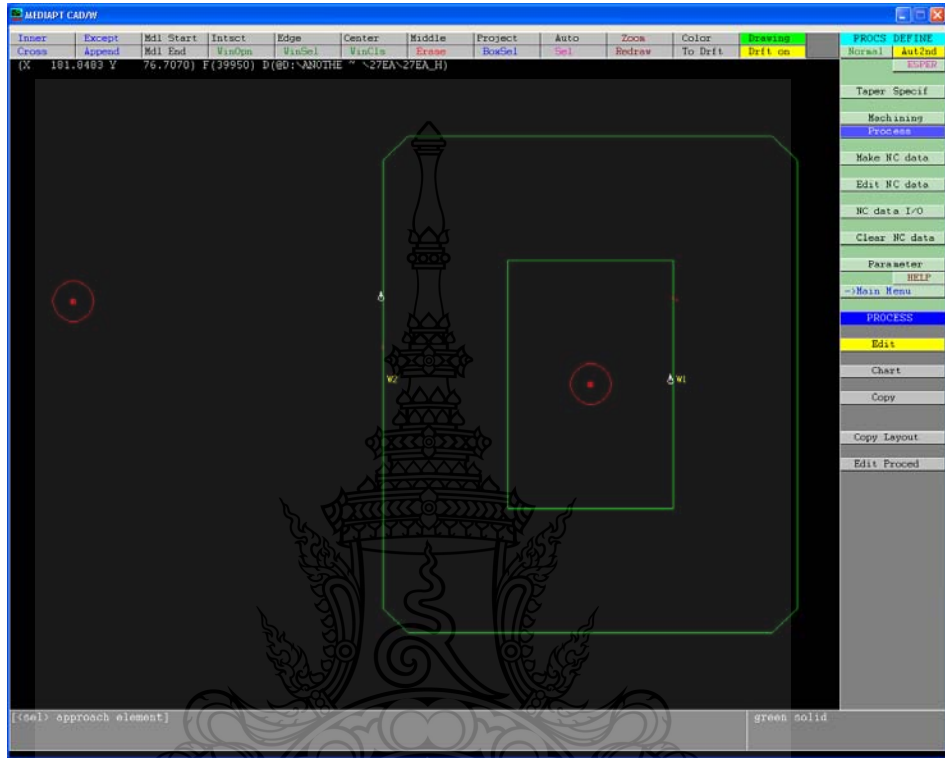


ภาคผนวก ก
ภาพประกอบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

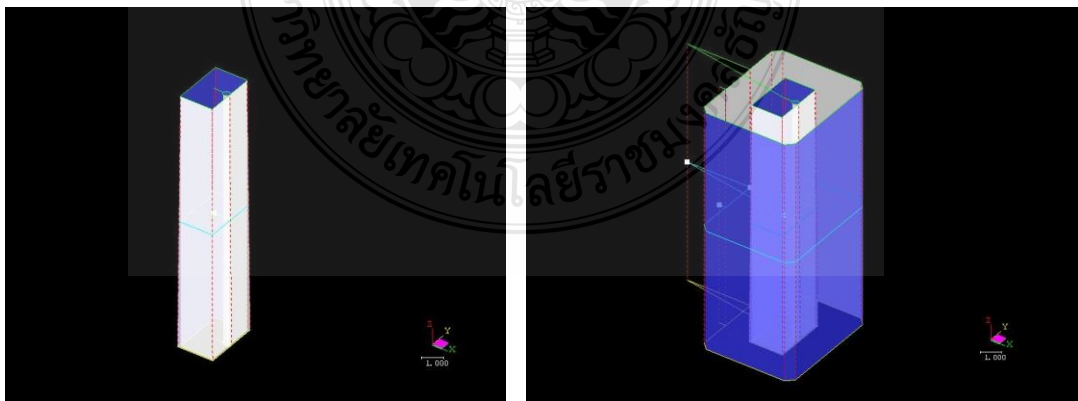


ภาพประกอบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.) ขั้นตอนการเตรียม CAD/CAM



รูปที่ ก.1 โปรแกรม Mediapt CAD/W ซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ MEATH



รูปที่ ก.2 แบบจำลองการตัดชิ้นทดลอง: แสดงการตัดช่องกมตัด (ซ้าย) และการตัดด้านนอก (ขวา)

โปรแกรมตัดหยาบ (Rough cut) กรณีที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

%

(W1 NORMAL)

สำหรับการตัดช่องคมตัด 2 x 3 มม. (ส่วนตรงหรือคมตัด)

N0001M20

N0002M80

N0003M82

N0004M84

N0005G90

N0006G92X4.Y4.

N0007H1=0.173

N0008F1.3E1421

N0009M90

N0010G42G01X4.Y3.

N0011G01X2.5Y3.

N0012G01X2.5Y5.

N0013G01X5.5Y5.

N0014G01X5.5Y3.

N0015G01X4.Y3.

N0016M00

N0017G40G01X4.Y4.F60.

N0018M21

N0019M02

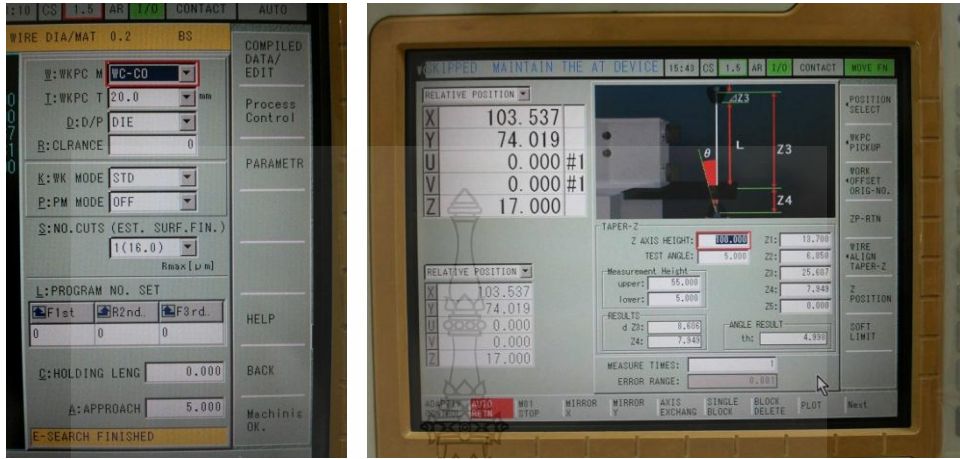
(CUTTING LENGTH = 22.000 MM)

(RAPID LENGTH = 2.000 MM)

%



2.) การเตรียมพารามิเตอร์ของเครื่องจักร (Machining parameter)



รูปที่ ก.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องจักร: เทคโนโลยีเครื่องจักร (ซ้าย) และค่า Z-parameter (ขวา)

3.) การตัดชิ้นทดลอง



รูปที่ ก.4 การตัดชิ้นทดลองภายใต้สารเหลวตัวกลาง (Submerge)

4.) ความหมายของค่าปัจจัยและตารางค่าไฟมาตรฐานสำหรับตัดวัสดุทั้งสแตนคาร์ไบด์
 ตารางที่ ก.1 ความหมายของปัจจัยภายในตารางค่าไฟมาตรฐาน (E-condition)

ปัจจัย	คำย่อ	ความหมาย
E-pack Number	Eno	ชุดค่าไฟที่มีอยู่ใน Data base ของเครื่องสร้างโดยผู้ผลิตเครื่องจักร
Power supply	PS	วงจรจ่ายพลังงานตัด HP=Rough, HL=Semi finished และ LC=Finished
Servo	SV	ค่าเซอร์โวโหมด NM=Normal และ SL=Step less
Voltage open	Vo	แรงดันก่อนที่ลวดจะเดินทางเข้าถึงระยะสปาร์ก, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Power setting	IP	กระแสไฟฟ้าระหว่างที่ลวดเดินทางสปาร์ก, ค่าระดับ 1 ถึง 18
Off Time	OFF	ระยะเวลาในการหยุดสปาร์ก, ค่าระดับ 1 ถึง 16 (HS, HP, MP ใช้คงที่ 1)
Stabilizer A	SA	ชุดปรับความเรียบในการสปาร์กชุด SA, ค่าระดับ 1 ถึง 8
Stabilizer B	SB	ชุดปรับความเรียบในการสปาร์กชุด SB, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Stabilizer C	SC	ชุดปรับความเรียบในการสปาร์กชุด SC, ค่าระดับ 1 ถึง 3 (ใช้กับ IP 1-3)
Stabilizer E	SE	ชุดปรับความเรียบในการสปาร์กชุด SE, ค่าระดับ 1 ถึง 5 (1 คือ ปิด)
Voltage gap	VG	แรงดันไฟฟ้าแก่สปาร์กโดย Adaptive control, ค่าระดับ 1 ถึง 150
Fine machining	FM	สำหรับงานละเอียด OFF=ไม่ใช้ และ ON=ใช้, มีผลเฉพาะ PS ที่ค่า LC
Wire speed	WS	ความเร็วป้อนลวด, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Wire tension	WT	ความตึงลวด, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Pre-tension	PT	ความตึงลวดดึงกลับของม้วนลวด, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Flow balance	FB	ความสมดุลแรงดันสารเหลวตัวกลาง NM (ปกติ), U เบา และ L เบา
Liquid quantity	LQ	ปริมาณการไหลของสารเหลวตัวกลาง, ค่าระดับ 1 ถึง 16
Liquid resistivity	LR	สถานะต้านทานไฟฟ้าของสารเหลวตัวกลาง, ค่าระดับ 1 ถึง 9
Feed address	FA	ความเร็วปรับตั้งในการตัด กำหนดก่อนที่จะสร้าง NC Program
Upper flow rate	-	อัตราไหลของสารเหลวตัวกลางชุดบน, ค่าระดับ 1 ถึง 16 (0-10 l/min)
Upper flow rate	-	อัตราไหลของสารเหลวตัวกลางชุดล่าง, ค่าระดับ 1 ถึง 16 (0-10 l/min)

หมายเหตุ:

- SB มีหน้าที่คล้ายคลึงกับ Off Time ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 1 ในการตัดหยุดทุกความหนาวัสดุ
- ปัจจัยกลุ่มข้างบนใช้ควบคุมพลังงานที่ใช้ตัดงาน และกลุ่มข้างล่างใช้ควบคุมกลไกการทำงาน
ของเครื่องจักร

Wire Dia. and Type	Material Type	Material Thickness	Process	Flush cup clearance	
				Upper	Lower
0.20BS	Tungsten Carbide	20mm	Standard	0.20mm	0.10mm

Cutting Process		Start Up	Rough Cut	Skim1	Skim2	Skim3	Skim4	Skim5	Skim6
Block Number	End	942	1421	1422	1423	1424	1425		
Power Supply	PS	HP	HP	HL	LC	LC	LC		
Wires	SV	NM	NM	SL	SL	SL	SL		
Voltage Open	Vo	12	16	5	3	8	6		
Power Setting	IP	7	8	10	3	2	2		
Off Time	OFF	1	1	12	10	5	4		
Stabilizer A	SA	3	4	2	2	1	1		
Stabilizer B	SB	12	9	12	8	3	2		
Stabilizer C	SC	1	1	1	1	1	1		
Stabilizer E	SE	4	4	1	1	1	1		
Voltage Gap	VG	54 (52 ~ 56)	40 (37 ~ 43)	50 (48 ~ 52)	65 (63 ~ 67)	50 (48 ~ 52)	45 (43 ~ 47)		
Flaw machining	FM	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON		
Wire Speed	WS	8	12	12	12	12	12		
Wire Tension	WT	7	8	10	10	10	10		
Pre-Tension	PT	14	14	14	14	14	14		
Flow Balance	FB	NM	NM	NM	NM	NM	NM		
Liquid Quantity	LQ	12	14	4	4	4	4		
Liquid Resistivity	LR	7	7	7	7	7	7		
Feedrate Address	FA	1.0	1.3	3.5	7.0	6.0	5.0		
Upper Flow Rate		6.0	8.0	1.5	1.5	1.5	1.5		
Lower Flow Rate		5.0	6.0	1.0	1.0	1.0	1.0		

Offset Value(s)										
Rough Cut			132							
Rough & 1 Skim			158	103						
Rough & 2 Skims			170	115	105					
Rough & 3 Skims			172	117	107	104				
Rough & 4 Skims			173	118	108	105	105			
Rough & 5 Skims										
Rough & 6 Skims										
Stepping increment				55	10	3	0			

RESULTS										
Feedrate Cutting	FC		1.9 ~ 2.9	3.0 ~ 4.2	4.0 ~ 8.1	8.0 ~ 10.0	4.6 ~ 8.5			
Average Voltage Gap	VG		38 ~ 42	53 ~ 58	68 ~ 70	67 ~ 70	46 ~ 68			
Avg. Linear Feedrate	ALF		144.8	86.4	68.8	60.4	52.9			
Surface Finish(μm)	Ry		15.5 ~ 18.5	13.7 ~ 14.3	4.7 ~ 5.3	2.5 ~ 3.1	1.7 ~ 2.3			
	Ra		2.0 ~ 2.5	1.9 ~ 2.2	0.5 ~ 0.8	0.2 ~ 0.5	0.1 ~ 0.4			

Note: Set flush cup clearance as shown as Top chart.
(If wire breakage occurs, set FA Adjust to -1 or -2 on monitor screen.)

รูปที่ ก.5 ตารางค่าไฟมาตรฐานสำหรับตัดวัสดุทังสเทนคาร์ไบด์ความหนา 20 มิลลิเมตร

5.) ชั้นทดลองจากการทดลองตัดจำนวน 2 ชุด



รูปที่ ก.6 ชั้นทดลองในงานวิจัย



รูปที่ ก.7 ตัวอย่างลักษณะการตัดที่ไม่เสถียร (Instability)

6.) ขั้นตอนการทดสอบด้วยการเจียรระไนราบ (Surface grinding)

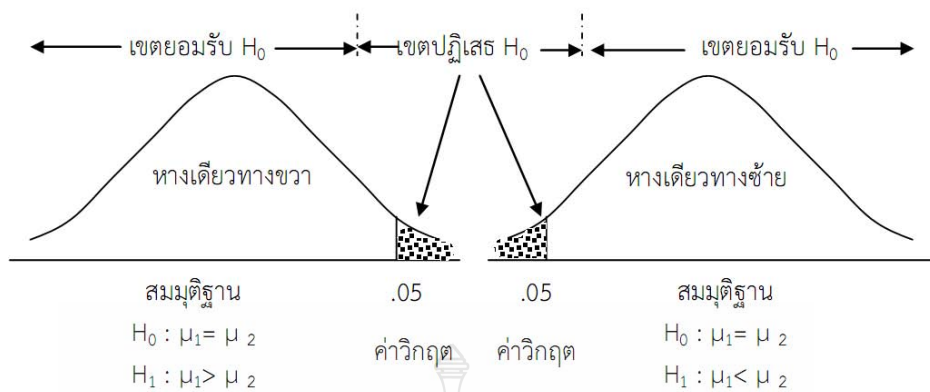


รูปที่ ก.8 การทดสอบการแตกบิ่นบนคมตัดด้วยการเจียรระไนราบ (Surface grinding)

7.) ขั้นตอนการตรวจสอบขอบคมตัด



รูปที่ ก.9 การตรวจวัดขนาดการแตกบิ่นเล็กด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด (MM)



F Values for $\alpha = 0.05$

d_2	d_1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.3	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96
inf	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

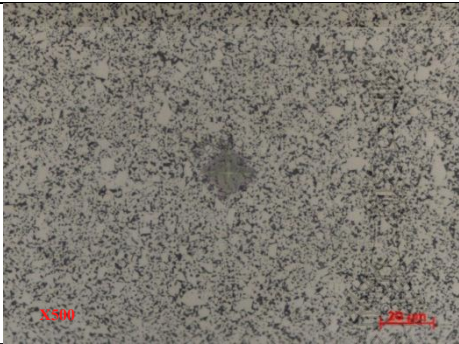
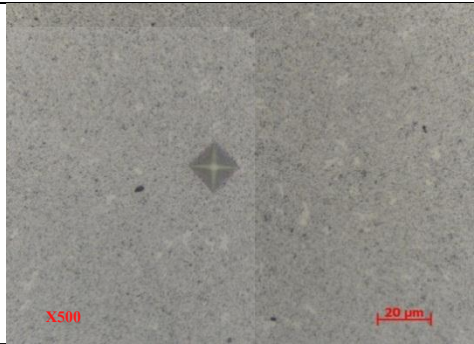
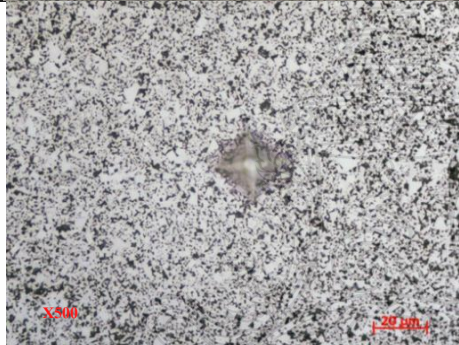
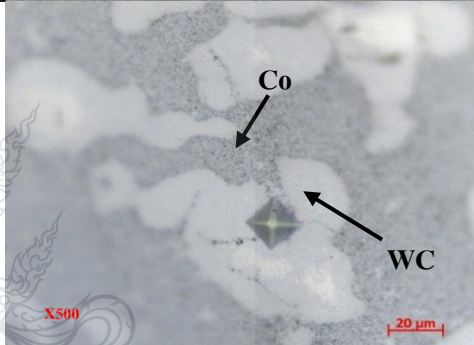
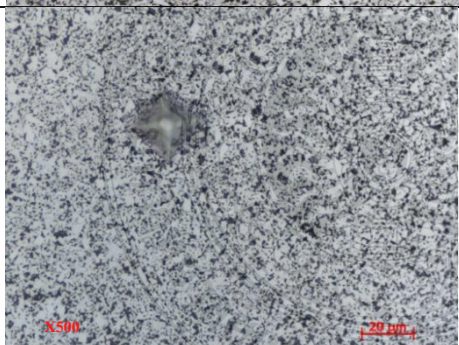
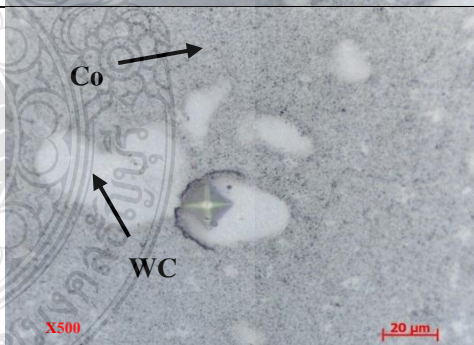
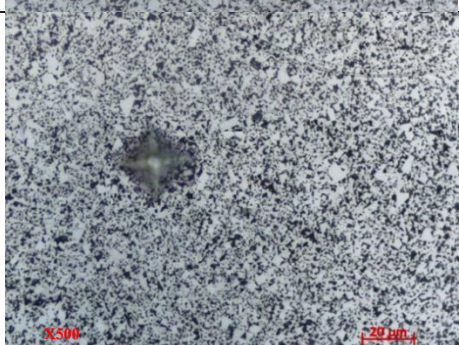
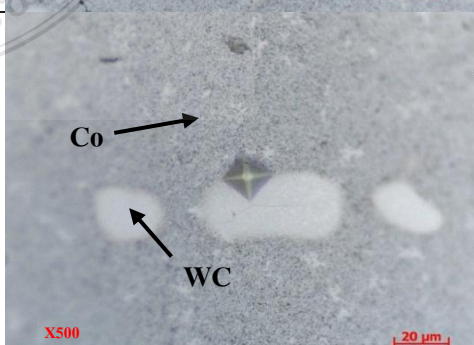
รูปที่ ก.10 ตารางการแจกแจงแบบปกติ F (F-distribution)



บันทึกผลการทดลอง

1.) ลักษณะของพื้นผิวตัด Wire EDM ของชิ้นทดลองในการทดลองขั้นต้น (Pre-testing)

ตารางที่ ข.1 รูปถ่ายพื้นผิวตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อน (OM) กำลังขยาย 500 เท่า

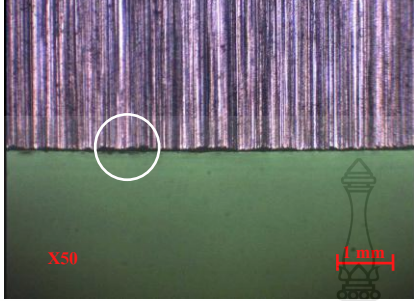
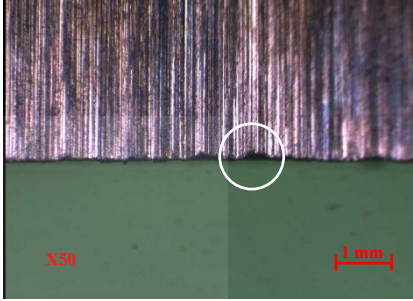
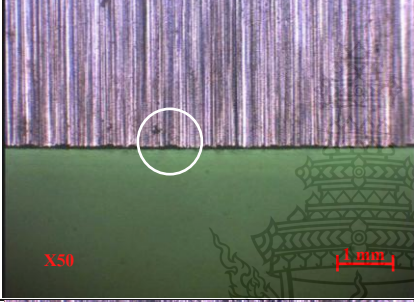
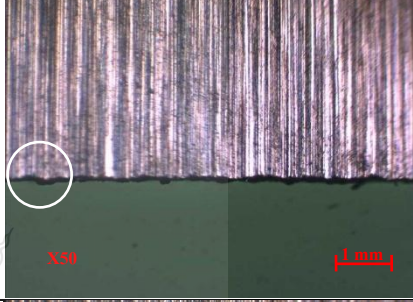

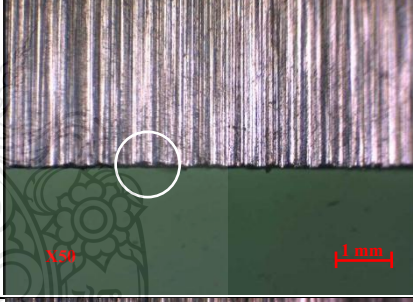
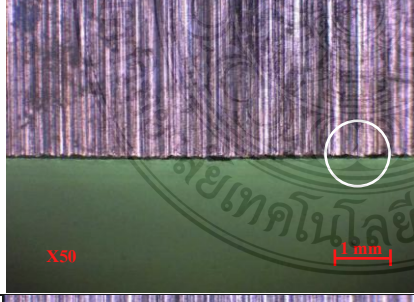
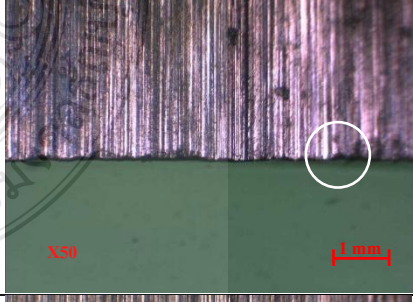
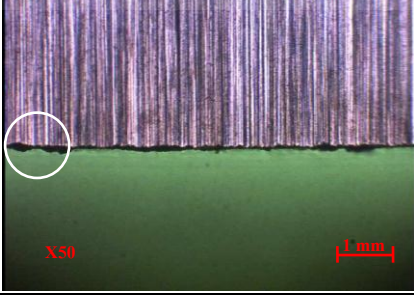
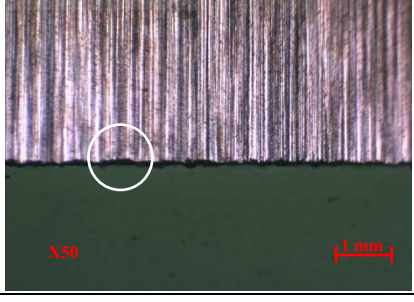
การทดลอง	RD50	WC-12%Co
Base (No WEDM)		
FR-A: -3 ($I_p=7, T_{OFF}=12, V_G=46$)		
FR-A: 0 ($I_p=8, T_{OFF}=9, V_G=40$)		
FR-A: +3 ($I_p=8, T_{OFF}=8, V_G=36$)		

2.) บันทึกเวลาตัดชิ้นทดลองของการทดลองทั้ง 2 ชุด

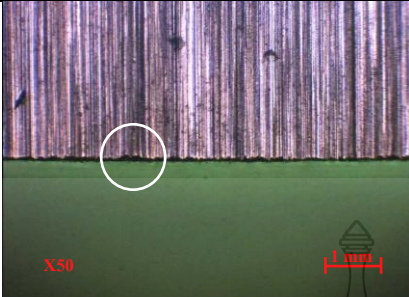
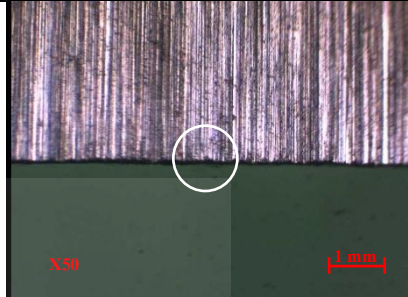
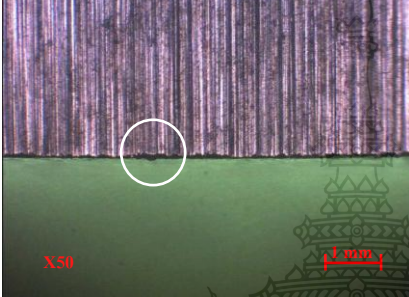
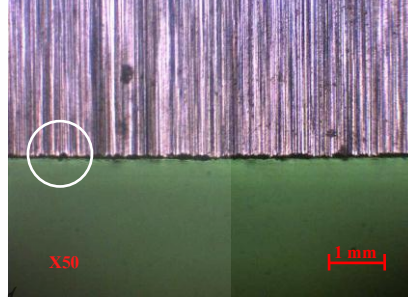
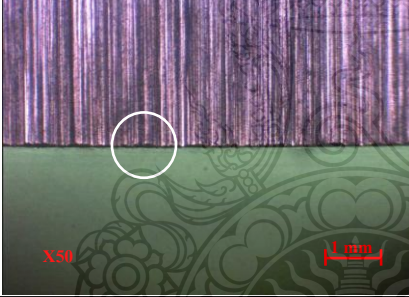
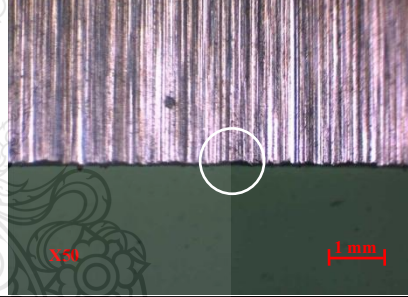
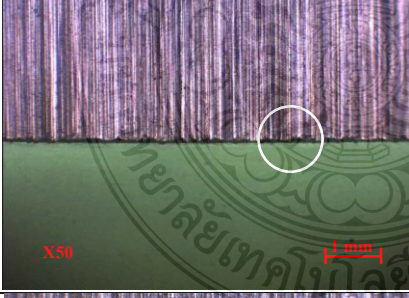
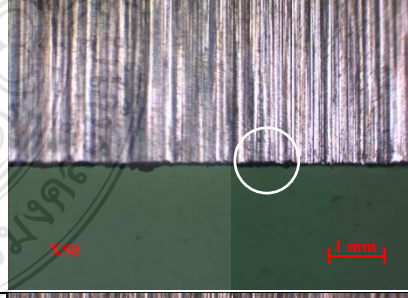
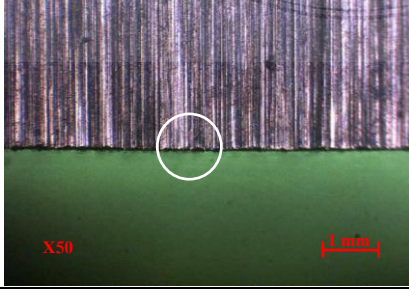
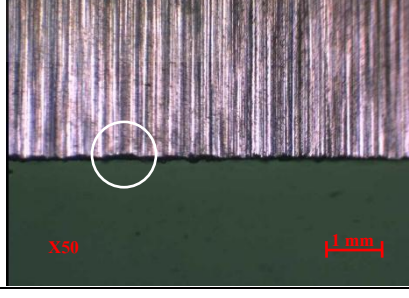
ตารางที่ ข.2 บันทึกเวลาตัด (Cutting time)

การทดลอง	เวลาตัด (นาที)	
	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
1	4.10	4.25
2	4.29	4.44
3	4.39	4.54
4	4.18	4.33
5	4.40	5.05
6	5.00	5.28
7	5.09	5.13
8	5.13	5.28
9	5.31	5.46
10	3.00	3.21
11	3.07	3.28
12	3.18	3.49
13	3.11	3.21
14	3.22	3.36
15	3.36	4.01
16	3.51	3.56
17	4.01	4.02
18	4.18	4.25
19	2.39	2.48
20	2.45	2.55
21	2.51	2.56
22	2.47	2.59
23	2.56	2.59
24	3.13	3.14
25	3.00	3.02
26	3.07	3.14
27	3.10	3.14

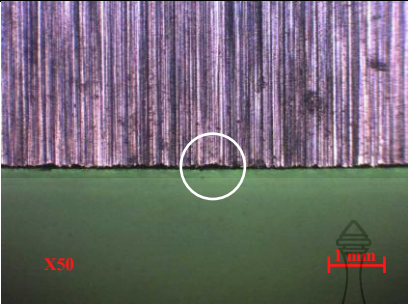
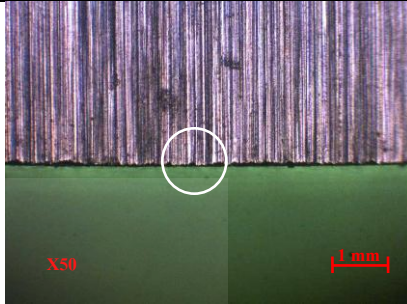
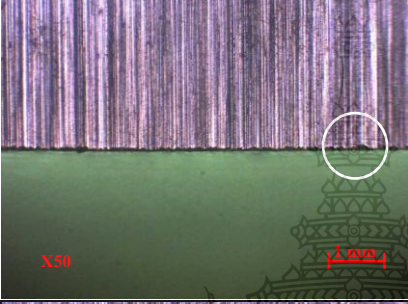
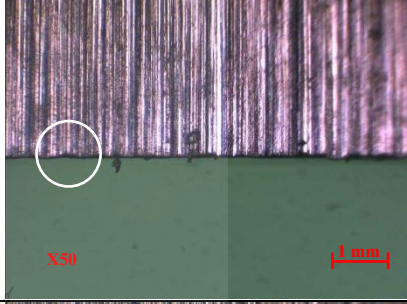
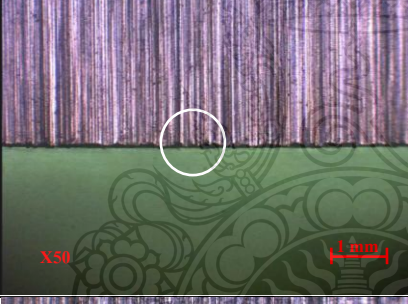
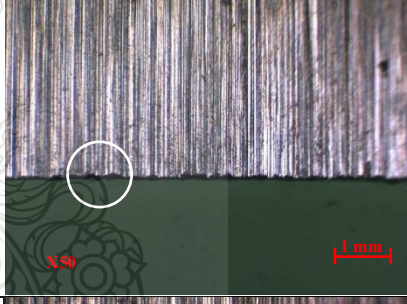
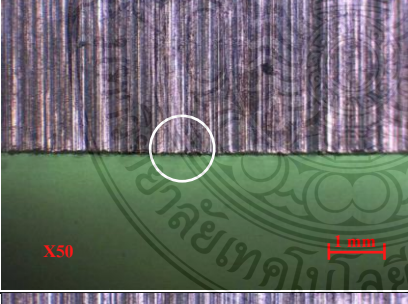
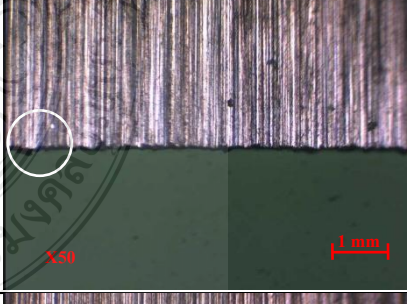
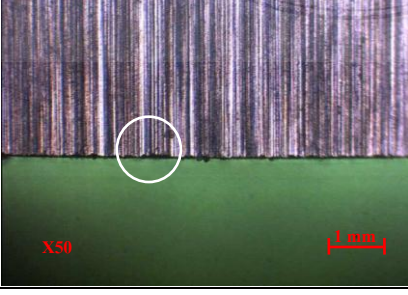
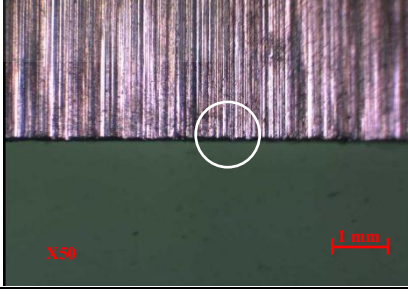
3.) บันทึกภาพถ่ายของผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบวัดขนาด (MM)
 ตารางที่ ข.3 รูปถ่ายด้านหน้าคมตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด (MM) กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
1		
2		
3		
4		
5		

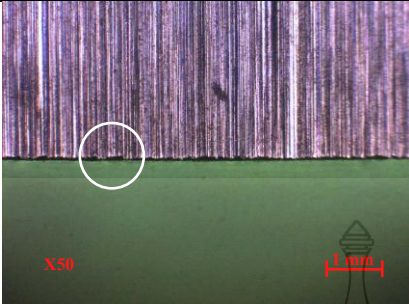
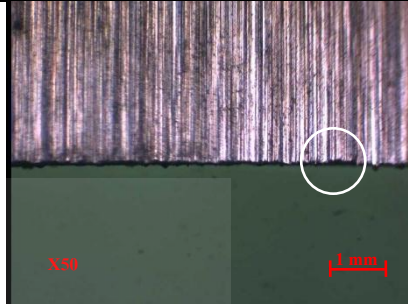
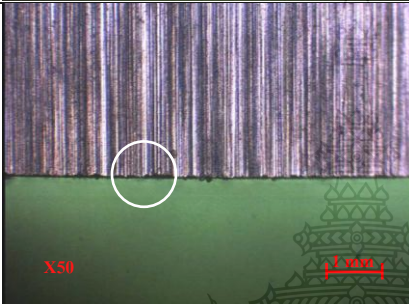
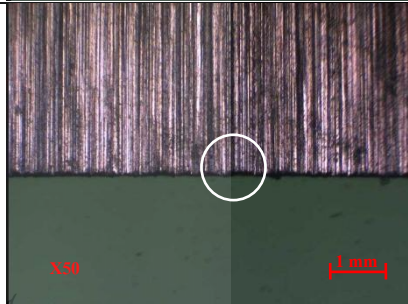
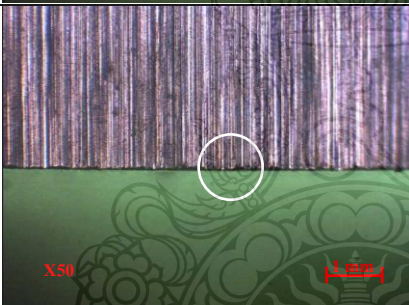
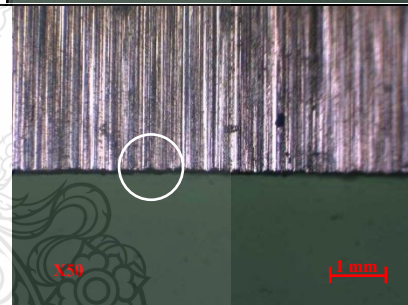
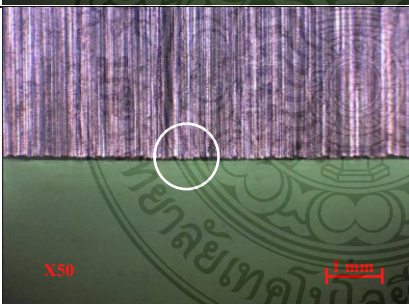
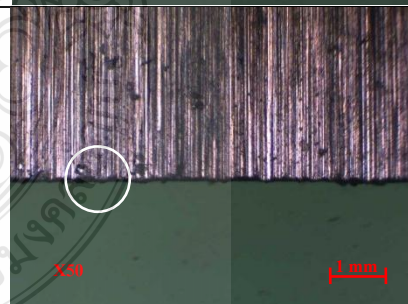
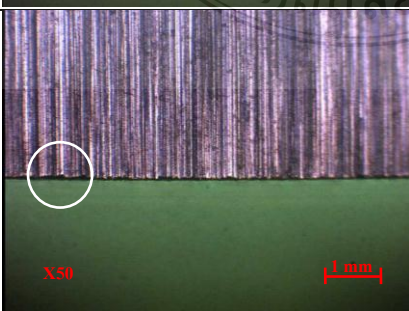
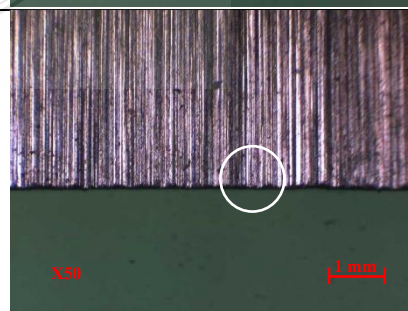
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) รูปถ่ายผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัด กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
6		
7		
8		
9		
10		

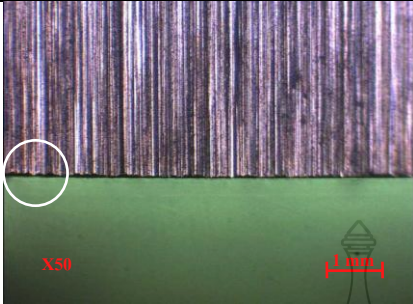
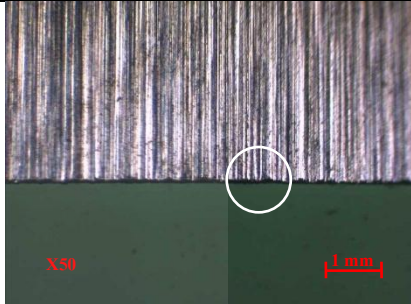
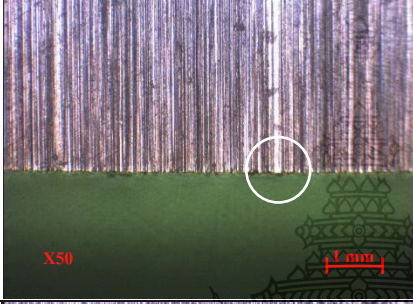
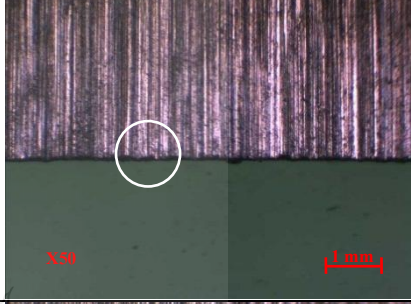

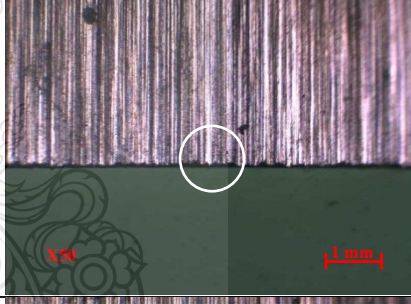
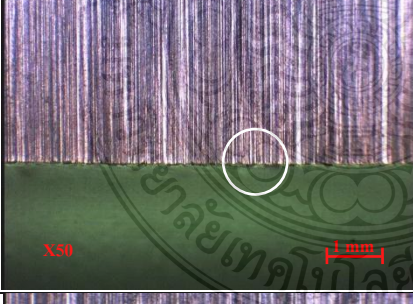
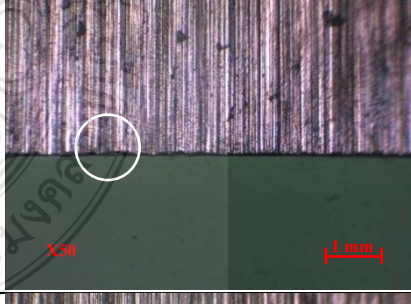
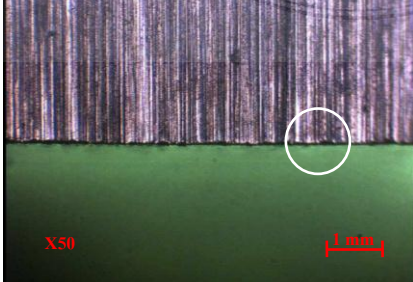
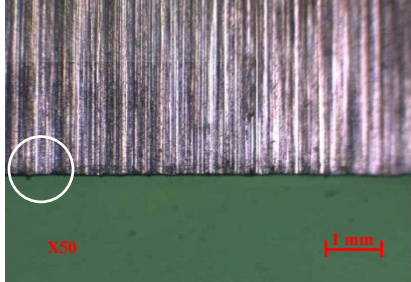
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) รูปถ่ายผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัด กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
11		
12		
13		
14		
15		

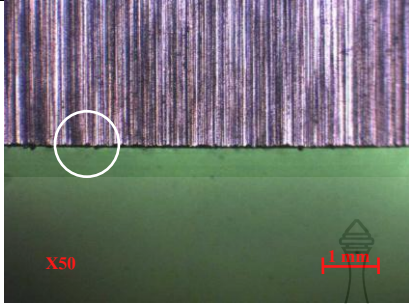
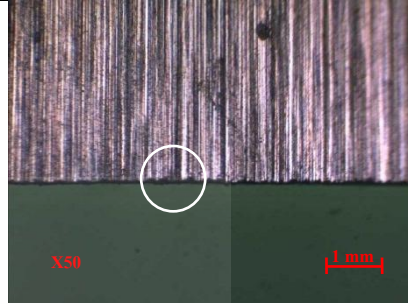
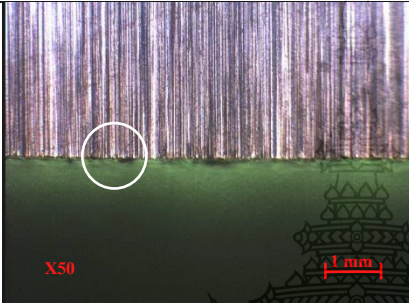
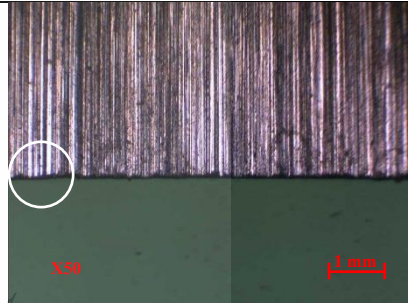
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) รูปถ่ายผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัด กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
16		
17		
18		
19		
20		

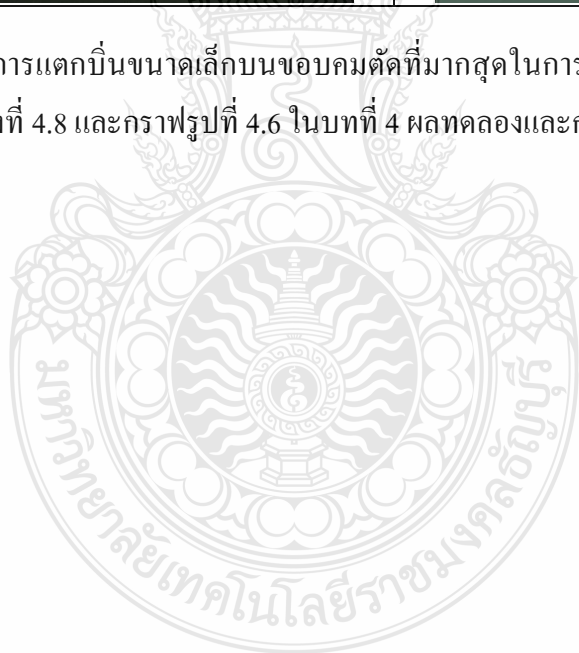
ตารางที่ ข.3 (ต่อ) รูปถ่ายผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัด กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
21		
22		
23		
24		
25		

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) รูปถ่ายผิวหน้าคมตัดและขอบคมตัด กำลังขยาย 50 เท่า

การทดลอง	การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2
26		
27		

หมายเหตุ: ค่าวัดของการแตกบิ่นขนาดเล็กบนขอบคมตัดที่มากที่สุดในการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 2 สามารถดูได้จากตารางที่ 4.8 และกราฟรูปที่ 4.6 ในบทที่ 4 ผลทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง



ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



Proceedings of IE Network Conference

เอกสารรวมบทความการประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

IE NETWORK CONFERENCE

2015 6-7 August 2015 The Emerald Hotel Bangkok



Academics-Industrial Research Collaborations in order to be
Excellence in ASEAN

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558



ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร



Minitab



THAILAND SCIENCE PARK



Minitab



THAILAND
SCIENCE
PARK

Industrial Engineering Network Conference 2015



เอกสารรณบทคัดย่อเข้าร่วมงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

เลขที่ 6 ต.ราชมรรคาตานิ ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

โทร 0-3421-9382 Fax. 0-3421-9382 Email: ienetwot2015@silpakornji.com

Website: <http://www.bliss.com/ie/ie-network-2015/>, www.ienet-th.org/ie/mah1, www.ienet-th.org

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ

1.	รศ.ดร.บัวจวบ ก่อสมจิต	มหาวิทยาลัยศิลปากร	ประธานกรรมการ
2.	ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
3.	ผศ.วันชัย ลีลากรวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
4.	อ.ดร.กัญจนา ทองสนิท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
5.	อ.ดร.พนมศ พงษ์อนันต์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
6.	อ.ดร.ฐกัณฑ์ หงษ์สิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
7.	อ.ดร.วราภรณ์ ชูเกียรติ	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
8.	อ.ดร.สิริวิชัย แซ่เหล่ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
9.	ผศ.ดร.นภัสสรพงศ์ ไชยสถิตย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
10.	ผศ.ดร.ณัฐรา ทวีนสงทุกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
11.	อ.ดร.ไพฑูริย์ กิตติวีระราชย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
12.	อ.ดร.พิศนีย์ จาบุญไธสง	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
13.	อ.ดร.ไพโรจน์ อภาวิจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
14.	รศ.ดร.จิตรา ภูิกงการพาณิชย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
15.	รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติงขวิญญู	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
16.	ผศ.ดร.สมชาย พิวจินตนาแพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
17.	ผศ.ดร.วิศุทธิ์ สุทธิรักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
18.	อ.ดร.วราวุฒิ พงษ์วิธากุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
19.	ผศ.ดร.ชนะ วิวัฒน์ศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน	กรรมการ
20.	อ.ปริญญา พัฒนวัฒน์พา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
21.	อ.ชัยมงคล สัมเพ็ญวรส	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	กรรมการ
22.	รศ.ดร.นิเวศ เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
23.	รศ.ดร.นครนัฐ สัมภิตตะกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
24.	อ.ดร.ธนินุท ไชยจรรยาธิษ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
25.	ผศ.ดร.ภกฏ ไชยวัฒนา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
26.	อ.ดร.วชิรา นาดเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
27.	อ.ดร.วิภา วิสิทธิ์พาณิชย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
28.	ผศ.ดร.รุ่งนิตรา ชุมภูอินทร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
29.	รศ.ดร.คมกฤต เลิศสกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
30.	รศ.ดร.อภิชาติ ไชยภักดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
31.	อ.ดร.ชนม์เจริญ นสงวรัตน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
32.	ผศ.ดร.วิลาญ ชุ่มพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้ากรุงเทพ	กรรมการ
33.	อ.ดร.บุกรวิชัย เกษมนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้ากรุงเทพ	กรรมการ
34.	ผศ.ดร.พิชัย จันทร์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้ากรุงเทพ	กรรมการ
35.	รศ.ดร.ณัฐา คู่พันธ์สุมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
36.	อ.ดร.ระพี กาญจน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
37.	ผศ.สุวิมล ทรัพย์วงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
38.	อ.ดร.อนันต์ มีนาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
39.	ผศ.ดร.ศิริชัย ต๋องสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
40.	ผศ.ดร.พิศิตพงษ์ กิณะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
41.	อ.ดร.ชัยยศ ปาวีร์พิศลกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
42.	ผศ.สุภรณก ปะจูดนาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
43.	ผศ.ศวีโร จาบุญไธสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
44.	ผศ.กฤษณะ ทองศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
45.	ผศ.จุฑา ใจสว่างค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
46.	ผศ.บุญฤทธิ์ ชูตมกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
47.	ผศ.นช. อดิสรชว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ

48.	ผศ.ดร.ปณิธาน ทวีพัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
49.	ผศ.ดร.วีรพัฒน์ เกษมรัฐสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
50.	รศ.ดร.ศรเทพ ธรรมชาณเกียรติ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
51.	ผศ.ดร.สุรฉัตรดา แถงอภินันท์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
52.	รศ.ดร.ศิรินทร์ยา สุระโต	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
53.	รศ.ดร.ชาญณรงค์ สาธมนวิ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
54.	รศ.ดร.กาญจนา เศรษฐวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
55.	ผศ.ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
56.	ผศ.ดร.ธนา ราชบุรีภักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
57.	ผศ.ดร.คมกฤช ปิติฤกษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
58.	ผศ.ดร.จิรวรรณ คล้อยถนอม	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
59.	รศ.ดร.วุฒิชัย วงศ์ทัศน์มีการ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
60.	รศ.ดร.บุษมา พฤกษาพันธ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
61.	รศ.ดร.เสมอจิตตา ทนอมสุทนต์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
62.	ผศ.ดร.ภาณุ บูรณจารุกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
63.	อ.ดร.ขวัญจิณี ศำณัง	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
64.	ผศ.ศรีสัจจา วิเศษศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
65.	ผศ.ศันญา สันวณิช	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
66.	รศ.ดร.เกษม พิทักษ์ปัญญานุกูล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
67.	ผศ.ธีรวัฒน์ สมบัติกาญจนคุณ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
68.	อ.ดร.ฤทธิชัย ชันทนธา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
69.	ผศ.ดร. บรรพชาญ ลีลา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
70.	อ.ดร.จักรวาล สุดะพิศ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
71.	ผศ.ฉันทิศา นาคทวีระกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
72.	อ.ดร.กฤษณา ปวงศพรธนะ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
73.	อ.ดร.บัญชา สวีระจรรยา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
74.	อ.ดร.วิศิตา อุกฤษณ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
75.	อ.ดร.สุนิสา กำชัย	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
76.	อ.ดร.ทงศักดิ์ เทพสนธิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
77.	อ.ดร.สิริญา มีนศิริ	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
78.	อ.ดร.สุกฤษฎี ราชบุรีภักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
79.	อ.ธนา สาพา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
80.	ผศ.ดร.วณิช ตรีไวระนุกูล	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
81.	อ.ดร.จิรวรรณ เต็มใจหาพร	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
82.	รศ.ดร.ดวงพรพรหม ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
83.	ผศ.ดวงยศ สุวิกิจชัย	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
84.	ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ จิวังจิรา	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
85.	อ.ดร.พิษณุ มานัสมีดี	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ
86.	ผศ.ดร.ธนาวรรณ อัครไพฑูริย์	มหาวิทยาลัยบูรพา	กรรมการ

87.	อ.อรรถกัณฑ์ ยุทธิโยฟ้า	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
88.	อ.คือปชัย วิวัฒน์เสย	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
89.	อ.พรพทพงษ์ แก้วทองวงศ์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
90.	อ.สายสุณี พงษ์พัฒน์ศึกษา	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
91.	อ.สมพร พรหมหลวง	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
92.	อ.เประพล จิวะพรทิพย์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
93.	ผศ.นุกูล อุบลนาถ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
94.	ผศ.พิศิษฐ์ มงคล-ชูโต	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
95.	ผศ.พร.กฤษณา ทศอนุปุตรา	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
96.	อ.ดร.เลิศเสนา วนะชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
97.	ผศ.ดร.เจริญ เจตวิจิตร	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
98.	รศ.พร.เสกสรร สุรวรรณานนท์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
99.	รศ.ดร.วเนศ วิเศษวิไล	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
100.	รศ.ดร.สมชาย ชูโอบ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
101.	รศ.ดร.วนิดา วัฒนเมธี	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
102.	ผศ.ดร.อรุณ สังขพงศ์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
103.	ผศ.ดร.กลางเดือน โพธนา	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
104.	ผศ.ดร.วันดี ไชยธรรม	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
105.	ผศ.พิชิต ธรรมการชัยศิริ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
106.	อ.ดร.วิมลพรพงษ์ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
107.	ผศ.ดร.ชลล เมื่อกมลสิงห์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
108.	ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
109.	อ.ดร.วิมลชัย พงษ์กานนท์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
110.	อ.ธัญมา กอสมาน	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
111.	อ.จุฑาวิมล พันธ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
112.	อ.วราภรณ์ เสนีมาวิมล	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
113.	รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิณฑะโต	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
114.	ผศ.ดร.นุศรา มาภิธนากร	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
115.	อ.ดร.จิราภรณ์ อุ่นวงษ์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
116.	อ.ดร.ธรรมา พันธ์นุกูล	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
117.	อ.ดร.ปวีณา มาภิธนากร	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
118.	ผศ.ดร.สมปที สันธุ์เขาวง	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
119.	ผศ.ดร.นลิน เจริญทอง	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
120.	ผศ.ดร.วิภา ศรีสมชาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
121.	รศ.ดร.สิริวิภา พิเศษสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
122.	รศ.ดร.ฤดี มาสุขจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
123.	รศ.ดร.กรวรรณชัย กอชัยศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
124.	รศ.ดร.สกนธ์ อ่อนบุญชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
125.	อ.ชาติ พงศ์ทวีวัฒน์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
126.	ผศ.ดร.อำนาจ ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
127.	อ.ดร.สันต์ วิบูลย์	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
128.	อ.ดร.ณัฐพัชร อารีวิฑูรภาพดี	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
129.	อ.ดร.สมพัญญู อามพรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
130.	ผศ.ดร.ปัทมา พิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ	กรรมการ
131.	ผศ.ดร.ไพฑูริย์ ศิริโอฬาร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
132.	อ.ธิดา ชาญวิจิตร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
133.	อ.จุฑาทิพย์ สีสานพัฒน์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์	กรรมการ
134.	ผศ.ดร.วิรัช รุ่งเรืองอนันต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
135.	ผศ.นราธิป แสงชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
136.	ผศ.ดร.สุพิศลา เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ

รหัสบทความ	ชื่อบทความ
	คาร์บอนต่ำ SS 400 ด้วยวิธีกังหันลมนิวเคลียร์
MP 145	การออกแบบ พัฒนา และสร้างเครื่องทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุที่บรอนเจ้าตามมาตรฐาน ISO13287:2012 และ ASTM-F2913:2011
MP 156	ศึกษาผลกระทบในการแปรรูปผงคัตเมทัลลิว VC-12%Co ด้วยวิธีซีดีเอ็มเอ็มไลน์ลวด
MP 171	การเพิ่มประสิทธิภาพของโรงงานผลิตแผ่นป้องกันโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนไหวและเวลา
MP 172	การใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์การปรับปรุงเทคโนโลยีในการผลิตผ้าฝ้าย
MP 173	การปรับปรุงกระบวนการทดสอบวงจรมายา LMX324
MP 199	การเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการผลิตครกสีน้ำโดยใช้การปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร





ศึกษาผลกระทบการแปรรูปคมตัดแม่พิมพ์วัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธีอีดีเอ็มเส้นลวด
Study the effects in cutting die process from WC-12%Co with Wire-EDM

ชัชชัย ไบลวิทิก^{1*} ชัยยะ ปราณี่พงษ์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12110 E-mail: thaschai_mai@yahoo.com*

Thaschai Maitreegija^{1*} Chaiya Praneepongng²

^{1,2} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathum Thani, 12110, E-mail: thaschai_mai@yahoo.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบการแปรรูปคมตัดแม่พิมพ์โลหะแข็งด้วยไฟฟ้าชนิดเส้นลวด จากวัสดุ
ซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ขนาดเม็ดเกรนละเอียด 0.3-0.5 ไมครอน ค่าความแข็ง 1500 HV ด้วยเส้นลวด
อีดีเอ็มไทเทเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร ให้เป็นช่องคมตัดของตายที่มีเส้นรอบรูป
สี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 x 3 มิลลิเมตร ความสูง 16 มิลลิเมตร ส่วนการปรับระดับปัจจัยโวลเตจเข้าต่อปัจจัยมี 3 ระดับ คือ
กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ, ชูปลับความเรียบดีสชาร์จบี, และแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ ในขั้นตอนของการตัดถาก ต่อ
ผลของขนาดของงานตกมัน โดยทำการออกแบบการทดลอง Orthogonal Array L₂₇ ตามการวิจัยของทากูชิ
ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ และกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จมีผลกระทบต่อการตกมันขนาดเล็ก
อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้นำมาของการตกมันน้อยที่สุดตามลำดับความสำคัญ
ในงานวิจัยนี้ คือแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จระดับ 43, กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จระดับ 9, และชูปลับความเรียบดีสชาร์จบี
ระดับ 9 กระบวนการมีการปรับปรุงผิว การเสื่อมสภาพของพื้นผิวที่ลดลง และการตกมันของคมตัดลดลง 5.5
ไมครอน

คำหลัก คมตัดของตายแม่พิมพ์ / เครื่องอีดีเอ็มเส้นลวด / ซีเมนต์คาร์ไบด์ / ทากูชิ

Abstract

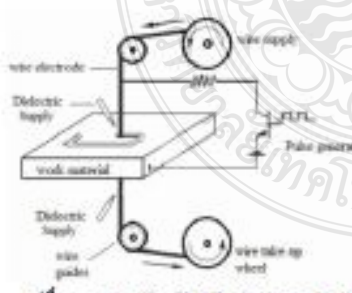
This paper is study in die cutting produce by Wire Electrode Discharge Machine (Wire-EDM) which
material is cemented carbide type WC-12%Co fine grain size 0.3-0.5 μm. Hardness 1500 HV which cut
the blade of die by wire cut machining. Brass wire diameter has been 0.2 mm. The cutting hole shape is
rectangle size 2 x 3 mm. Height 16 mm. The experiment has had 3 variable and 3 levels that consist of
Current discharge, Stability electric discharge (B) and Voltage discharge which rough cutting has been
significant with defect rate. However after design experiment is orthogonal array L₂₇ model of Taguchi
method. That shown result the voltage discharge and current discharge that effected size of micro
chipping which it has been significant 0.05 and suitable factor level was the least for chip which following
paper is Voltage discharge 43, Current discharge 9, and Stability electric discharge (B) 9. The process
has improved the deterioration of the surface decreases and the size of chipping down 5.5 microns.

Keywords: Blade of die / Wire-EDM / Cemented carbide / Taguchi



1. บทนำ

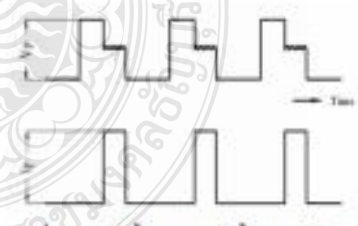
การผลิตแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่นบางที่มีความเที่ยงตรงสูง โดยเฉพาะแม่พิมพ์ที่ต้องการความแข็งแกร่ง คงทนสภาพการสึกหรอระยะใช้งานที่ดีเยี่ยม วัสดุที่นำมาทำแม่พิมพ์แม่พิมพ์ต้องมีสมบัติทางกลที่ดี ซีเมนต์คาร์ไบด์มีคุณสมบัติทางความแข็ง และด้านทานการสึกหรอสูง ได้ถูกพัฒนาและผลิตขึ้นมาใช้งานอย่างหลากหลายหลาย นิยมนำมาใช้แปรรูปเป็นชิ้นส่วนเคลือบขุดแม่พิมพ์ที่ต้องการปริมาณการผลิตชิ้นงานมากๆ ในอุตสาหกรรม การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะกับการผลิตชิ้นส่วนโลหะแผ่นบางที่มีความเหนียวสูง เช่น ทองแดง ทองเหลือง อะลูมิเนียม แต่มักจะมีปัญหาการแตกบิ่น บริเวณขอบคมตัดได้ง่าย เมื่อถูกแรงกระทำจากการ เจียรไปวันบ้าง, ซ่อมแซมคมตัดใหม่ หรือในขณะตัด เฉือนชิ้นงาน ซึ่งหลีกเลี่ยงยากสำหรับงานแม่พิมพ์ขุดแม่พิมพ์สองคมตัด ปัญหาของการแตกบิ่นของขอบคมตัด ทำให้ชิ้นงานมีตำหนิ โดยเฉพาะชิ้นงานตัดที่มีข้อกำหนด ขนาดตามแบบชิ้นงานที่มีค่าพิถีพิถันเนื้อเนื้อ หรือมีที่ผ่านามีการใช้หัวเครื่องตัดเซาะด้วยเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า (Wire Electrode Discharge Machine; Wire-EDM) ในการแปรรูปชิ้นส่วนคมตัดแม่พิมพ์ปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่น เนื่องจากเป็นกระบวนการแปรรูปชนิดพิเศษ ที่มีลักษณะ การตัดคล้ายกับการเลื่อยถูล ด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก 0.1 - 0.3 มิลลิเมตร ทำให้ สามารถตัดรูปร่างชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก และสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนขนาดได้น้อยกว่า +/- 2 ไมครอน [5] กระบวนการตัดทางไฟฟ้าทำให้เกิดความไวสูงถึง 8,000 - 12,000 องศาเซลเซียส จึงไม่เป็นอุปสรรคต่อการตัดเนื้อวัสดุแข็งทุกชนิดที่สามารถเป็นตัวยานพาไฟฟ้าได้ [6]



Bert Lauwers และคณะพบว่าขนาดเม็ดเกาะ และ อัตราส่วนของโคบอลต์ในคาร์ไบด์ชนิดหนึ่ง จะแบ่งออกถึง คุณสมบัติทางด้านการนำความร้อน และจุดหลอมเหลวที่ เฉพาะตัว ซึ่งทั้งสองมีผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการตัด แม้ยังไม่มีความชัดเจนถึงสาเหตุของอาการก่อตัวการ แตกตัวของขนาดเล็ก และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอื่นๆ อีกหลาย ประการ [1] Chang-Ho Kim และคณะพบว่าสัดส่วน โคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นในคาร์ไบด์ มีผลทำให้อัตราการตัด ต่าง และมีการเสื่อมสภาพของผิวตัดสูง [2] Jun Qu และ คณะพบว่าอิทธิพลทางความร้อนมีผลกระทบต่อการ เสื่อมสภาพของคาร์ไบด์ ซีเมนต์คาร์ไบด์ผสมใหม่ที่มีความ แข็ง และอนุภาคมีขนาดอนุภาคต่ำกว่าวัสดุดั้งเดิม [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยในกระบวนการ Wire-EDM ที่มีผลกระทบต่ออัตราการแตกบิ่น โดยมีวัตถุประสงค์ ของการศึกษาเพื่อหาวิธีปรับปรุงที่เหมาะสมในการลด ขนาดของการแตกบิ่นลงให้น้อยที่สุด และพิจารณาอายุ ทัศนวิสัยทางโครงสร้างจุลภาคเชิงสังเคราะห์ของ พื้นผิวตัดของวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า เวลาเปิด และเวลาปิด การตั้งค่ากระแสไฟฟ้า คือการพิจารณาที่กำหนดการ ตั้งค่าปริมาณพลังงานในการสปาร์ก การเพิ่ม กระแสไฟฟ้า และพลังงานมากขึ้น จะทำให้ได้ผิวงานตัด พื้นผิวเรียบขึ้น เป็นการเพิ่มความเร็วในการสปาร์ก แต่เส้น ลวดอาจจะขาดบ่อยครั้งขึ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการปรับค่า ระยะเวลาปิด (OFF Time) และแรงดันไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะสปาร์ก [5]
ON และ OFF Time เป็นระยะเวลาในการสปาร์ก และหยุดสปาร์ก การปรับตัว OFF Time ลดลงจะมีผล ทำให้ความเร็วตัดเพิ่มขึ้น การปรับค่า OFF Time ที่ไม่



ถูกต้อง จะทำให้การสปาร์คติดไม่ราบเรียบ และเส้นขนาดขาดได้ [6] การตัดตามใบรอบที่ 1 เป็นการตัดหริ่งผดเพียงครั้งเดียว ปกติแล้วต้องมีการความเร็วในการตัดสูงซึ่งจะใช้พลังงานในการตัดมากที่สุด [5]

2.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

วิธีการทากูชิเป็นเครื่องมือช่วยปรับปรุงกระบวนการอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเลือกปัจจัยที่เหมาะสมโดยการออกแบบแผนการทดลอง Orthogonal Array (OA) และลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนด การวิเคราะห์ข้อมูลของทากูชิ เพื่อกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่มีค่าสูงสุด แบ่งออกเป็น 3 กรณี [4] ดังนี้คือ

(i) กรณียิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better)

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

(ii) กรณียิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better),

$$S/N_x = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right) \quad (2)$$

(iii) กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target is Better)

$$S/N_x = 10 \log \left(\frac{y^2}{S} \right) \quad (3)$$

อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนที่สูงที่สุดหาได้จาก Prediction S/N Ratio (η_{pred}) คำนวณได้จากผลรวมของ S/N Ratio เดิม (η_m) กับผลรวมของผลต่าง S/N Ratio เดิมที่มีค่าสูงสุด ($\eta_j - \eta_m$) ของแต่ละปัจจัยและ k เป็นจำนวนปัจจัยควบคุม [L.K. Chopda, 2014] ดังนี้คือ

$$\eta_{pred} = \eta_m + \sum_{j=1}^k (\eta_j - \eta_m) \quad (4)$$

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

- ซิเมนต์คาร์ไบด์ WC-12%Co ขนาด 16 มิลลิเมตร
- เครื่อง CNC Wire-EDM ของ Mitsubishi รุ่น AF10PS ประเภทตัดใต้น้ำ (Submerge)
- เส้นลวดอิเล็กโทรลิตของเหล็ก (Brass wire) ของ Sumitomo ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร
- สารเหลวตัวกลาง (Dielectric fluid) เป็นน้ำดีไอ (Deionization water: DI)



รูปที่ 3 เครื่อง Mitsubishi CNC Wire-EDM รุ่น AF10PS

3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจำลองเสมือนตัดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่เรียกว่าสายฉีดพลาสติก พัดเขาซึ่งงานให้เป็นช่องคอดัดที่สนใจศึกษาเป็นเส้นรอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2 x 3 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นพื้นที่ตัดเท่ากับ 160 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 4 โดยปรับระดับปัจจัยป้อนเข้ากระบวนการตัดแต่ละปัจจัย 3 ระดับได้แก่กระแสไฟฟ้าพัลซาร์ต (IP), ชุดปรับความเร็วรอบพัลซาร์ตบี (SB), และแรงดันไฟฟ้าพัลซาร์ต (VG) [5,7] เฉพาะในขั้นตอนของการตัดหยาบ (Rough cut) โดยใช้เครื่องจักร CNC Wire-EDM ดังรูปที่ 3 ด้วยเส้นลวดอิเล็กโทรลิตของเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร การตัดเขาอยู่ภายใต้สารเหลวตัวกลางที่เป็นน้ำดีไอ (Deionization water) ชนิดทวน ซึ่งจะมีการปรับสภาพน้ำดีไอด้วยเม็ดเวซินแบบโพลีออกซิเอทิลีน และมีการกำหนดปัจจัยคงที่อื่นๆ โดยมีอ้างอิงมาจากตารางค่าไฟมาหาฐาน สำหรับใช้ตัดลวดทั้งขนาดคาร์ไบด์ความหนา 20 มิลลิเมตร พามันมีของเครื่องจักรรุ่นเดิมหน้า [5] ซึ่งทดสอบถูกนำมาใช้มาในหัวหน้าคอดัดด้วยดีไอชนิดเบอร์ 14A1 RESIN(D) SCD#SCDH400 ด้วยความเร็วรอบตัด 40 รอบต่อนาที สักละทีละไม่เกิน 3 ไมครอน แล้วทำการวัดขนาดของกานแม่พิมพ์ที่มากที่สุด ซึ่งตารางที่ 3 จากผลการวิเคราะห์ผลของการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab R14



รูปที่ 4 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกโดย Medapti CADW



ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กในชนิด WC-12%Co

Properties	Rank
WC (%Wt)	88
E.T.C + Co (%Wt)	12
Grain size (μm)	0.3-0.5
Density (g/cm^3)	14.15
Hardness (Hv)	1,500
T.P.S (Kg./mm^2)	264

ตารางที่ 2 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Level	IP (Amp)	SB (Noch)	VG (Volt)
1	5	6	37
2	7	9	40
3	9	12	43

15	7	9	43	9	-19.0849
16	7	12	37	11	-20.8279
17	7	12	40	8	-18.0618
18	7	12	43	8	-18.0618
19*	9	6	37	10	-20.0000
20*	9	6	40	9	-19.0849
21*	9	6	43	8	-18.0618
22*	9	9	37	9	-19.0849
23*	9	9	40	8	-18.0618
24*	9	9	43	8	-18.0618
25*	9	12	37	11	-20.8279
26	9	12	40	10	-20.0000
27	9	12	43	9	-19.0849

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองตามแผนการทดลอง Orthogonal array (OA), L_{27} (3^3) ตามขั้นตอนของกระบวนการคือการแตกชิ้นขนาดเล็ก (Micro chipping; mC) มีหน่วยเป็นไมครอน การหาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratios) โดยมีวัตถุประสงค์คือค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Small is Better) ดังแผนการที่ 2 และแสดงในตารางที่ 3

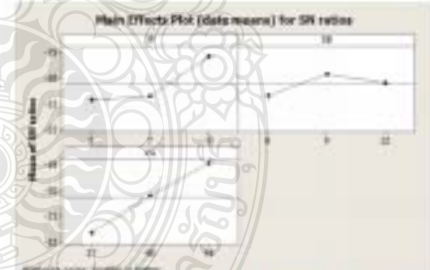
ตารางที่ 3 ผลการทดลอง OA, L_{27} (3^3)

No.	Factor			mC	S/N Ratios
	IP	SB	VG		
1	5	6	37	14	-22.9226
2	5	6	40	12	-21.5636
3	5	6	43	8	-18.0618
4	5	9	37	13	-22.2789
5	5	9	40	10	-20.0000
6	5	9	43	8	-18.0618
7	5	12	37	13	-22.2789
8	5	12	40	11	-20.8279
9	5	12	43	12	-21.5636
10	7	6	37	16	-24.0624
11	7	6	40	13	-22.2789
12	7	6	43	10	-20.0000
13	7	9	37	13	-22.2789
14	7	9	40	12	-21.5636

ในตารางที่ 3 เครื่องหมาย * หมายถึงการทดลองที่มีชิ้นวัสดุเล็กไทรพรอบบริเวณคมตัดที่สนใจศึกษารายละเอียดหนึ่งครั้ง แสดงว่ามีความไม่เสถียร (Instability) เกิดขึ้น

ตารางที่ 4 S/N Ratios ของการแตกชิ้น และจัดอันดับผลกระทบ

Level	Factors		
	IP	SB	VG
1	-20.84	-20.63	-21.62
2	-20.70	-19.83	-20.16
3	-19.14	-20.17	-18.90
Delta	1.70	1.84	2.72
Rank	2	3	1



รูปที่ 5 กราฟ S/N Ratios ของการแตกชิ้น
จากตารางที่ 4 พิจารณาผลต่างค่าเฉลี่ย S/N Ratios แต่ละปัจจัยสำคัญจากมากไปหาน้อยคือ VG, IP, และ SB ในรูปที่ 5 ปัจจัยของกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อค่าการแตกมีน้อยที่สุดคือ VG ที่ระดับ 43, IP ที่ระดับ 9, และ SB ที่ระดับ 9 ส่งผลต่อค่าของอันดับที่ต่ำตามลำดับ และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบ



ความแตกต่างของแต่ละปัจจัย P-value ของ VG เท่ากับ 0.001, IP เท่ากับ 0.013, SB ไม่นับนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

4.2 การทดสอบเพื่อประเมินผล

จากการพุ่มที่ 5 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนำมาวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงที่สุด ค่าการกั้น (Prediction S/N Ratio) และค่าทดสอบสถานะที่ดีที่สุดค่าการกั้น (Prediction Response) จากนั้นทำการทดสอบซ้ำเพื่อประเมินผล พบว่ากระบวนการตัดมีการปรับปรุงประสิทธิภาพดีขึ้น ขนาดของการแตกมีขนาดเล็กลง 5.5 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดด้วยค่าระดับปัจจัยแบบดั้งเดิม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดสอบเพื่อประเมินผล

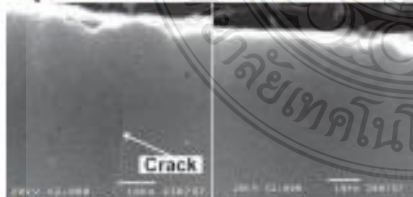
	Initial	Optimal	
	(IP7,SB9,VG40)	(IP3,SB9,VG43)	
		Prediction	Confirmation
S/N Ratio	-21.5835	-17.4198	-35.1720
mC (μm)	12.0	7.0	5.5

4.3 โครงสร้างจุลภาคเชิงสังเกตการณ์

พิจารณาขอบเขตตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดขนาด (Measure Microscope) และพื้นผิวตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ร่วมกับวิเคราะห์การกระจายธาตุพลังงาน (Energy Dispersive Spectrometry; EDS) ดังนี้



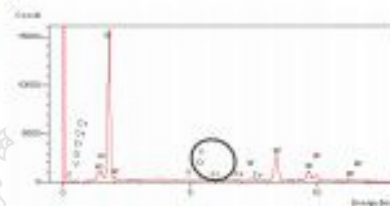
รูปที่ 6 ขอบเขต Initial กับ Optimal ที่ 50 เท่า



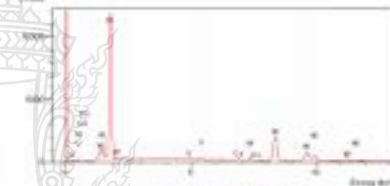
รูปที่ 7 SEM พื้นผิวตัด Initial กับ Optimal ที่ 2,000 เท่า

ตารางที่ 6 องค์ประกอบเคมีธาตุพลังงานจาก EDS (หน่วย %W)

Element	Bulk	Initial	Optimal
W	93.07	88.31	88.59
Co	0.32	1.37	1.26
V	0.55	0.68	0.58
Al	1.28	2.02	2.38
O	1.41	2.98	2.77
C	3.02	4.68	4.40
Cr	0.35	-	-



รูปที่ 8 องค์ประกอบเคมีธาตุของพื้นผิว Bulk



รูปที่ 9 องค์ประกอบเคมีธาตุของพื้นผิวตัด Optimal

กระบวนการทางความร้อน ทำให้องค์ประกอบเคมีธาตุแสดงตัวออกมาถึงพื้นผิวที่แตกต่างกัน [5] พบธาตุ Co, V, Al, O และ C สูงขึ้นซึ่งตรงกับ W ดังตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่ามีการเสื่อมสภาพของพื้นผิวตัดสูงตามอัตราที่สูงกว่าช่วง 1,065-1,120 องศาเซลเซียสที่มีการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วทำให้ Cr รวมตัวกับ Co บางส่วนเป็นเม็ดเมียมพาร์ไมต์ และเข้าไปในเนื้อเกรนทำให้คาร์บอนแข็งขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย แต่พื้นที่รอบๆเกรนเกิดสภาพร้าวเส้นรอบรู Cr ปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่เรียกว่า การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) [9] สังเกตพบว่ามี O เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความต้านทานแรงกระแทกตามแนวขวางลดลง ที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมมีอัตราความตัดสูงกว่าระดับปัจจัยแบบดั้งเดิม องค์ประกอบเคมีธาตุแสดงตัวน้อยลง เป็นไปได้ว่าอัตราการตัดที่ต่ำ จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของผิวตัดอย่างรุนแรง และอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการแตกบริเวณขนาดเล็ก



5. สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การศึกษากระบวนการตัดแปรรูปสมบัติของพลาสมาจากวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ชนิด WC-12%Co ด้วยวิธี Wire-EDM โดยการออกแบบการทดลอง Orthogonal array, $L_{27}(3^3)$ ด้วยวิธีของทาคูชิ ต่อผลตอบสนองการแตกเป็นขนาดเล็ก พบว่าแรงดันไฟฟ้าตัดคาร์บอไดและกระแสไฟฟ้าตัดคาร์บอไดมีผลกระทบบนค่าของอัตราการแตกเป็นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ปัจจัยแรงดันไฟฟ้าตัดคาร์บอไดมีผลกระทบมากที่สุด ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดของการแตกเป็นน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้คือ แรงดันไฟฟ้าตัดคาร์บอไดระดับ 43, กระแสไฟฟ้าตัดคาร์บอไดระดับ 9 และชุดปรับความถี่ของคาร์บอไดระดับ 9 ผลตอบสนองของกระบวนการมีการปรับปรุง การแตกเป็นลดลง 5.5 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระดับปัจจัยแบบดั้งเดิม แรงดันไฟฟ้าตัดคาร์บอไดและกระแสไฟฟ้าตัดคาร์บอไดสูงที่เริ่มทำให้การเสื่อมสภาพของพื้นผิวตัด และการแตกเป็นลดลง

5.1 ข้อเสนอแนะ

ระดับกระแสไฟฟ้าตัดคาร์บอไดที่ระดับ 9 ทำให้ขนาดการแตกเป็นน้อยที่สุด แต่ไม่เสถียรระยะตัด ในทางปฏิบัติอาจต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าตัดคาร์บอไดมากขึ้นกว่าค่าการทดลอง เพื่อให้มีอัตราการผลิตที่มีความสมบูรณ์และเกิดความเสถียร นอกเหนือจากนี้ควรพิจารณาชนิดของชนิดของไฟฟ้าที่เหมาะสมเพิ่มเติม เพราะวธีนี้ระหว่างการผลิตจะไหลจะมีแรงกดดันสูง ทำให้เกิดความเสียหายของชิ้นงานๆ เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น [J.Yang; 2014] ซึ่งการเจียรไฟเป็นหนึ่งในขั้นตอนปฏิบัติของงานช่างที่รวมอยู่ด้วย และอาจจะช่วยแก้ไขปัญหารากการแตกเป็นได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และบริษัทยานาแกิน (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Bert Lauwers, Weidong Liu, Wesley Eemerts, "Influence of the Composition of WC-Based Cermets on Manufacturability by

Wire-EDM", Journal of Manufacturing Process, Vol. 8 (2), 2006, 83-89
[2] Chang-Ho Kim, Jean Pierre Kruth, "Influence of the Electrical Conductivity of Dielectric on WEDM of Sintered Carbide", Journal of Mechanical Science and Technology, 2001, 1-6
[3] Jun Qu, Laura Riester, Albert J. Shih, Ronald O. Scattergood, Edgar Lara-Curzio, Thomas R. Watkins, "Nano indentation characterization of surface layers of electrical discharge machined WC-Co", Materials Science and Engineering A344, 2003, 125-131
[4] พิชัย จันทร์ทวี, กมลพงศ์ แซ่มกมล และอภิวัฒน์ มุขสาบระ, การศึกษาผลกระทบของพลาสมาเจียรในการตัดผิวตัดของคาร์ไบด์โดยการกัดกร่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าด้วยทาคูชิ, วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554, 20-27
[5] อีวานอ เอ็มอินจินซา, เอกสารประกอบคู่มือการควบคุมความถี่ความถี่ของเครื่อง Wire-EDM, Mitsubishi Electric Automation (Thailand) Co., Ltd., กรุงเทพฯ, 2551
[6] สยามัน โทบะ-เออร์มัน, คู่มือการฝึกอบรม P39T4G07 เครื่องจักรเฉพาะทางขั้นสูง (CNC EDM, CNC Wire-cut), โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์, สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย, กรุงเทพฯ, 2550
[7] บริษัท บูรพาการไฟฟ้าอุตสาหกรรม จำกัด, เอกสารประกอบคู่มือการฝึกอบรม CNC Technology Wire-cut (แม่พิมพ์), Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo
[8] สยามัน แก้วคำโส, การกัดกร่อนตามขอบมุม, <http://siamkajwkwmsai.blogspot.com/2011/02/intergranular-corrosion.html>, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ปทุมธานี, 2554 (วันที่สืบค้นข้อมูล 20 มิ.ย. 2558)



การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558

IE Network Conference 2015

ขอขอบเกียรติบัตรนี้ไว้เพื่อแสดงว่า
อัครชัย โมศรีกิจ, ชัยยะ ปรานีพิศพลกรัง

ได้เข้าร่วมการเสนอผลงานวิชาการในหัวข้อ

ศึกษาผลกระทบในการแปรรูปคมตัดแม่พิมพ์วัสดุ WC-12%Co ด้วยวิธีดีเอ็มเอ็มเส้นลวด
ระหว่างวันที่ 6-7 สิงหาคม 2558 ณ โรงแรม ดี เอมเมอรัลด์ กรุงเทพมหานคร

Rk

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กุลอัมจิตร์)
ประธานจัดงานวิชาการกรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2558

ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นายรัชชัย ไมตรีกิจ
วัน เดือน ปีเกิด	1 สิงหาคม 2520
ที่อยู่	139/761 ม.7 ต.เชียงรากน้อย อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13180
การศึกษา	
พ.ศ. 2544-2547	วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
พ.ศ. 2538-2540	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	วิศวกรแม่พิมพ์ (Tooling Engineer) บริษัทยามเกิน (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2547-2552	วิศวกรงานปั๊มขึ้นรูปโลหะ (Stamping Engineer) นิเด็ค พรินซ์ชั่น (ประเทศไทย) จำกัด

