

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด S3

OPTIMIZATION OF WIRE-EDM PARAMETERS ON DC S3 TOOL STEEL

ณรงค์สร ศรีอโศก

NARONGSORN SRIOSHOEY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-082-015

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือดีซี 53

OPTIMIZATION OF WIRE-EDM PARAMETERS ON DC 53 TOOL STEEL



ณรงค์สร ศรีอบเชย

NARONGSORN SRIOBCHOEY

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 76744  
วัน,เดือน,ปี..... 6 ๖.๗. 2550

b. 118 4823x  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-032-015

**OPTIMIZATION OF WIRE-EDM PARAMETERS ON DC 53 TOOL STEEL**

**NARONGSORN SRIOBCHOEY**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF  
ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**KMITL-2007-EN-M-032-015**


**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือดีซี 53  
Optimization of Wire-EDM Parameters on DC Tool Steel  
นักศึกษา นายณรงค์สร ศรีอบเชย  
รหัสประจำตัว 47060352  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ทวี เทศเจริญ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มงคล	มงคลวงศ์โรจน์	
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	
ผศ.ดร.กรรณชัย	กัลยาศิริ	
รศ.ชาญ	ถนัดงาน	
รศ.ทวี	เทศเจริญ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 25 กรกฎาคม 2550 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

  
บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....19.....เดือน.....กุมภาพันธ์.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือตี 53
นักศึกษา	นาย ณรงค์สร ศรีอบเชย
รหัสนักศึกษา	47060352
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ทวิ เทศเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.กวรรณชัย กัลยาศิริ

### บทคัดย่อ

การผลิตในปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีเกี่ยวกับเครื่อง Wire-EDM อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็น การผลิตยานอวกาศ เครื่องบิน การผลิตเครื่องมือแพทย์ และขึ้นรูปวัสดุเครื่องมือเกือบทั้งหมด ชิ้นงานที่ทำการทดลองจะได้รับผลกระทบอย่างมากจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ซับซ้อนภายในพลาสมา และธรรมชาติเกี่ยวกับการเกิดขึ้นแบบสุ่ม ของกระบวนการ EDM วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับรูปแบบการทดลองที่ได้จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ รูปแบบพื้นผิวผลตอบจะเป็นการออกแบบส่วนประสมกลางหมุนได้ ระยะเวลาในการสปาร์คของลวดกับชิ้นงาน ระยะเวลาหยุดในการสปาร์คของลวดกับชิ้นงาน ความดึงของเส้นลวดและความเร็วในการจ่ายเส้นลวด ทั้งหมดนี้จะเป็นตัวแปรที่ส่งเข้า ในขณะที่ความเร็วตัดและค่าความหยابผิว ที่ตอบสนองออกมาจะเป็นตัวแปรที่ส่งออก นอกจากนี้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วตัดและค่าความหยابผิวกับตัวแปรป้อนเข้าทั้งสี่ได้ถูกสร้างขึ้น และนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ร่วมกับโปรแกรมหาค่าความเหมาะสมทำการหาจุดที่เหมาะสมได้สองจุดคือ กรณีค่าความหยابผิวน้อยที่สุด จะได้ค่าความหยابผิวเท่ากับ  $2.40 \mu\text{m}$  และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ  $1.97 \text{ mm/min}$  กรณีค่าความหยابผิวมากที่สุด จะได้ค่าความหยابผิว  $3.31 \mu\text{m}$  และความเร็วในการขึ้นรูปเท่ากับ  $3.45 \text{ mm/min}$  ซึ่งผลลัพธ์ทั้งสองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนในการทำน้อยกว่า 5%

<b>Thesis Title</b>	Optimization of Wire-EDM Parameters on DC 53 Tool steel
<b>Student</b>	Mr.Narongsorn Sriobchoey
<b>Student ID.</b>	47060352
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2550
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof.Thavee Teschareon
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst. Prof.Dr.Kannachai Kanlayasiri

### ABSTRACT

Wire electrical discharge machining (Wire-EDM) technology has been widely used in production, aerospace/aircraft, medical and virtually all areas of conductive material machining. Its complexity and stochastic nature have stimulated numerous attempts to model it accurately. This thesis presents an attempt to modeling the process through Response Surface Methodology. A response surface model is based on a central composite rotatable experimental design. Discharge pulse time, off pulse time, the wire mechanical tension and wire speed are input parameters while the cutting speed and the surface roughness are the responses (output parameters). In addition, a mathematical model was developed to relate the surface roughness and the cutting speed to these variables by Response Surface Methodology. The developed models and optimization program provided could be search two optimum points. In the case of minimum surface roughness, predicted surface roughness was  $2.40 \mu m$  and cutting speed was 1.97 mm/min. In the case of maximum surface roughness, predicted surface roughness was  $3.31 \mu m$  and cutting speed was 3.45 mm/min. both results provided prediction error less than 5%.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่ช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก รศ.ทวี เทศเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์คำรึห์ จันทรแสงสุก และคุณมณฑา เทียมเมือง ที่ให้ความเอาใจใส่ดูแล ให้คำแนะนำในการทำการทดลองทุกๆเรื่อง

ขอขอบพระคุณ บริษัทยันม่า ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานในการทดลอง  
สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้มอบชีวิต การศึกษา และ อนาคตที่ดีให้กับผู้วิจัยและเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจกับผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน

ณรงค์สูตร ศรีออบเชย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.3 สรุป.....	5
บทที่ 3 หลักการ EDM.....	6
3.1 ชนิดของเครื่อง EDM.....	11
3.1.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM.....	11
3.1.2 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM.....	12
3.1.3 เครื่อง Wire Cut EDM.....	12
3.2 ปรัชญาการกัดการสปาร์ค.....	14
3.2.1 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	18
3.2.3 วงจรสปาร์ค.....	23
3.2.4 เครื่อง EDM ในปัจจุบัน.....	30
3.3 ทฤษฎีการควบคุมเครื่อง NC-EDM.....	32
3.3.1 บรรยากาศของระหว่างขั้ว.....	36
3.3.2 องค์ประกอบ 4 ประการที่ควรทราบ.....	39
3.3.2.1 ความเร็วในการขึ้นรูป (g/min).....	40
3.3.2.2 ความหยาบของผิว ( $\mu R_{max}$ ).....	40
3.3.2.3 ระยะห่างการสปาร์ค ( $\mu m$ ).....	41
3.3.2.4 อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (%).....	42
3.3.3 ความหยาบละเอียดของผิว.....	43
3.3.3.1 ค่าความสูงสุดของความหยาบ $R_{max}$ .....	43
3.3.3.2 ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด $\mu mRz$ .....	44
3.3.3.3 ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง $Ra$ .....	44
3.4 การขึ้นรูปในสารละลาย.....	49
3.4.1 กรกระจายหตุคของสารละลาย.....	50
3.4.2 การขึ้นรูปแบบแช่.....	51
3.4.3 การสปาร์คซ้ำ.....	53
3.4.4 คุณสมบัติพิเศษของสารละลายและสมรรถภาพการขึ้นรูป.....	53
3.4.5 ชั้นผิวที่เกิดจากการขึ้นรูป.....	55
3.5 ทดที่ใช้ตัดชุบด้วยโคบอลต์ (WC-Co).....	60
3.6 ภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่อง CNC Wire Cut EDM.....	67
บทที่ 4 ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง.....	72
4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA).....	72
4.1.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน.....	73
4.1.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	74

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 สมมติฐานของความเป็นปกติ.....	76
4.1.4 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกผิด.....	78
4.2 การออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบ.....	80
4.2.1 การออกแบบสำหรับพืดแบบจำลองอันดับหนึ่ง.....	81
4.2.2 การออกแบบสำหรับพืดแบบจำลองอันดับที่สอง.....	82
4.2.2.1 ความสามารถในการหมุน.....	83
4.2.2.2 CCD รูปทรงกลม.....	85
4.2.2.3 จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD.....	85
4.2.3 การออกแบบบล็อก-เบห็นเคน.....	85
4.2.4 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยดัล.....	87
4.2.5 การออกแบบชนิดอื่น.....	87
4.3 การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization).....	88
4.3.1 การหาค่าตัวถ่วงน้ำหนัก (Weight).....	88
4.3.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสม.....	90
บทที่ 5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	92
5.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง.....	92
5.2 การตัดชิ้นงาน.....	92
5.3 การวัดค่า Surface Roughness (Ra).....	98
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	99
6.1 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra) และ ความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed).....	99
6.1.1 การหาสมการทำนายค่าความหยาบผิวและสมการทำนายค่าความเร็วตัด.....	107
6.1.2 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม เมื่อค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) และค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ).....	108

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.3 การหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมค่าความหยาบผิว.....	111
บทที่ 7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	120
7.1 การวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra).....	120
7.2 การวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อ ค่าความความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed).....	120
7.3 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป.....	121
7.3.1 กรณีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ).....	121
7.3.2 กรณีค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ).....	121
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
เอกสารอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก. ส่วนผสมเหล็กเครื่องมือ DC 53.....	127
ภาคผนวก ข. ข้อมูลจากการทดลอง.....	129
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	136
ประวัติผู้เขียน.....	145

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่ามาตรฐานของความยาว L ในการวัดที่เหมาะสมกับค่า Rmax, Rz, Ra ของชิ้นงาน.....	46
3.2 คุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน.....	54
3.3 สรุปคุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน.....	55
3.4 คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่างๆ.....	61
3.4 คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่างๆ (ต่อ).....	62
3.5 แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด.....	65
3.5 แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด (ต่อ).....	66
3.6 จีโค้ด (G-Code).....	68
3.7 เอ็มโค้ด (M-Code).....	69
3.8 ทีโค้ด (T-Code).....	69
4.1 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว.....	72
4.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่.....	76
4.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบ้น์เคนแบบสามตัวแปร.....	86
5.1 ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53.....	92
5.2 ตัวแปรป้อนเข้าและระดับที่ใช้ในการทดลอง.....	95
5.3 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง สำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้.....	96
5.3 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง สำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้ (ต่อ).....	97
6.1 ANOVA ในการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra).....	99
6.2 ANOVA ในการวิเคราะห์ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	100
6.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ $Ra_{min}$ .....	113
6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี $Ra_{min}$ .....	114
6.5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ Objective function Value กรณี $Ra_{min}$ .....	115
6.6 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ $Ra_{max}$ .....	117
6.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี $Ra_{max}$ .....	118
6.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ Objective function Value กรณี $Ra_{max}$ .....	119

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ผ.ข. 1 ข้อมูลค่าความหยาบผิวของชั้นงานในการทดลอง.....	130
ผ.ข. 2 ข้อมูลค่าความเร็วในการขึ้นรูปของชั้นงานในการทดลอง.....	132
ผ.ข. 3 ตัวแปรและรหัสของตัวแปรที่ในการหาสมการ.....	134

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 ระบบพิกัดตั้งฉาก.....	6
3.2 ระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา.....	6
3.3 แกนพิกัดของเครื่องกลึง.....	7
3.4 แกนพิกัดของเครื่องกัด.....	7
3.5 เครื่อง EDM.....	11
3.6 เครื่อง Wire Cut EDM.....	13
3.6.1 หลักการตัดขึ้นรูปแบบ Taper.....	14
3.7 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ค.....	15
3.8 สภาพการสปาร์คแต่ละครั้ง.....	17
3.9 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM.....	19
3.10 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ค.....	22
3.11 การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คของลาซาเรนโก้.....	23
3.12 วงจรของเพาเวอร์ซัพพลายระบบทรานซิสเตอร์.....	24
3.13 คุณสมบัติพิเศษการสปาร์คของวงจรการสปาร์คแบบคอนเดนเซอร์ (วงจรลาซาเรนโก้).....	25
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป.....	26
3.15 วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์.....	27
3.16 วงจรทรานซิสเตอร์ต่อแบบขนาน.....	28
3.17 วงจรสปาร์ค แบบคอนเดนเซอร์และมีทรานซิสเตอร์ควบคุม.....	30
3.18 องค์ประกอบของการควบคุมเครื่อง EDM.....	31
3.19 การควบคุมเครื่อง EDM.....	33
3.20 การควบคุมเครื่อง Wire cut EDM.....	33
3.21 Semi Closed Feedback.....	34
3.22 Full Closed Feedback.....	35
3.23 หลักการของคอนเดนเซอร์.....	37
3.24 องค์ประกอบที่กำหนดความจุของคอนเดนเซอร์.....	38
3.25 ระยะเวลาของขั้วไฟฟ้า.....	42
3.26 การสึกหรอของขั้วไฟฟ้า.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 ค่าสูงสุดของความหยาบ $R_{max}$ .....	43
3.28 ความหยาบ $R_z$ .....	44
3.29 ความหยาบเฉลี่ย $R_a$ .....	44
3.30 การสั่นของเส้นลวดระหว่างตัวนำ.....	47
3.31 ประเภทของตัวนำเส้นลวด.....	48
3.32 ความแตกต่างของการไหลของสารละลายและช่วงห่างระหว่างขั้ว.....	50
3.33 ขึ้นรูปจากด้านปลายชิ้นงาน.....	50
3.33.1 พ่นแรงทำให้สารละลายกระจายหลุดเกิดการสปาร์คในอากาศขึ้น.....	51
3.33.2 ลดแรงพ่นสารละลายลง.....	51
3.34 การขึ้นรูปชิ้นงานที่ตรงกลางกลวง.....	52
3.34.1 สารละลายที่พ่นออกไปจะเข้าไปในส่วนกลวงได้ยาก ทำให้เสถียรภาพในการขึ้นรูปไม่ดี..	52
3.34.2 การขึ้นรูปแบบแช่ในสารละลายจะช่วยแก้ปัญหาที่ สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีเสถียรภาพ....	52
3.35 การสปาร์คซ้ำ.....	53
3.36 ความแข็งของชั้นผิวเปลี่ยนแปลง.....	56
3.37 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปหยาบในสารละลายน้ำมันความละเอียดของผิว $3.8\mu m$ .....	57
3.38 ชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปละเอียดในสารละลายน้ำมัน ความละเอียดของผิว $1.5\mu m$ .....	57
3.39 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ.....	59
3.40 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน.....	59
3.41 เปรียบเทียบการสึกหรอของปลายมีดของ Die (ขึ้นรูปด้วย Wire Cut EDM) วัสดุ : SKD-11, ความแข็ง HRC 59, ขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว 70,000 ชิ้น).....	60
3.42 EDM-ed Surface texture or WC-Co (6%, 1-3 $\mu m$ WC grains) using operating condition of : 1-10A, t-1.4 s, f-0.56 kHz.....	63
3.43 EDM-ed surface texture of WC-Co (12% Co, 1-3 $\mu m$ WC grains) using operation conditions 0f: 1-10A, t-1.4 s, f-0.56 kHz.....	67
4.1 Normal Probability Plot และแผนภาพแบบจุดของส่วนตกค้าง.....	77
4.2 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกผิด.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การออกแบบขิมเพลกซ์สำหรับตัวแปร (a) $k = 2$ และ (b) $k = 3$ .....	82
4.4 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ .....	83
4.5 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ที่ถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้.....	84
4.6 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร.....	86
4.7 การออกแบบ Face-Centered ส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 3$ .....	87
4.8 การออกแบบปริศมึเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม (b) ห้าเหลี่ยม.....	88
4.9 กราฟ Objective function เมื่อค่า $w_1 = 10, w_2 = 1$ .....	89
4.10 กราฟ Objective function เมื่อค่า $w_1 = 3, w_2 = 1$ .....	90
5.1 เครื่อง CNC Wire Cut EDM.....	93
5.2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC Wire Cut EDM.....	93
5.3 ลักษณะการตัดชิ้นงาน.....	94
5.4 เครื่อง SURFCOM 480A ของ TOKYO SEIMITSU.....	98
6.1 Main Effect Plot for Ra แสดงถึงระดับตัวแปรป้อนเข้า ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าความหยาบผิว.....	101
6.2 Main Effect Plot for Ra แสดงถึงระดับตัวแปรป้อนเข้า ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่า Cutting Speed.....	101
6.3 การกระจายของส่วนตกค้างเทียบกับค่า predicted Ra.....	102
6.4 การกระจายของส่วนตกค้างเทียบกับค่า predicted Speed.....	103
6.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ OFF ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra).....	104
6.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ OFF ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed).....	105
6.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ WT ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed).....	106
6.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร OFF และ WT ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed).....	107
6.9 ลักษณะกราฟ Objective function เมื่อหาค่า $Ra_{min}$ ที่เหมาะสม.....	112

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ $Ra_{min}$ (error $\leq 5\%$ ).....	113
6.11 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวณ Speed cut กรณี $Ra_{min}$ (error $\leq 5\%$ ).....	114
6.12 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวณค่า Objective function กรณี $Ra_{min}$ (error $\leq 5\%$ ).....	115
6.13 ลักษณะกราฟ Objective function เมื่อหาค่า $Ra_{max}$ ที่เหมาะสม.....	116
6.14 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ $Ra_{max}$ (error $\leq 5\%$ ).....	117
6.15 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี $Ra_{max}$ (error $\leq 5\%$ ).....	118
6.16 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลจากการคำนวณค่า Objective function กรณี $Ra_{max}$ (error $\leq 5\%$ ).....	119
ผ.ก. 1 ใบรับรองคุณสมบัติเหล็กกล้า DC 53 ที่ใช้ในการทดลอง.....	128

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

## Roman symbols

CCD	การออกแบบส่วนประสมกลาง
CNC	Computer Numerical Control
CPU	Central Processing Unit
EDM	Electric Discharge Machining
H0	สมมติฐานหลัก
$I_p$	ค่ากระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป
IP	รหัสของการตั้งค่ากระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป
k	ตัวแปรในการทดลอง
$MS_E$	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด
$MS_{Treatment}$	ค่าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างระดับ
$n_a$	จำนวนของจุดที่อยู่บนปลายแกน
$n_c$	จำนวนของจุดที่อยู่บนจุดศูนย์กลาง
$n_f$	จำนวนของจุดที่เป็นแบบ factorial
OFF	รหัสของการตั้งค่าเวลาหยุดการสปาร์ค
ON	รหัสของการตั้งค่าเวลาในการสปาร์ค
Ra	ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง
Ra*	ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลางในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย
$Ra_{max}$	ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลางมากที่สุด
$Ra_{min}$	ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลางน้อยที่สุด
Rmax	ค่าความสูงสุดของความหยาบผิว
Rz	ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด
Sp	ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงาน
Sp*	ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย
$SS_E$	ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด
$SS_T$	ผลรวมของกำลังสองทั้งหมด
$SS_{Treatment}$	ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ
w1, w2	ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 1 และที่ 2

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

WS	รหัสของการตั้งค่าความเร็วในการจ่ายเส้นลวด
WT	รหัสของการตั้งค่าความตึงเส้นลวด
$y_{ij}$	ค่าสังเกตที่ $ij$
$\hat{y}_{ij}$	ค่าสังเกตที่ถูกฟิตที่ $ij$

### Greek symbols

$\alpha$	ระดับนัยสำคัญ
$\beta$	สัมประสิทธิ์ของการถดถอย
$\varepsilon$	องค์ประกอบความผิดพลาดแบบสุ่ม
$\mu$	มัชฌิมรวม
$\tau_i$	ผลกระทบจากระดับที่ $i$
$\tau_{off}$	เวลาหยุดการสปาร์ค
$\tau_{on}$	เวลาในการสปาร์ค
$\tau_w$	เวลารอกการสปาร์ค
$\sigma^2$	ความแปรปรวน
$\Sigma$	ผลของการบวก

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

### Over bar and superscripts

—	Averaged mean value
*	Parameter modification

### Subscripts

a	Axial
avg	Average
c	Center
E	Error
f	Factorial
i, j	Space coordinate
max	Maximum
min	Minimum
T	Total

# บทที่ 1

## บทนำ

จากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้มีการใช้วัสดุใหม่ๆมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตและการแปรรูปวัสดุที่มีค่าความแข็ง ซึ่งมีความเหนียวและความทนต่อการกระแทกสูง วัสดุเหล่านี้ยากที่จะขึ้นรูปโดยเครื่องจักรที่ใช้เทคนิคการผลิตแบบดั้งเดิม(Conventional Manufacturing Processes) ดังนั้นกระบวนการผลิตชิ้นงานสมัยใหม่ (Non-traditional Manufacturing Processes) จึงได้รับการประยุกต์ใช้ เช่น Electrochemical Machining, Ultrasonic Machining และ Electric Discharge Machining (EDM)

Wire-EDM ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ EDM เป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานสมัยใหม่ที่ใช้ไฟฟ้าและความร้อนในการตัดชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื้อวัสดุจะถูกกำจัดออกโดยการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าที่ส่งออกเป็นช่วงๆระหว่างเส้นลวดไฟฟ้า (Wire Electrode) กับชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กตริก (Dielectric Fluid) การใช้กระบวนการ EDM ในทางอุตสาหกรรมได้รับความนิยมมากขึ้น อันเนื่องมาจากกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและวัสดุที่มีความแข็งสูงได้ดี

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire-EDM เป็นระบบที่ซับซ้อนอันเนื่องมาจากหลายๆมูลเหตุ เช่น การปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ซับซ้อนภายในพลาสมา (Plasma) และธรรมชาติเกี่ยวกับการเกิดขึ้นแบบสุ่ม (Stochastic Nature) ของกระบวนการ EDM ด้วยมูลเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการหาค่าที่เหมาะสมของคุณภาพผิวหน้าที่สัมพันธ์กับความเร็วในการตัดของชิ้นงาน ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรมีความสำคัญกับชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะคุณภาพผิวที่ดีจะปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความต้านทานเนื่องจากความเค้น การกัดกร่อน และการต่อต้านการสึกหรอของชิ้นงานแต่ถ้าเพิ่มความเร็วในการตัดมากขึ้นก็จะทำให้คุณภาพผิวลดลง ดังนั้นเป็นเรื่องที่ไม่แปลกเลยถ้าจะพบบทความและวิธีการสำหรับหาค่าความหยาบผิวของการตัดชิ้นส่วนที่เหมาะสมด้วย Wire-EDM ที่เที่ยงตรงและถูกต้องได้น้อยมาก [1-4]

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันเหล็กเครื่องมือ DC 53 เป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire-EDM เพราะฉะนั้นในการขึ้นรูปเหล็กชนิดนี้ในปัจจุบันจึงต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ที่ควบคุมเครื่อง

Wire-EDM ซึ่งผิวหน้าที่ได้ของชิ้นงานอาจมีความหยาบมากเกินไปหรือถ้าได้พื้นผิวที่มีความหยาบตามต้องการก็อาจมีการใช้ลวดหรือระยะเวลาในการตัดมากเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นเกินความจำเป็นอย่างมากในการขึ้นรูปชิ้นงาน ถ้าสามารถหาค่าตัวแปรป้อนเข้าต่างๆ ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงานได้ ก็จะสามารถประหยัดวัสดุต่างๆที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน เวลา และยังได้พื้นผิวของชิ้นงานที่เหมาะสมตามที่ต้องการ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาเกี่ยวกับค่าความหยาบผิวและความเร็วในการขึ้นรูป
2. หาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วในการขึ้นรูป โดยใช้ Response Surface Methodology และ Analysis of Variance
3. ศึกษาการรวมสมการความหยาบผิวและสมการความเร็วตัด โดยวิธีการถ่วงน้ำหนัก (Weight) รวมเป็น สมการ Objective function เดียวกัน
4. ศึกษาการออกแบบและสร้าง โปรแกรม เพื่อทำนายค่าความเหมาะสมตัวแปรป้อนเข้าในกรณี  $Ra_{min}$  และ  $Ra_{max}$
5. หาค่าความเหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้าในกรณี  $Ra_{min}$  และ  $Ra_{max}$  ในช่วงของการศึกษาที่ได้จากการสมการ Objective function

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ตั้งสมมติฐานของการศึกษาโดยพิจารณาตัวแปรป้อนเข้าในการทดลองเป็นอิสระต่อกันเพื่อที่จะสอดคล้องกับทฤษฎีของ Response Surface Methodology และการกระจายของเศษส่วนตกค้างเป็นแบบ Normal Plot

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ชิ้นงานมีขนาด 27 mm × 5 mm × 13 mm ตัดโดยใช้เครื่อง Wire EDM ของ Sodick รุ่น A280 ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดลองดังนี้
  - 1.1 กระแสที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน (IP) มีค่าเท่ากับ 17
  - 1.2 ระยะเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (ON) อยู่ในช่วง 1 – 5
  - 1.3 ระยะเวลาในการหยุดการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน (OFF) อยู่ในช่วง 12 – 16
  - 1.4 ความตึงของเส้นลวด (WT) อยู่ในช่วง 4 -8
  - 1.5 ความเร็วในการจ่ายเส้นลวด (WS) อยู่ในช่วง 6 – 10

2. ลวดที่ใช้ในการตัดชิ้นงานเป็นของ KHSodick รุ่น KHW-250P5-5
3. วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology)
2. ตัดชิ้นงานโดยใช้เครื่อง Wire EDM บันทึกค่าความเร็วตัดในการตัดแต่ละเงื่อนไข และนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่า Surface Roughness (Ra) ตามแนวการตัด เก็บผลการทดลองจากการตัดในช่วงที่เราสนใจ
3. หาตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความหยาบผิวและความเร็วตัดโดยใช้วิธีทาง Response Surface Methodology ในช่วงของการศึกษา
4. สร้างสมการความหยาบผิวกับตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์และสร้างสมการความเร็วตัดกับตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์โดยใช้วิธีทาง Response Surface Methodology ในช่วงของการศึกษา
5. นำสมการความหยาบผิวและสมการความเร็วตัดมาถ่วงน้ำหนัก (Weight) รวมเป็น สมการ Objective function เดียวกันเพื่อทำการหาค่าความเหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้าในกรณี  $Ra_{mm}$  และ  $Ra_{max}$
6. นำค่าที่เหมาะสมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาตรวจสอบกับผลการทดลองจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันความถูกต้อง

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้นของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาตัวแปรป้อนเข้าของเครื่อง Wire-EDM ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วตัดของชิ้นงานที่เป็นเหล็กเครื่องมือ DC53 และนำความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนเข้านำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Response Surface Methodology และสามารถแสดงผลความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนเข้ากับตัวแปรส่งออกเป็นภาพ 3 มิติ แล้วนำมาคำนวณหาตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วตัดในการขึ้นรูปชิ้นงาน

## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### 2.1 บทนำ

การผลิตในปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีเกี่ยวกับเครื่อง Wire-EDM อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็น การผลิตยานอวกาศ เครื่องบิน การผลิตเครื่องมือแพทย์ และชิ้นรูปวัสดุเครื่องมือเกือบทั้งหมด ชิ้นงานที่ทำการทดลองจะได้รับผลกระทบอย่างมากจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ซับซ้อนภายในพลาสมา (Plasma) และธรรมชาติเกี่ยวกับการเกิดขึ้นแบบสุ่ม (Stochastic nature) ของกระบวนการ EDM ด้วยมูลเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการหาค่าที่เหมาะสมของคุณภาพผิวหน้าที่สัมพันธ์กับความเร็วในการตัดของชิ้นงาน ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรมีความสำคัญกับชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะคุณภาพผิวที่ดีจะปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความต้านทานเนื่องมาจากความเค้น การกัดกร่อน และการต่อต้านการสึกหรอของชิ้นงานแต่ถ้าเพิ่มความเร็วในการตัดมากขึ้นก็จะทำให้คุณภาพผิวแย่ลง ดังนั้นการหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้ค่าความหยาบผิวตามที่ต้องการและมีความเร็วตัดที่สูงซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและประหยัดทั้งพลังงานและเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สามารถรวบรวมงานวิจัยที่มีลักษณะแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.2.1 งานวิจัยของ Puri A.B. และ Bhattacharyya B. [5] ได้ศึกษาตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูปเหล็กแม่พิมพ์ M2 (ได้รับการอบอ่อนและมีส่วนผสม 0.85% C, 4% Cr, 6.25% W, 5% Mo, 2% V) โดยใช้วิธี Design of Experiments บนพื้นฐานของ Taguchi method และ Analysis of Variance เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อ ความเร็วตัด ค่าความหยาบผิว ความไม่เที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงานอันเนื่องมาจาก wire lag หลังจากนั้นได้ทำการหาสภาวะของตัวแปรป้อนเข้าที่ทำให้ ความเร็วตัด ค่าความหยาบผิว ความไม่เที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงานอันเนื่องมาจาก wire lag มีค่าเหมาะสมที่สุดในช่วงของการทดลอง ซึ่งจุดที่เหมาะสมที่หาได้ในการทำนาคามีค่าความผิดของความเร็วตัด 2.15% ค่าความหยาบผิว 2.66% ความไม่เที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงานอันเนื่องมาจาก wire lag 1.54%

2.2.2 งานวิจัยของ Tarng Y.S., Ma S.C. และ Chung L.K. [6] ทำการศึกษาตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในการขึ้นรูปเหล็กสแตนเลส SUS-304 โดยใช้วิธี feedforward neural network หลังจากนั้นใช้วิธี simulated annealing(SA) algorithm ประยุกต์ร่วมกับ neural network ในการหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพในการขึ้นรูปโดยพิจารณาถึงกรณีค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ) กรณีที่ 1 เหล็กหนา 10 mm มีค่าความผิดพลาดในการทำนาย ค่าความหยาบผิวมากที่สุด 1.2% ความเร็วตัด 6.3% กรณีที่ 2 เหล็กหนา 15 mm มีค่าความผิดพลาดในการทำนาย ค่าความหยาบผิวมากที่สุด 1.2% ความเร็วตัด 2.9%

2.2.3 Narender Singh P., Raghukandan K. และ Pai B.C. [7] ทำการศึกษาและทดลองกับโลหะที่มีเนื้อเป็นวัสดุผสม Al-10%SiCp composites เพื่อหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลในการขึ้นรูปโดยใช้วิธี Grey relational grade ร่วมกับวิธี analysis of variance (ANOVA) และทำการเลือกระดับของตัวแปรที่มีความเหมาะสม ตรวจสอบผลการทดลองที่ได้และตรวจสอบตัวแปรที่เลือกใช้ ในกระบวนการหาค่าความเหมาะสมจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้ไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่เป็น  $L_{27}$  Orthogonal Array(OA)

2.2.4 งานวิจัยของ Spedding T.A. และ Wang Z.Q. [8] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี Response Surface Methodology แบบ central composite rotatable และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี Artificial Neural Network ขนาด 4-16-3 แบบ back-propagation neural network นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบความแม่นยำในการทำนาย ค่าความหยาบผิว ค่าความเรียบผิว และความเร็วตัด ทำการตรวจสอบผลการทดลองทั้ง 2 วิธี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ทั้ง 2 วิธีมีความแม่นยำในการทำนายใกล้เคียงกัน

## 2.3 สรุป

เนื่องจากยังมีบทความที่เกี่ยวข้องกับเครื่อง Wire Cut EDM อยู่ค่อนข้างมาก และบทความส่วนใหญ่เป็นบทความเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความหยาบผิวและความเร็วในการขึ้นรูปของชิ้นงาน ซึ่งไม่ได้มีการหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม กับค่าความหยาบผิวที่สัมพันธ์กับความเร็วในการขึ้นรูปในช่วงที่ทำการศึกษา ส่วนวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ใช้เหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 เป็นชิ้นงานในการทดสอบ เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เช่น ทำแม่พิมพ์ตัดโลหะเย็น ทำลูกรีดสำหรับม้วนท่อต่าง ๆ ใบมีดสำหรับตัดกระดาษตัดเหล็ก แบบพิมพ์สำหรับทำอิฐบล็อก พิมพ์ขึ้นรูปเกลียว พิมพ์ปั๊มลวดลาย พิมพ์ปั๊มเอ็นหัวสกรู พิมพ์รีดโลหะเย็น คัดเตอร์ กัดเฟือง กัดไม้ มีครูด ฯลฯ

### บทที่ 3

## หลักการ Electrical Discharge Machining

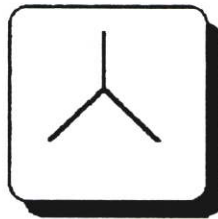
#### การกำหนดแกนพิกัดมาตรฐาน (Normal Coordinate System)

การติดตั้งชิ้นงานตามระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา (Right-Hand Rectangular Coordinate System) โดยขนานกับการเคลื่อนที่เส้นตาราง (ซ้าย-ขวา, หน้า-หลัง, ขึ้น-ลง) ของเครื่องมือกัดคู่ได้จากรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 ทิศทางบวกของแกน Z

ชิ้นงานอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองเครื่องมือตัดจากแกนหลักเป็นทิศทาง (+) ดูได้จากรูปที่ 3.3 เครื่องมือตัดอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองชิ้นงานจากแกนหลักเป็นทิศทางบวก (+) ดูได้จากรูปที่ 3.4 แกนหมุนและแกนเสริม

แกนหมุนเป็นแกนที่หมุนและขนานกับแกนพิกัด ให้ถือทิศทางของการหมุนของเกลียวมือขวาเป็นทิศทางบวก (+)

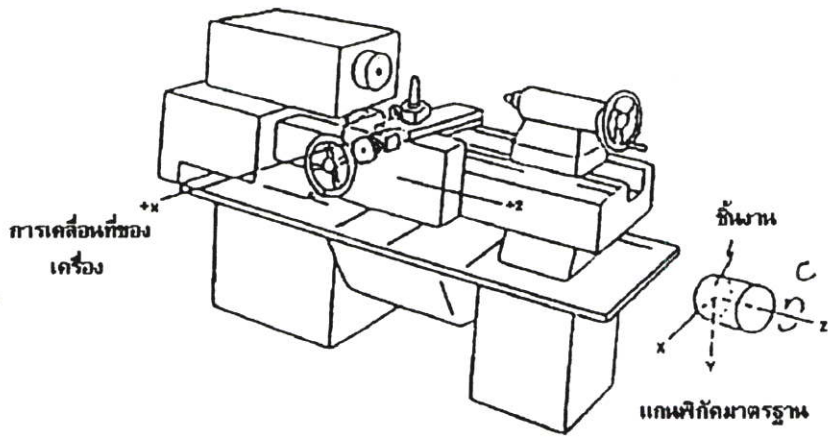
แกนเสริมเป็นแกนที่ช่วยให้อธิบายการเคลื่อนที่อื่นๆ นอกเหนือจากแกนพิกัดและแกนหมุน



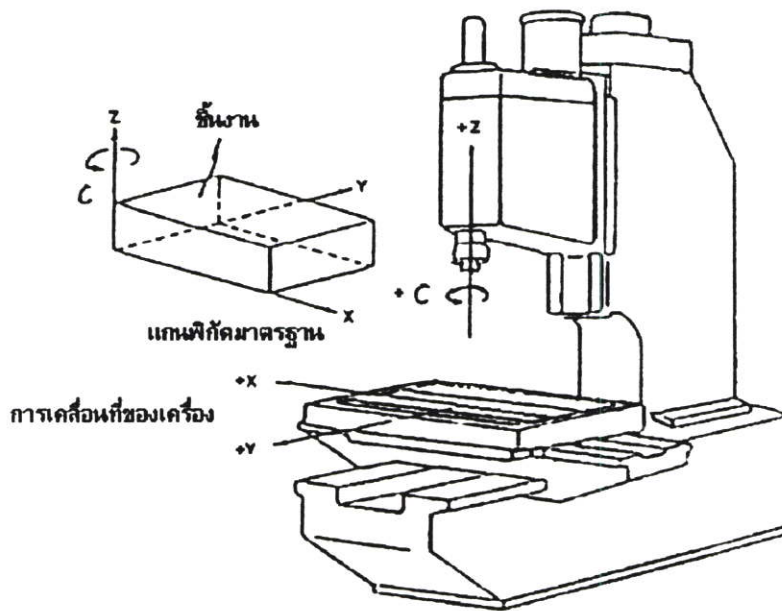
รูปที่ 3.1 ระบบพิกัดตั้งฉาก



รูปที่ 3.2 ระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา



รูปที่ 3.3 แกนพิกัดของเครื่องกลึง



รูปที่ 3.4 แกนพิกัดของเครื่องกัด

Wire Cut EDM จะใช้ระบบการควบคุมเชิงตัวเลข โดยคอมพิวเตอร์ระดับต่ำสุด ซึ่งจะต้องโปรแกรมควบคุมทั้งสองแกน คือ แกน X และแกน Y โดยในแนวรวมทางซ้ายไปขวา เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานในอยู่ด้านหน้าของแกน Y จะกำหนดการเคลื่อนที่ ในแนวราบจากด้านหน้าไปด้านหลัง แกน Z จะเป็นระยะทางเคลื่อนที่ในแนวตั้งซึ่งสามารถปรับระยะหัวตัดที่ล้อมเส้นลวดให้สูงขึ้นหรือต่ำลง

เมื่อไม่นานมานี้ บริษัท AGIE USA Ltd.; Addison, IL ได้มีเอกสารเผยแพร่ Wire Cut EDM อายุการใช้งาน 5,000 ชั่วโมง ในรายงานของ AGIE ซึ่งชี้ให้เห็นว่าขบวนการ EDM จะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสูงจากขบวนการ EDM ซึ่งส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน เศษวัสดุจะถูกนำออกจากชิ้นงานโดยการควบคุม Electrical spark ซึ่งเกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องจักร และปล่อยความร้อนออกจากเส้นลวดคัตนำสู่ชิ้นงาน ชิ้นงานทำจากวัสดุแข็งและสามารถนำไฟฟ้าได้ดี จะไม่มีรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เส้นลวด) และจะไม่มีแรงที่กระทำระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานจะถูกบังคับให้ห่างกันโดยประมาณ โดยการควบคุมของเครื่องจักร ช่องว่างนี้จะมีของเหลวที่กักอยู่เพื่อเป็นฉนวน ของเหลวที่กักนี้มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากบริเวณที่เกิดการสปาร์ค และจะช่วยกำจัดเศษวัสดุที่ตัดออกจากผิวชิ้นงาน

เมื่อความต่างศักย์ DC จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจ่าย มาครั้งแรกจะไม่มีกระแสไฟฟ้า ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน เพราะเป็น ฉนวนระหว่างผิวชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อ ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดฉนวนแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ ไปยังประจุตรงข้ามกับตัวมัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลทำให้เกิดความร้อน และแรงดันมหาศาล ในที่สุดส่วนของวัสดุชิ้นงานจะถูกหลอม และทำให้เป็นไอทิ้งไว้เพียง Crater บนผิวชิ้นงานความร้อนกับแรงดันจะหมดไปการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามันไม่ง่ายนัก ที่กระแสไฟฟ้ามาตัดชิ้นงานออกจากกัน จะต้องมีการควบคุมการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าให้เป็นจังหวะ จึงจะทำให้ขบวนการ EDM ทำงานได้ผลดี

ช่วงแรกจะเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะเมื่อนานขึ้นความร้อนไม่สามารถทำให้วัสดุระเหยกกลายเป็นไอได้ดี ทั้งนี้เพราะสาเหตุจากการเกิด Crater และวัสดุที่หลอมเหลว AGIE ได้อธิบายถึงข้อดีของ EDM ว่ามีความแม่นยำสูง มันสามารถตัดได้ละเอียดมาก โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm สามารถตัดวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ทุกชนิดไม่ว่าเครื่องมือเหล็กชุบแข็ง Tungsten carbide วัสดุงานรีดร้อน ภายนอกเป็นเซรามิก CNB (Cubic Boron Nitride) และ PCD (Poly Crystalline Diamond) สามารถใช้ผลิตเครื่องใช้ Punch และ Dies เป้าหลอมและอะไหล่ที่ต้องการความละเอียดสูงทั้งในระบบ 3 มิติ เช่น ทำแบบพิมพ์อัดของเหลว ใบบัด เครื่องจักรไอน้ำ เพื่อองภายนอกและเพื่องภายใน และแบบพิมพ์ที่รับซ้อนได้

EDM ยังสามารถทำงานได้เร็วโดยใช้การกระทำเพียง 2-3 อย่าง แต่ก็มีเครื่องจักรหลายแบบที่สามารถตัดวัสดุได้เร็วกว่า EDM ซึ่ง EDM จะตัดได้ช้ากว่าการเจาะ เพราะ การทำเกลียว และการใช้เทคนิคใหม่ๆ เช่น การใช้ Laser ในการตัด แต่เครื่อง EDM สามารถกำจัดขั้นตอนต่างๆ ได้โดยใช้เพียงเครื่องเดียว และทำงานต่อเนื่องกัน

น้ำเป็นฉนวนจะแตกออกเป็นละออง และเป็นฉนวนที่ใช้ในการตัดด้วย EDM มีหลายๆสาเหตุที่ต้องใช้น้ำ คือ มันสามารถตัดวัสดุได้อย่างรวดเร็ว สามารถทำให้เครื่อง EDM เย็นลงได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งการขาด แรงดันไฟฟ้า ดังนั้น ประกายไฟแคบๆ ที่ใช้ตัดวัสดุในระบบ EDM จึงต้องการฉนวนที่มีความหนืดต่ำ เพื่อที่จะสามารถทำการชะล้างได้เพียงพอ (ชะล้างเศษวัสดุเล็กๆ ที่

เกิดจากการตัด) น้ำที่แตกออกเป็นละอองจึงมีความจำเป็นสามารถส่งผ่านความร้อนจากบริเวณที่ทำการตัดได้ง่ายกว่าน้ำมันซึ่งส่งผลให้ผนังผิวหน้าวัสดุเย็นลง ผู้ใช้เครื่องตัดไฟฟ้า EDM จะต้องใช้เวลาในการตัดกับเครื่องนานมากอาจเป็นวัน เป็นสัปดาห์ หรือมากกว่านั้น การใช้วิธีลดประจุไฟฟ้าของน้ำ เพื่อป้องกันการไหม้ที่เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงๆ การทำจนวนไฟฟ้าโดยใช้การลดประจุไฟฟ้าของน้ำ จะทำการนำน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จะทำการโดยการกรองน้ำที่ใช้แล้วผ่านกระดาษกรองที่มีช่องขนาด 5  $\mu\text{m}$  หรืออาจจะใช้ Filter ซึ่งสามารถกรองสารที่มีขนาดเล็กๆ น้ำที่ผ่านกระดาษกรองแล้วจะถูกทำการปรับพิถกความต้านทาน (Resistivity) โดยผ่านกระบวนการขังประจุ เพื่อลดประจุไฟฟ้าของน้ำ

การป้อนข้อมูลระบบปุ่มเดียว (One touch programming) CNC Wire Cut EDM ได้ทำให้เกิดการพลิกโฉมหน้าอุตสาหกรรมครั้งใหญ่ โดยวิธีการตัดที่รวดเร็ว เที่ยงตรง และสามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งให้เป็นรูปร่างต่างๆ ที่มีความซับซ้อนได้อย่างดี อย่างไรก็ตามเครื่อง CNC Wire Cut EDM ก็ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ควบคุมซึ่งต้องมีความรู้ความชำนาญทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งป้อนข้อมูล และรหัสโดยใช้ KEYBOARD Wire Cut EDM รุ่น DS-2 ของ Hansvedt ประกอบด้วย CNC ซึ่งผู้ควบคุมสามารถทำความเข้าใจและใช้งานได้ โดยจอภาพจะเขียนบรรยายด้วยภาษาอังกฤษและระบบ Software ภายในจะแสดงตัวเลือกสำหรับการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ให้ผู้ใช้เลือกใช้งานได้อย่างสะดวก ข้อแตกต่างจะเห็นได้ชัดเจนระหว่าง Wire Cut EDM รุ่น DD-2 กับ CNC รุ่นอื่นคือไม่ใช้ KEYBOARD จะใช้คอมพิวเตอร์ เพียงแค่ปุ่ม (A single knob) ก็สามารถควบคุมการทำงานได้ ซึ่งแต่ก่อนต้องอาศัยการป้อนโปรแกรมด้วยมือให้เครื่องทำการตัดชิ้นงานส่วนใน ทิศทางแกน X-Y ทั้งหมด การควบคุมแบบปุ่มเดียว (One-knob) ของ Hansvedt มีหลักการเคลื่อนที่พื้นฐานอยู่ 5 อย่างคือ การหมุนตามเข็มนาฬิกา การอยู่กับที่ การกดและหมุน ทิศทางตามเข็มนาฬิกา การกดและทิศทางทวนเข็มนาฬิกา การใช้การเคลื่อนที่ทั้ง 5 แบบนี้ ผู้ใช้เครื่องจะใช้การเลื่อนเคอร์เซอร์เพื่อเลือกเอาตัวเลือกในรายการ หรือใช้อักษร และตัวเลขหรือชุดของชิ้นงานก็ได้

ระบบปฏิบัติการของเครื่อง DS-2 ทั้งหมดจะประกอบด้วยจอภาพที่แสดง 15 แบบ คือ

Main Menu

Load Program

Program Directory

การสร้างโปรแกรม (Create Program)

รูปแบบการป้อนข้อมูล (Input Pattern)

การตั้งระบบจ่ายไฟ (Power Supply setting)

การจัดการและการแก้ไขโปรแกรม (Edit Program)

Wire Offset

Rotate Rescale Mirror

การใส่รูปแบบของข้อมูล (Pattern Data)

การแก้ไขรูปแบบ (Edit Pattern)

การตั้งและการตัด (Setup-cutting)

การใส่จุดศูนย์กลางของการเจาะรู การเก็บขอบ (Job Edge Hole Centering)

Trace

การตัด (Cut)

การปรับค่าพารามิเตอร์ (Operating Parameter Adjust)

การใช้เครื่อง Wire Cut EDM หน้าจอเมื่อเรียก Main Menu จะแสดงตัวเลือก 4 ตัวเลือก คือ Load Program การสร้างโปรแกรมใหม่ (Create Program) การแก้ไขโปรแกรมเก่า (Edit Program) การตั้งและการตัด (Setting/Cut) การหมุนปุ่มความเข้มหรือทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นการเลื่อน cursor เพื่อเลือกตัวเลือกทั้ง 4 นี้ ถ้ากดปุ่มจะเป็นการเลือกให้แสดงหน้าต่างต่อไป ซึ่งวิธีการหมุนและการกดปุ่มเพื่อเลือกดังเลือกบนหน้าจอจะต้องใช้ชื่อยุติเวลาในการทำงานทั้งหมด

การเขียนโปรแกรมในเครื่องรุ่น DS-2 ง่ายมากคำสั่งบนหน้าจอจะบอกให้ทราบว่า จะต้องทำอะไร เช่น ให้ชื่อโปรแกรม เลือกหน่วยหรือมิลลิเมตร ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างที่จะตัด แล้วการโปรแกรมโดยใช้เลขบรรทัด (Line Number) ก็จะถูกกำหนดโดย Software ของเครื่องโดยอัตโนมัติ รหัสตัวเลือกของการเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรง ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทิศทางตามเข็มนาฬิกา การหยุดชั่วคราว (Pause) หรือการเลิกทำงาน (Stop) จะถูกเลือกโดยการกดปุ่มพิมพ์ตัวเลขสำหรับใส่ค่าของจุด Coordinate X-Y ทันทีที่มีการใส่ค่าจุดหนึ่งเสร็จ cursor ก็จะเลื่อนไปยังตำแหน่งถัดไปหน้าจอโดยอัตโนมัติ เมื่อป้อนโปรแกรมเข้าไปแบบที่ถูกตัดก็จะถูกทำการขยับเพื่อปรับขนาดเป็นการปรับมาตราส่วน(Rescale)

ในหน่วยการตั้งค่าต่างๆ ปุ่มใส่ค่าของคอมพิวเตอร์ กลายเป็น อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของแกน X และแกน Y เป็นการลดตำแหน่งและหมุนของปุ่ม การคลายปุ่มจะสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวโดยการเพิ่มขึ้นทีละ 0.0025 mm ความเร็วสูงสุดของการหมุนจะเกิดขึ้นค่าปุ่มหมุน หมุนเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของโต๊ะงาน และจะหยุดเมื่อปุ่มถูกปล่อย (ด้วยแรงของสปริง)

ตัวจ่ายพลังงานจะถูกตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้า หรือปรับโดยปุ่มรับข้อมูลของ คอมพิวเตอร์ เมื่อเครื่องจักรถูกตัด โดยสิ่งนี้จะทำให้สามารถปรับค่าความละเอียดของการตัดสูงสุด ถึงแม้ว่า DS-2 จะแทนที่เครื่องมือ เครื่องจักรในลักษณะเป็น “สิ่งแวดล้อมของคอมพิวเตอร์” ที่แรกการทำงานของ CNC ไม่สามารถบังคับโดยแป้นพิมพ์ได้ รหัสของคอมพิวเตอร์และรูปแบบของคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเจ้าของจะต้องหมั่นใช้เครื่อง Wire Cut EDM ของเขาและควรเข้ารับการอบรมในระยะเวลาสั้นๆ DS-2 มี 2 แกนได้รับการปรับปรุงในเรื่องระบบ EDM Electrodes วัสดุที่ไม่ต้องการ



### 3.1.2 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM มีโครงสร้างประกอบที่คล้ายกับ Mill Machine มากคือ บนฐานที่เรียกว่า Bed จะมีองค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แท่น (Table) และเสาตั้ง (Column) ประกอบติดอยู่ เสาตั้งนี้จะทำหน้าที่ประคองส่วนบน (Head) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าประกอบติดตั้งอยู่ ถ้าฐานดังกล่าวนี้ไม่มั่นคงแน่นอนหาเพียงพอ ส่วนประกอบต่างๆ เหล่านี้อาจจะขาดความละเอียดไปด้วย ถ้า Head ไม่มั่นคงพอเครื่องก็ไม่สามารถทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

ส่วนที่เป็นส่วนประกอบเคลื่อนที่ การที่จะทำการขึ้นรูปงานที่มีรูปทรง 3 มิติได้นั้น อย่างน้อยก็จำเป็นต้องมีองค์ประกอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ สำหรับเครื่อง EDM นั้น โดยทั่วไปแผ่นซึ่งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ X-Y และมี Head เคลื่อนที่บนเสาตั้งในแนวแกน Z ซึ่งตั้งฉากกับผิวระนาบ X-Y

วิธีการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีหลายอย่าง แต่ในปัจจุบันจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ระบบ CNC ดังนั้นส่วนมากจึงใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า อนึ่งสมรรถนะขององค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งรวมถึงตัวนำ (Guide) ด้วยนั้นจะเป็นปัจจัยในการกำหนดระดับความละเอียดของเครื่องจักร

ถึงขั้นรูปสำหรับบรรจุสารละลาย ลักษณะจำเพาะอย่างหนึ่งของเครื่อง EDM คือ ใช้สารละลาย (การขึ้นรูปในของเหลว) ที่จะให้ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าความต้านทานของฉนวนสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการเติมสารละลายนี้ไว้ ถึงขั้นรูปดังกล่าวนี้จะมีหน้าที่ทำหน้าที่ ปรับระดับผิว ของสารละลาย เพื่อที่จะปรับตั้งระดับความสูงของชิ้นงาน

ถึงส่งถ่ายสารละลาย เป็นถึงสำรองเพื่อคอยส่งจ่ายสารละลายไปยังถึงขั้นรูปประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ปัมส่งจ่าย ฟิลเตอร์สำหรับกรองเศษผงโลหะ ในกรณีที่เป็นอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบบหล่อเย็นสารละลาย เพื่อป้องกันมิให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป จนเกินไป บางเครื่องอาจจะมีอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ATC (อุปกรณ์ระบบเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ) อุปกรณ์แกน C เครื่องมือช่วยเหลือการติดตั้งขั้วไฟฟ้า

### 3.1.3 เครื่อง Wire Cut EDM

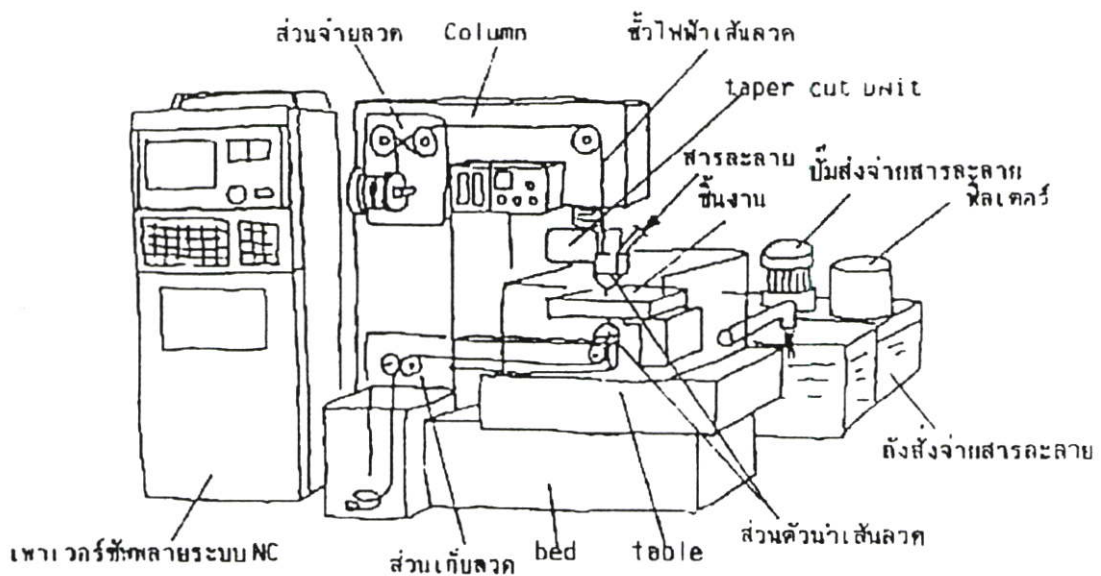
เป็นเครื่อง EDM ชนิดหนึ่งที่ใช้เส้นลวดขนาดเล็กเป็นขั้วไฟฟ้าและมีระบบ CNC สำหรับควบคุมตัวชิ้นงานให้เคลื่อนที่ ในลักษณะเช่นเดียวกับการวาดรูป เพื่อตัดเอาส่วนที่เป็นรูปออกไป เครื่องนี้ได้ประยุกต์มาจากเครื่อง EDM ประเภท Die sinking การวาดรูปที่แกน X-Y เคลื่อนที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 2 แกน จึงต้องการอุปกรณ์ระบบ CNC ไว้สำหรับการควบคุม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าถ้าไม่มีการพัฒนาอุปกรณ์ระบบ CNC ขึ้นมา เครื่อง Wire Cut EDM ก็ไม่สามารถกำเนิดขึ้นมาได้

เครื่อง Wire cut EDM รูปที่ 3.6 ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การขึ้นรูปพื้นเพื่อง นอกจากนั้นแล้ว การใช้อุปกรณ์ระบบ CNC ควบคุมการเรียงของลวดก็สามารถใช้งานขึ้นรูปประเภทเอียง (Taper) หรืองานขึ้นรูปที่มีรูปทรงบนล่างต่างกันได้อีกด้วย รูปที่ 3.6.1

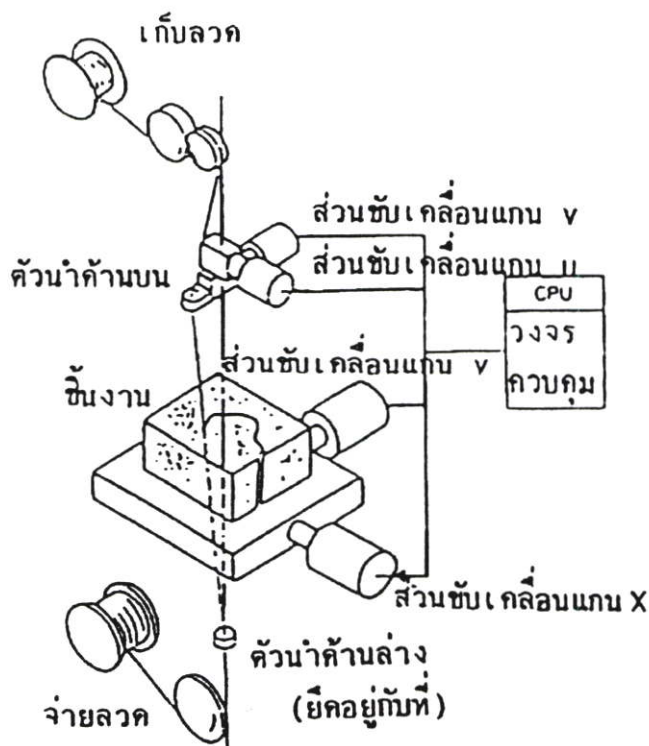
ตัวเส้นลวดของ เครื่อง Wire EDM จะมีการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการสปาร์ก ดังนั้นลวดที่ใช้ไปครั้งหนึ่งแล้วจะถูกทิ้งไปเลย

โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง Wire Cut EDM นั้นเกือบจะเหมือนกันกับเครื่อง EDM ประเภท Die sinking แต่เนื่องจากว่าใช้ลวดเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมประกอบ ติดอยู่ที่เสาด้วย

ส่วนป้อนลวด	ทำหน้าที่ส่งป้อนลวดออกมาและควบคุมแรงดึงของเส้นลวด
ส่วนที่ม้วนเก็บลวด	ทำหน้าที่ม้วนเก็บรวบรวมลวดที่ใช้งานแล้ว และควบคุมความเร็วของเส้นลวด
ส่วนที่เป็นตัวนำลวด	ทำหน้าที่ประคองรักษาเส้นลวดเป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับพัลส์การสปาร์ก การไหลของสารละลาย
Taper Cut Unit	อุปกรณ์การเสริมสำหรับการขึ้นรูปประเภทขึ้นงานเอียง (Taper)
AWT (Automatic Wire Threader)	อุปกรณ์การต่อลวดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 เครื่อง Wire Cut EDM



รูปที่ 3.6.1 หลักการตัดขึ้นรูปแบบ Taper

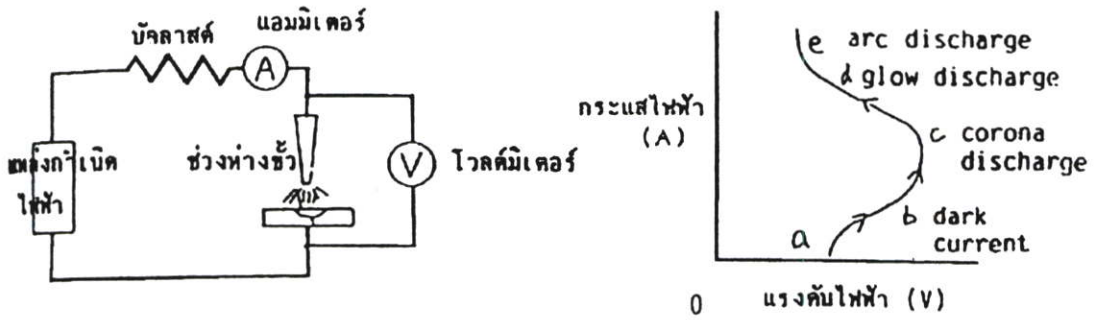
### 3.2 ปราบการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ กั้นกลางอยู่จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ จึงหมายถึง การฝืนบังคับทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน

สำหรับปรากฏการณ์การสปาร์กที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั้น คือ “ฟ้าผ่า” นอกจากนั้นแล้วเวลาที่ถอดเสื้อเสวตเตอร์ในช่วงฤดูหนาว ซึ่งอากาศแห่งนั้นก็มักจะเกิด การสปาร์ก ที่มีเสียงดังเกิดขึ้นด้วย

การทำให้เกิดการสปาร์กโดยมนุษย์สร้างขึ้นและ นำมาประยุกต์ใช้งานนั้นได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปรากฏการณ์การสปาร์กในสูญญากาศ และนำหลักการดังกล่าวนี้ มาประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมนั้นได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ก (เครื่อง EDM)



รูปที่ 3.7 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ก

รูปที่ 3.7 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์ก ระดับพื้นฐานที่สุดอันดับหนึ่ง โดยการสร้างวงจรสปาร์กแบบง่ายๆ ดังรูป และทำให้เกิดการสปาร์กขึ้นในอากาศ

#### ก. สภาพที่กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล (Dark current)

คือ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (E) ดังเช่น ในวงจรรูปที่ 1 ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาดเล็กมากประมาณ  $10^{-8}$  -  $10^{-11}$  A

#### ข. การสปาร์กแบบโคโรนา (Corona discharge)

คือ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า บางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) ซึ่งเป็นสภาพการสปาร์กที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

#### ค. การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow discharge)

คือ การที่บริเวณส่วนที่เกิด การสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์กที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก หลอดนีออนต่างๆ ที่ใช้ตกแต่งในยามค่ำคืนก็อาศัยหลักการของการสปาร์กแบบ

#### ง. การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc discharge)

คือ หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์กแบบโกลว์ได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้วการสปาร์กจะเข้าสู่สภาวะขั้นตอนสุดท้าย (d-e) ซึ่ง หมายถึง การสปาร์กแบบอาร์ค สภาพการสปาร์กแบบนี้ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ก ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมพลังงานก่อนที่จะเข้าสู่สภาพการสปาร์กแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปนั้นเป็นสภาพการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกชั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current) จนถึงสภาพของการสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะมีช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆราว  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-5}$  วินาทีและยิ่งไปกว่านั้นความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าถึง  $10^{14} - 10^{19}$  A/cm<sup>2</sup> ดังนั้นเราจึงทราบกันว่าการสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะปลดปล่อยพลังงานที่มีระดับสูงมากออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ

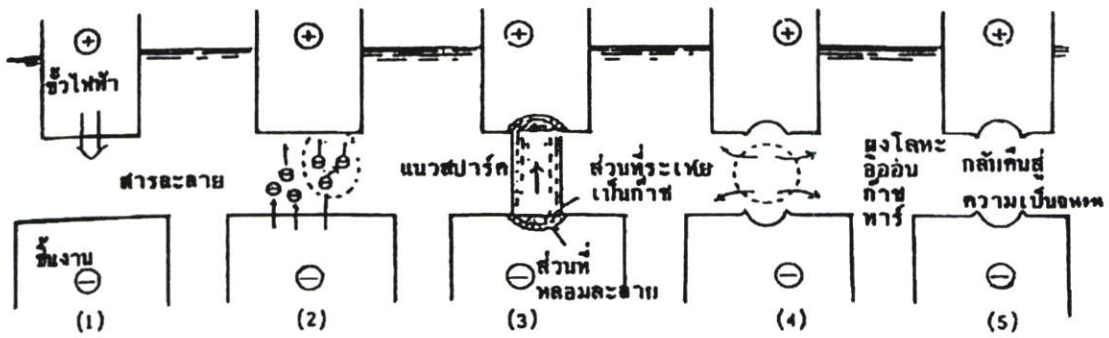
### 3.2.1 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบเทียบ วิธีการขึ้นรูปแบบนี้ได้เสมือน “การสปาร์คในช่องว่างแคบๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป” สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำในสารละลายโดยใช้ลวดทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปไปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็ง เพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกัน เหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์คแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ อาศัยการใช้พลังงานระดับสูง ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาช่วงเวลาสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก สำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

ในการการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ละครั้งของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 สภาพการสปาร์คแต่ละครั้ง

ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60-280V) ที่ระหว่างขั้วงานกับ ขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมันเพื่อที่จะรักษา ให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้มีค่าสูงขึ้น ก็จะทำให้สามารถลดระยะ ระหว่างขั้ว(ช่องว่างการสปาร์ค)ให้แคบลงได้ ซึ่งจะผลิตในการขึ้นรูปที่มีความ ละเอียดสูง

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อชั้นระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่ง สารละลายจะเกิดการ สูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึง ไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

ค. สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสีย ความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่ม ไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการ สปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มี ความหนาแน่นสูงมากเป็นช่วงเวลาสั้นๆ มีขนาด ตั้งแต่ 0.1 A จนถึงหลายร้อย A จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้น มาก (3000°C ขึ้นไป) จนบางส่วนของขั้วงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้ว สารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

ง. เ็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการสปาร์ค จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของขั้วงาน หลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลาย รอบข้างดูดซับความร้อนไปก็จะเย็นตัวลง อย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ

จ. กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์ค หนึ่งครั้งแล้วจบลงแล้วจะรองจนกว่า สารละลายจะ กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วย

ป้องกัน การเกิดสปาร์กแบบผิดปกติ เช่น สปาร์กซ้ำ ภายหลังที่กลับคืนสู่ ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์ก เช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก ก.

การสปาร์กซ้ำ คือ การสปาร์กที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่ สภาวะแวดล้อมของการสปาร์กเลวลง อาจเกิดการสปาร์กขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ก ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ก เนื่องจากว่า การสปาร์กประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์นอกเหนือการควบคุม จนไม่อาจถือได้ว่าเป็นสภาพการสปาร์กที่เหมาะสมได้

ข้อควรคิด :

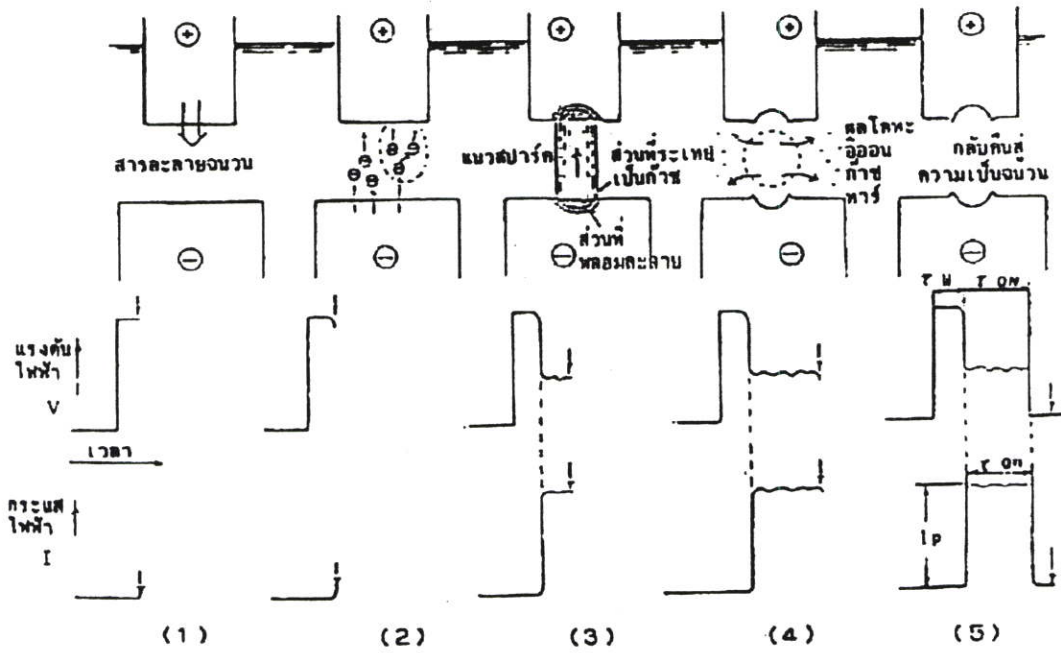
เวลาที่เกิดการหลอมละลายในช่วง ค. ทั้งๆที่ชิ้นงานหลอมละลาย แต่ทำไมที่ขั้วไฟฟ้าจึงไม่หลอมละลาย

ในฐานะของธาตุเหล็ก (Fe) มีจุดหลอมเหลวที่  $1,539^{\circ}\text{C}$  ทองแดงมีจุดหลอมเหลวที่  $1,083^{\circ}\text{C}$  แต่ในความเป็นจริงแล้ว วัสดุประเภทเหล็กกล้า จะมีคาร์บอนผสมอยู่ จึงทำให้เกิดจุดหลอมเหลวต่ำลงส่วนขั้วไฟฟ้านั้นทำมาจากทองแดงผสมจึงทำให้จุดหลอมเหลวยิ่งต่ำลงไปอีก แต่อย่างไรก็ตามขั้วไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ทองแดงจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ดังนั้นถ้าลองคิดตามธรรมดาแล้ว เมื่อได้รับความร้อนสูงจากการสปาร์กแล้ว ขั้วไฟฟ้าก็ควรหลอมละลายก่อน ซึ่งหมายถึงว่า การสึกหรอจะรุนแรงกว่า

ถ้าลองสังเกตขั้วไฟฟ้าหลังจากที่ใช้งานขึ้นรูปเสร็จสิ้นลงแล้ว จะทราบได้ว่า บริเวณที่เกิดการสปาร์กจะมีเขม่าจับเป็นสีดำ เขม่าเหล่านี้เกิดขึ้นโดยคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารละลายประเภทน้ำมัน เมื่อถูกความร้อนสูงจนสลายแยกตัวออกมาเกาะติดอยู่ที่บริเวณขั้วไฟฟ้า คาร์บอนเป็นธาตุที่มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำมาก คือ  $0.057\text{cal/cm}\cdot\text{sec}$  การที่คาร์บอนเกาะติดบนผิวของขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดการกีดขวางการนำความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นจากการสปาร์ก ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่าคาร์บอนเหล่านี้จะทำหน้าที่คุ้มครองผิวของขั้วไฟฟ้าจากความร้อนสูง สิ่งทีกล่าวมานี้ก็อาจนับได้ว่าเป็นเรื่องแปลกมากเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก

### 3.2.2 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ในที่นี้เราจะมารู้กันถึงว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเช่นไร รูปที่ 3.10 ต่อไปนี้จะนำรูปร่างคลื่นของพัลส์ในการสปาร์ก (รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้า) มาประกอบรวมอยู่ในรูปก่อนหน้า



รูปที่ 3.9 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

ก. ไล่แรงดันไฟฟ้า

ก่อนอื่นจะมีการไล่แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าไร้โหลด (no-load voltage) (ประมาณ 60-80 V) ในสภาพเช่นนี้ ขั้วยังคงรักษาความเป็นฉนวนได้อยู่ จึงไม่มีการแสไหล

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงาน (ทำให้ระยะระหว่างขั้วแคบลง) จนถึงระยะหนึ่ง จะเกิดสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเริ่มไหล กล่าวคือเริ่มมีกระแสไหล

ค. สปาร์ค,หลอมละลาย

เมื่อการสปาร์คเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้ว จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง  $E = I.R$  ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกกันว่าแรงดันไฟฟ้าสการสปาร์ค (discharge voltage)

ง. เย็นตัว

ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลในระดับค่าๆ หนึ่ง แต่ทว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา แรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

### จ. กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

เมื่อการสปาร์คเสร็จสิ้นลง ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จะกลับกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวาดรูปร่างของคลื่นในการสปาร์คได้ดังรูปดังกล่าวนี้

#### พารามิเตอร์ที่สำคัญ

เวลาในการสปาร์ค $\tau_{on}$	= เวลาที่กระแสการสปาร์คไหล
เวลาหยุดการสปาร์ค $\tau_{off}$	= เวลาตั้งแต่สปาร์คเสร็จจนถึงใส่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอีกครั้งถัดไป
ค่ากระแส peak $I_p$	= ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า

เวลาจนถึงเริ่มเกิดการสปาร์ค (เวลาที่มีแรงดันไฟฟ้าไว้ไหลคอยู่) เรียกว่า “เวลารอการสปาร์ค” แทนด้วย “ $\tau_w$ ” ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะระหว่างขั้ว แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานของฉนวนสารภายในตอนนั้น

$I_p$ ,  $\tau_{on}$ ,  $\tau_{off}$ , แรงดันไฟฟ้าไว้ไหล (V) เป็นพารามิเตอร์ ที่ผู้ปฏิบัติการจะกำหนดตั้งขึ้นตามแต่ละสถานะในการขึ้นรูป ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมากในการกำหนดระดับของพลังงานการสปาร์คเมื่อเปรียบเทียบกับในหมู่พารามิเตอร์ต่างๆ ของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ซึ่งมีจำนวนมาก

ขอบเขตของการกำหนดตั้งค่าต่างๆ เกี่ยวกับเพาเวอร์ซัพพลาย NC สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ที่บริษัทโซคิกส์ไอซ์ยู (MARK 10) มีดังนี้คือ

$I_p$  = ประมาณ 0.1-50A , แรงดันไว้ไหล = ประมาณ 60-120 V

$\tau_{on}$  = 1-2,500  $\mu$ sec (EDM) , 0.5-5  $\mu$ sec (wire cut)

$\tau_{off}$  = 3-250  $\mu$ sec (EDM) , 1-25  $\mu$ sec (wire cut)

< ข้อมูลประกอบ > 1  $\mu$ sec = 1/1,000 msec, 1 msec = 1/1,000 sec

เพราะฉะนั้น 1  $\mu$ sec = 1/1,000,000 sec

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงเงื่อนไขของการขึ้นรูปที่ใช้ในงานปฏิบัติจริง (โปรดดูรูป 3.10 ประกอบ)

C170 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในการขึ้นรูปของการขึ้นรูปชิ้นงาน รูปหยาบ (roughing) C300 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในเงื่อนไขของการขึ้นรูปละเอียด (finishing) เงื่อนไขทั้งสองนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลเท่ากัน แต่การขึ้นรูปหยาบจะใช้ที่ยาว 350  $\mu$ sec ในขณะที่การขึ้นรูปละเอียด ใช้เพียง 12  $\mu$ sec ซึ่งสั้นกว่าดังนั้นค่าเฉลี่ยของกระแสในการขึ้นรูปหยาบคือ 14 A และสำหรับการขึ้นรูปละเอียด คือ 1A

พลังงานการสปาร์คที่ช่วยในการขึ้นรูปนั้น มีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดกระแส  $I_p$  กับ เวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$  จากตัวอย่างที่ข้อมานี้ พลังงานของการขึ้นรูปละเอียด จะมีค่าเพียง 1/400 ของ การขึ้นรูปแบบรูปหยาบ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสในการขึ้นรูป  $I_p$  และเวลาในการสปาร์ค  $\tau_{on}$  จะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

เวลาหยุดการสปาร์ค  $\tau_{off}$  จะเป็นเวลาสำหรับการรอให้สารละลายกลับคืนสู่ความเป็น ฉนวน ซึ่งถ้าเวลานี้สั้นเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าไรโพลดสำหรับการสปาร์คครั้งถัดไปถูกอัดเข้ามา ในขณะที่ฉนวนยังไม่คืนสู่สภาพเดิม ซึ่งหมายความว่า ได้เริ่มการสปาร์คต่อเนื่องไป โดยไม่มี เวลาการสปาร์ค  $\tau_w$  การสปาร์ค เช่นนี้ เรียกกันว่า การสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ซึ่งไม่ เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดคั้ง  $\tau_{off}$  ให้ยาวจนเกินไป จำนวนของพัลส์การสปาร์คต่อ รอบเวลาจะลดลง ซึ่งก็คือ พลังงานการสปาร์คจะน้อยลง ทำให้ปริมาณที่ถูกตัดออกไปในการขึ้นรูป หรือความเร็วการขึ้นรูปลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปต่ำลงด้วย ดังนั้น จึงมีความ จำเป็นที่จะต้องกำหนดช่วงเวลาดังกล่าวนี้ให้เหมาะสมพอดี

ค่ากระแสในการขึ้นรูป  $I_p$  และเวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$  เป็นตัวกำหนดระดับพลังงาน การสปาร์ค ส่วน  $\tau_{off}$  นี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการ “ควบคุม” พลังงานการสปาร์ค

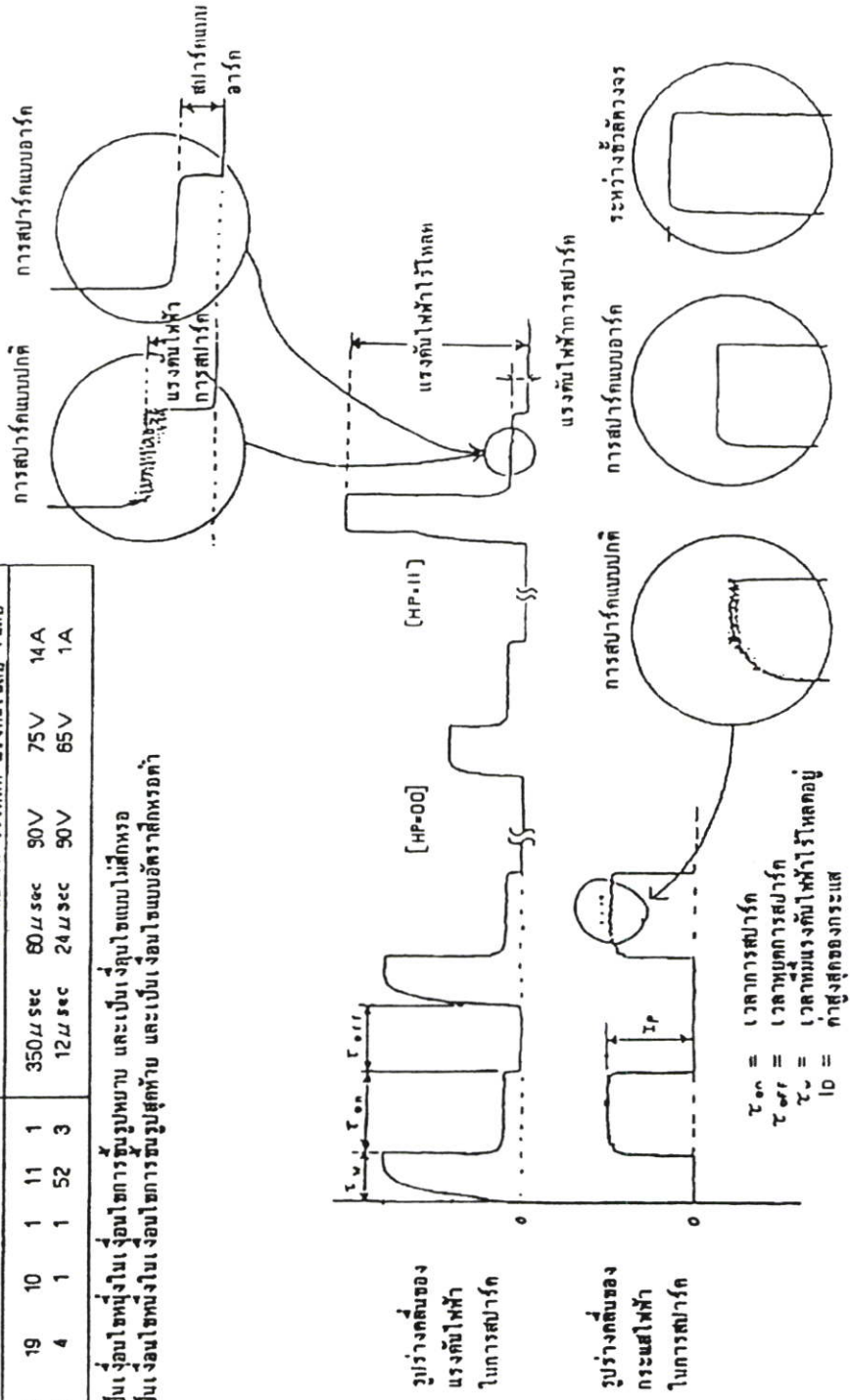
ในบางกรณี ถึงแม้ว่าสภาพการสปาร์ค ในการขึ้นรูปภายใต้ เงื่อนไขจะดำเนินผ่านมา ด้วยดีก็ตาม ถ้าหากว่าการขึ้นรูปได้ถูกดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ โดยที่ไม่สามารถขจัดเศษผงที่เกิดจาก การสปาร์ค หรือสิ่งเจือปนอื่น ซึ่งสลายตัวแยกออกมาจากสารละลาย โดยความร้อนออกจาก ระหว่างขั้วทั้งหมด ซึ่งทำให้เกิดการสปาร์คซ้ำอันเป็นการลดประสิทธิภาพการขึ้นรูปให้ต่ำลง หรือ อาจจะเปลี่ยนสภาพการสปาร์คไปเป็นแบบอาร์ค ซึ่งทำให้การขึ้นรูปไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ใน กรณีเช่นนี้ จะต้องยืดเวลา  $\tau_{off}$  ให้ยาวขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้มีเวลาพอที่ระหว่างขั้วจะกลับคืนสู่สภาพ ปกติ

การคอยสังเกตรูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว จะทำให้สามารถทราบถึง สภาพดังกล่าวได้ และหัวข้อปัญหาที่สำคัญ สำหรับเครื่อง EDM ในปัจจุบันนี้คือ การควบคุมการ ขึ้นรูปให้มีเสถียรภาพโดยการใช้อุปกรณ์ระบบ NC เพื่อควบคุมพัลส์การสปาร์ค ดังนั้น บริษัทที่ เกี่ยวข้องต่างๆ จึงกำลังพยายามเต็มที่ในการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ขึ้นมา

ตัวอย่างเงื่อนไขการชั่งรูปในงานจริง

เงื่อนไขการชั่งรูป	$\tau_{on}$	$I_D$	V	HP	HA	เวลาหยุด	แรงดันไฟฟ้า	กระแส
C170	19	19	10	1	11	1	350 $\mu$ sec	60 $\mu$ sec
C300	5	4	1	1	52	3	12 $\mu$ sec	24 $\mu$ sec
							90V	75V
							90V	65V
							90V	14A
							90V	1A

C17C เป็นเงื่อนไขที่ไม่ใช่เงื่อนไขการชั่งรูปพหุคูณ และเป็นเงื่อนไขแบบโมเสกหรือ  
 C300 เป็นเงื่อนไขของเงื่อนไขการชั่งรูปสุดท้าย และเป็นเงื่อนไขแบบอัตราสักรวดค่า



รูปที่ 3.10 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ก

### 3.2.3 วงจรสปาร์ค

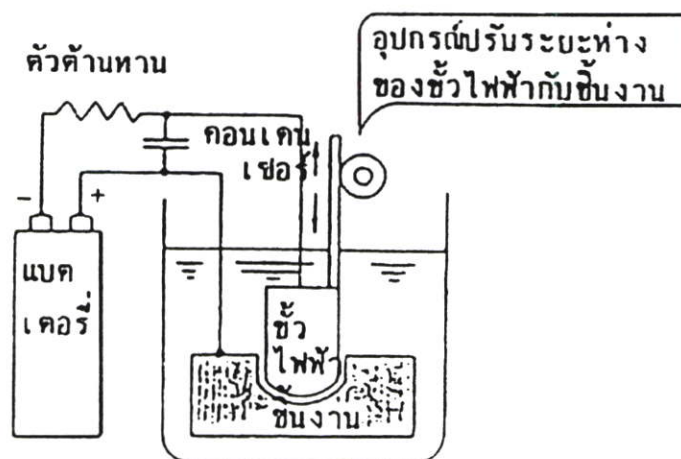
สำหรับงานวิจัยทางกายภาพเกี่ยวกับ ปรากฏการณ์การสปาร์คนั้น ได้มีผลงานหลายอย่างที่ถูกประกาศและนำออกมาตั้งแต่สมัยนานมาแล้ว โดยนักวิจัยจำนวนมากเช่น เช่น J.J.Thomson, Townsend, L.H.Paschen ฯลฯ แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีที่แน่ชัดก็ยังไม่ได้ถูกตั้งขึ้นมา แม้แต่ในปัจจุบันนี้ สาเหตุที่การหาทฤษฎีเพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์สปาร์คให้ถูกต้องแน่ชัด ยังเป็นปัญหาที่ยากอยู่นั้น เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้มีองค์ประกอบที่ไม่แน่ชัดมากเกินไปนั่นเอง (ปรากฏการณ์สปาร์คยังคงเป็นสิ่งที่เราไม่สามารถเข้าใจได้อย่างแจ่มชัด แม้ในปัจจุบันคั้งนั้น การสร้างเรื่อง EDM ซึ่งประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ที่ไม่ค่อยเข้าใจนี้ จึงเป็นงานที่ยากมาก)

อุปกรณ์ที่เป็นต้นแบบของเครื่อง EDM ในปัจจุบัน ได้มาจากการวิจัยของ ลาซาเรนโก้ (Lazarenko) ชาวรัสเซีย ในปี 1943

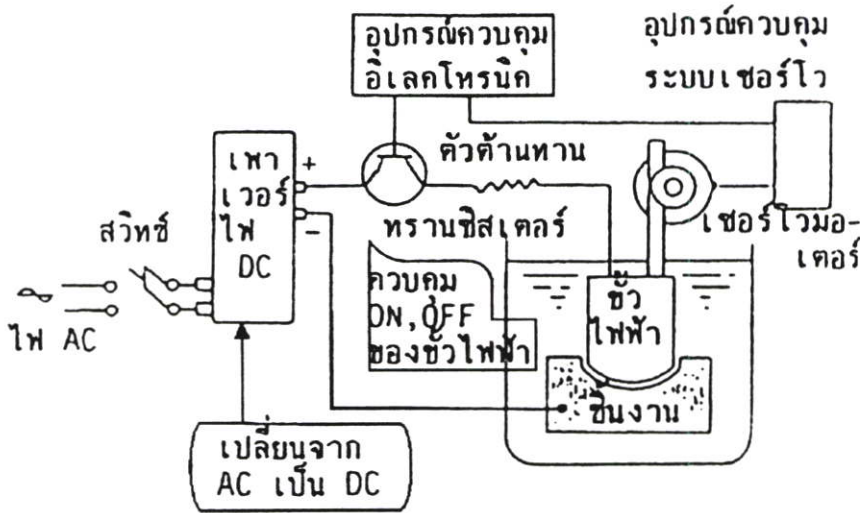
วงจรลาซาเรนโก้ นั้น ใช้ตัวต้านทาน (R) และคอนเดนเซอร์ (C) มาประกอบรวมกัน เพื่อควบคุม ON/OFF ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีชื่อเรียกกันว่า วงจร RC (หรือ วงจรลาซาเรนโก้) วงจรนี้ใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุประเภทเหล็กกล้า

ในสมัยการขึ้นรูปด้วยวงจรนี้ได้ถูกตั้งความหวังไว้ว่าจะเป็นวิธีการที่ดีเลิศสำหรับการขึ้นรูปโลหะประเภทแข็ง แต่วิธีนี้ยังมีจุดบกพร่องหลายจุดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแขนงพิเศษบางส่วนเท่านั้น โดยที่ไม่สามารถนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

จุดบกพร่องของวิธีนี้ได้แก่ เราไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขของการสปาร์ค(พลังงาน) โดยอิสระได้และความเร็วในการขึ้นรูปก็ช้ามาก รวมทั้งการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเป็นไปอย่างรุนแรง คั้งนั้น วิธีนี้จึงไม่สามารถที่จะขึ้นรูปโลหะด้วยความละเอียดที่ดีโดยอิสระได้ในสมัยนั้น



รูปที่ 3.11 การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คของลาซาเรนโก้

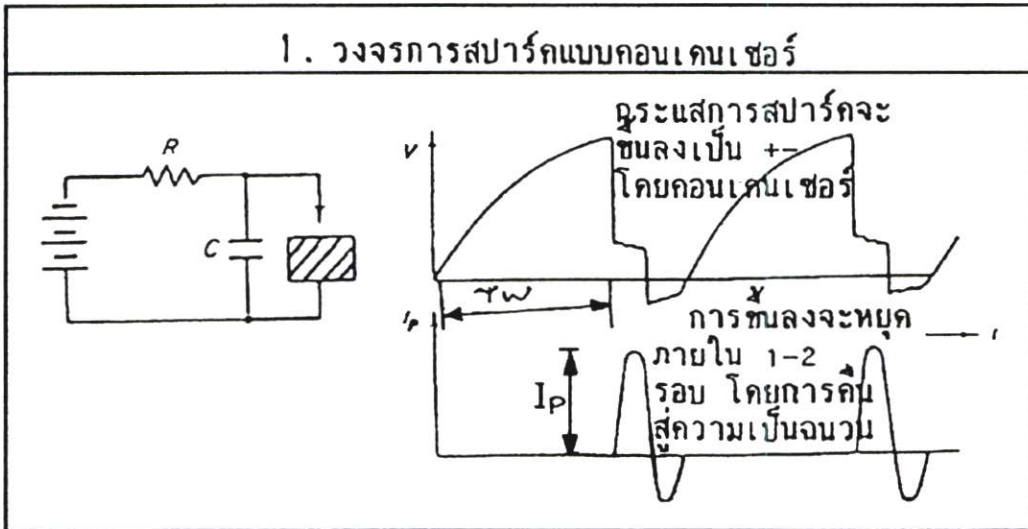


รูปที่ 3.12 วงจรของเพาเวอร์ซัพพลายระบบทรานซิสเตอร์

วงจรถาษาเรณโก้ ประกอบขึ้นด้วคอนเดนเซอร์และตัวต้านทานและเป็นวงจรที่ทําให้ เกิดการสปาร์คประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอนเดนเซอร์เพียงชั่วระยะหนึ่ง เมื่อระหว่างขั้วได้ระยะที่ จะทําให้เกิดสนามไฟฟ้าขนาดที่เหมาะสมระดับหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอนเดนเซอร์ ด้วยนั้นการสปาร์คก็จะมีขึ้น โดยที่ประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่อยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกปลดปล่อย ออกมาและเกิดปรากฏการณ์สปาร์คขึ้นที่ระหว่างขั้ว เมื่อการปล่อยประจุไฟฟ้าจบสิ้นลง แบตเตอรี่ก็ จะทําหน้าที่ชาร์ตประจุไฟฟ้าเข้าไปในคอนเดนเซอร์อีกครั้งหนึ่ง

ความเร็วในการชาร์ตประจุเข้าสู่คอนเดนเซอร์นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน (R) และ ค่าความจุของคอนเดนเซอร์ (C) เนื่องจากการเลือกค่าทั้งสองนี้ ซึ่งจะนำมาใช้งานในวงจรมีได้ นั้นมีขอบเขตจำกัด จึงมีจุดบกพร่องที่ว่าไม่สามารถควบคุมพลังงานได้อย่างอิสระได้

คราวนี้เราจะลองพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วในการขึ้นรูป ความเร็วในการขึ้นรูปนี้จะมี อิทธิพลอย่างมากในการคํานึงถึงประสิทธิภาพการผลิตและการลดต้นทุนการผลิต ความเร็วในการ ขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณที่สามารถขจัดออกไปได้ (ปริมาณการขึ้นรูป) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในกรณี ของการขึ้นรูปประเภทตัดได้นั้น ถ้าทําให้ปริมาณการตัดกลึงลงในชิ้นงาน ปริมาณการป้อนส่ง ของ มีดตัดมากขึ้น ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธี การสปาร์คนั้น ถ้าพลังงานการสปาร์ค ที่ระหว่างขั้วมีระดับสูงขึ้น ปริมาณของโลหะที่จะหลอม ละลายก็ควรที่จะมากขึ้น ซึ่งหมายความว่า ความเร็วในการขึ้นรูปก็ควรจะสูงขึ้นไปด้วยแต่ในความเป็นจริงแล้วจะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.13 คุณสมบัติพิเศษการสปาร์กของวงจรการสปาร์กแบบคอนเดนเซอร์ (วงจรลาซาเรโนโก้)

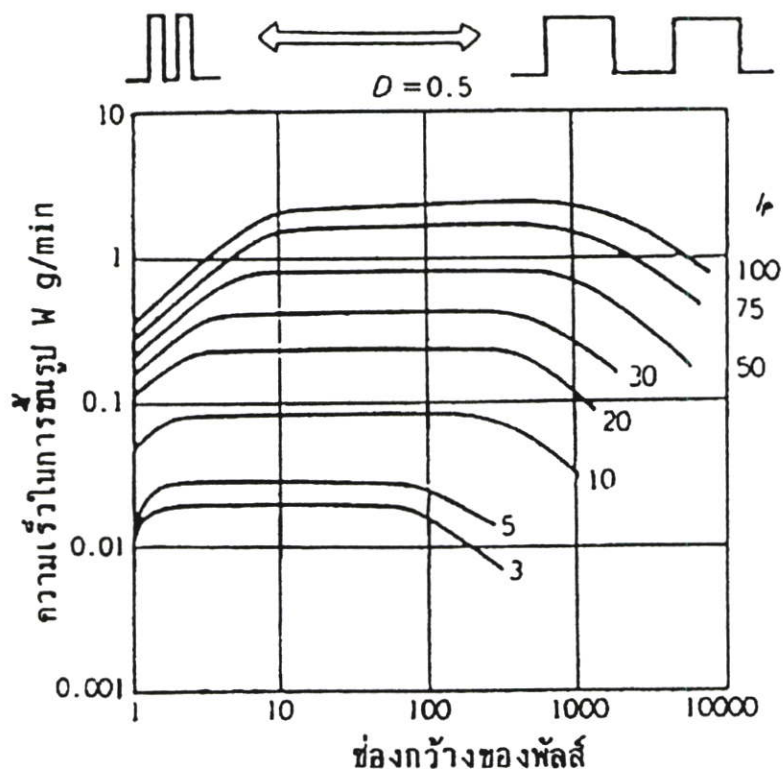
พลังงานการสปาร์ก จะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป  $I_p$  กับเวลาการสปาร์ก  $\tau_{on}$  ถ้าทำให้  $I_p$  มีขนาดใหญ่ หรือ  $\tau_{on}$  ยาวขึ้น พลังงานดังกล่าวนี้ก็จะมียกระดับสูงขึ้น

แต่ทว่าในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่า ส่วนที่เริ่มต้นของพัลส์การสปาร์ก (กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล) จะมีผลเกี่ยวข้องกับขึ้นรูป เราสามารถอธิบายสิ่งนี้ได้ว่า ถ้ากระแสไฟฟ้าเริ่มไหลอย่างรวดเร็ว แรงกระแทก (แรงดันการสปาร์ก) โดยการสปาร์กก็จะมากขึ้น ปริมาณโลหะที่หลอมละลายก็จะมากขึ้น และยังสามารถจัดเศษการขึ้นรูปให้กระจ่ายออกไปอย่างเพียงพออีกด้วย

ถึงแม้ว่าการกำหนดตั้งให้เวลาในการสปาร์ก  $\tau_{on}$  ยาวขึ้นก็ตาม แรงกระแทกโดยการสปาร์กจะไม่มากขึ้น ปริมาณโลหะที่หลอมละลายในการสปาร์กแต่ละลูกก็ไม่มากขึ้นและถ้า  $\tau_{on}$  ยาวจนเกินไป อาจจะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปลดต่ำลงอีกด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าถ้าต้องการให้ความเร็วในการขึ้นรูปสูงขึ้น เรามีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป  $I_p$  ให้ใหญ่ขึ้น และควบคุมบังคับให้เวลาการสปาร์ก  $\tau_{on}$  จบลงในช่วงเวลาที่เหมาะสม

แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีปัญหาเหลืออยู่ ดังที่สามารถเข้าใจได้ในรูป 3.14 การทำให้กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป  $I_p$  มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้มีเวลาในการเริ่มไหล (STARTING TIME) ของกระแสไฟฟ้ายาวขึ้นไปด้วย การที่กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปเพียงแต่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ นั้นจะไม่มีผลทำให้แรงกระแทกโดยการสปาร์กใหญ่ขึ้นด้วยเลย

ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมคือการใช้วงจรการสปาร์กที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่เริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ถ้าพิจารณาจากคุณสมบัติพิเศษของคอนเดนเซอร์แล้วเราไม่สามารถหวังได้ว่า วงจร RC จะสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการสปาร์กเริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป

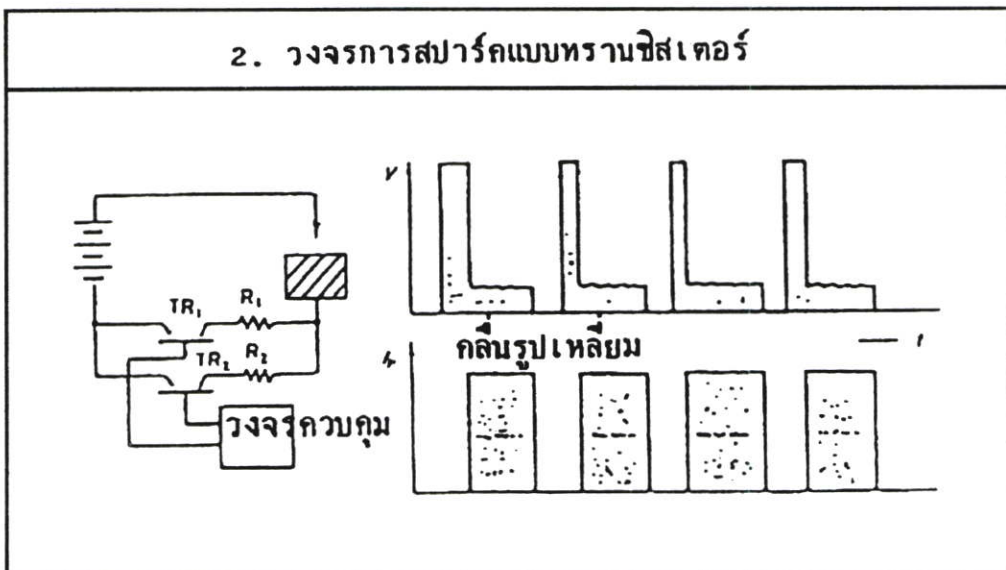
นอกจากนี้แล้ว ถ้าวจร RC คอนเดนเซอร์จะใช้เวลานานในการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าที่สะสมไว้ออกมา ถ้าสังเกตด้วยตาของมนุษย์ธรรมดาจะเห็นว่าใช้เวลาสั้นๆ เพียงชั่วพริบตาเดียวแต่ถ้าจะสังเกตและวัดด้วยหน่วยเวลาระดับไมโครแล้วจะทราบว่า การปลดปล่อยประจุไฟฟ้าออกของคอนเดนเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษที่ใช้เวลาชิวในเชิงเปรียบเทียบถ้าจะเร่งให้ความเร็วในการขึ้นรูปสูงขึ้นโดยการเริ่มชาร์ตประจุไฟฟ้าครั้งถัดไปทันที หลังจากที่มีการสปาร์ตครั้งก่อนเพิ่งจบลงจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า การสปาร์ตครั้งถัดไปขึ้นระหว่างชั่วขณะที่การคืนสู่ความเป็นฉนวนยังไม่เพียงพอ ผลที่เกิดขึ้นก็คือ  $\tau_{off}$  จะหายไป และการสปาร์ตจะกลายเป็นแบบอาร์ค ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของระหว่างชั่วสูงขึ้น เกินไปจนผิวการขึ้นรูปหยาบเกินไป

และถ้าพิจารณาถึง วงจรที่มีเฉพาะ RC เท่านั้นจะเห็นว่าวงจรดังกล่าวนี้ขาดองค์ประกอบ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อคอยตัดกระแสไฟฟ้การสปาร์ต ในช่วงระหว่างส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายไฟของการสปาร์ตถึงระหว่างชั่ว ซึ่งหมายความว่าเมื่อประจุไฟฟ้าจากคอนเดนเซอร์เริ่มถูกปลดปล่อยออกมาแล้วจะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอยู่ที่ประจุไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกทั้งหมด ในกรณีเช่นนี้ ถึงแม้ว่า เราต้องการที่จะหยุดกลางคันระหว่างการสปาร์ต ก็ทำไม่ได้ ดังนั้นเราสามารถที่จะกล่าวได้ว่า คุณสมบัติพิเศษของการสปาร์ตของวงจร RC จะถูกกำหนดตายตัวลงไป

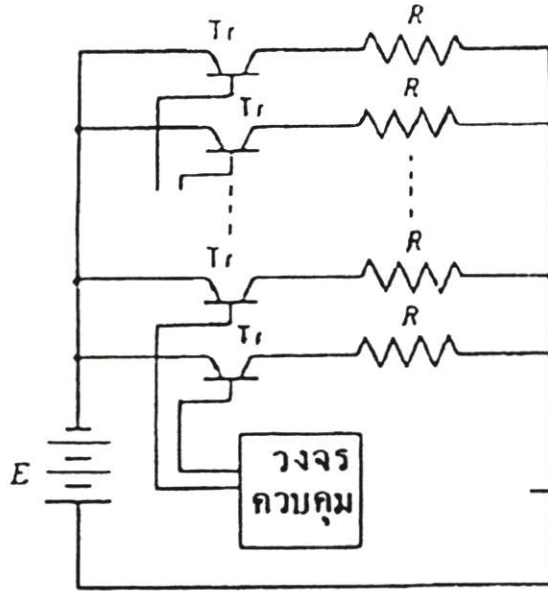
ตามองค์ประกอบต่างๆ คือ คอนเดนเซอร์, ตัวต้านทาน, คุณสมบัติพิเศษของฉนวนระหว่างขั้ว ซึ่งหมายถึงว่าเราไม่สามารถที่จะควบคุมปรับเวลาของ  $\tau_{on} \cdot \tau_{off}$  ตามที่ต้องการได้

### ยุคสมัยของทรานซิสเตอร์

วิวัฒนาการของวงจรการสปาร์คนั้น เป็นประวัติศาสตร์ของการคิดค้นหาวิธีที่จะควบคุมพลังงานของการสปาร์ค ถ้าเป็นวงจร RC แล้ว เราไม่สามารถที่จะควบคุมกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า จังหวะ (timing) ของพัลส์การสปาร์คตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงได้เคยมีการทดลองใช้หลอดสุญญากาศทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรการสปาร์คมาแล้ว แต่ไม่สามารถที่จะพัฒนาขึ้นมาจนใช้งานได้จริงได้ เราสามารถที่จะกล่าวได้ว่าวิวัฒนาการของเครื่อง EDM นั้น มีความสัมพันธ์กับการคิดค้นทรานซิสเตอร์ขึ้นมาได้เช่นเดียวกับอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.16 วงจรทรานซิสเตอร์ต่อแบบขนาน

วงจรการสปาร์กแบบทรานซิสเตอร์ จะมีโครงสร้างดังรูป 3.15 ถ้าใช้สวิทช์ในการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเพนเวอร์ชันพลาสมากระแสตรง (แหล่งจ่ายไฟการสปาร์ก) เกิดการ ON ในช่วงที่สั้นๆ จะทำให้เกิดการสปาร์กขึ้นที่ระหว่างขั้ว และใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวเปิดปิด (switching) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ดังกล่าวนี้ ยิ่งไปกว่านั้นจังหวะในการส่งจ่ายไปยังระหว่างขั้วจะขึ้นโดยตรงกับคุณสมบัติการเปิดปิด (สวิทช์แบบไร้อุปกรณ์) ของทรานซิสเตอร์ วงจรนี้จึงสามารถที่จะทำการเปิดปิดสลับกันไปอย่างรวดเร็วมากและถ้าสวิทช์อยู่ในสภาวะ OFF จะไม่มีแรงดันไฟฟ้าการสปาร์กอยู่ที่ระหว่างขั้ว จึงทำให้วงจรสามารถควบคุม การตัดต่อกระแสไฟฟ้าการสปาร์กได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของบริษัทโซดิกสันนั้นตามสเปคของเครื่องมาตรฐานแล้ว ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปโดยเฉลี่ยคือ 40A (MARK 20) ในความจริงแล้วทรานซิสเตอร์ 1 ตัวจะรับภาระโหลดมากเกินไปถ้ามีกระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ย 40A ไหลผ่าน ดังนั้นจึงมีการต่อทรานซิสเตอร์หลายตัวในแบบขนาน ดังรูป 3.16 เพื่อที่จะแบ่งกระจายภาระโหลด ตามค่าของกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปของแต่ละช่วง

ดังนั้น ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดของทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ก็จะทำให้วงจรการสปาร์กทำงานได้อย่างคล่องตัว และขอบเขตกว้างขวางโดยเฉพาะการควบคุมเวลานอกจากนี้แล้ว ถ้านำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูปซึ่งเป็นองค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่อง EDM สมบูรณ์ขึ้น ก็จะทำได้สามารถป้อนแกนพิกัดให้เหมาะสมกับสภาวะของระหว่างขั้วได้

เทคโนโลยีเหล่านี้ บริษัท โซดิกส์ในสมัยนั้น (ปี 1960 กว่าๆ) ได้เป็นผู้คิดค้น และได้นำมาประยุกต์สร้างเป็นเครื่องจริงขึ้นมาเป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้เป็นต้นแบบของเครื่อง EDM ระบบ NC ในปัจจุบัน สำหรับลักษณะเฉพาะคัวทางเทคนิคนั้น สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก. วงจรการสปาร์คและแกนพิคคในการขึ้นรูป ถูกควบคุมด้วยระบบ NC ในปัจจุบัน เครื่อง EDM ที่ผลิตขึ้นมาในนั้น โดยส่วนมากจะใช้ระบบ NC โดยเฉพาะเครื่อง Wire Cut EDM นั้น เป็นเครื่องจักรที่เกิดขึ้นมาได้โดยใช้ระบบ NC ตั้งแต่แรก

ข. แกนพิคคในการขึ้นรูป (ได้แก่ แกน X, Y, Z) ทำงานภายใต้มอเตอร์ควบคุมที่มีความละเอียดในการส่งป้อน 1/1,000-1/10,000 mm

ค. วงจรการสปาร์คใช้เพาเวอร์ FET (P-MOS) ในการควบคุมพัลส์การสปาร์คได้ละเอียดในหน่วยระดับ msec

เพาเวอร์ FET มีคุณสมบัติพิเศษการเปิดปิด ซึ่งมีการตอบสนอง (responsibility) ที่ไวกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซิงเกิลเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์แบบธรรมดาถึงประมาณ 10 เท่า จึงถูกใช้เป็นตัวใจสำคัญของวงจรการสปาร์คในปัจจุบัน นอกจากนั้นแล้วในแต่ละปีได้มีการพัฒนาให้ความเร็วในการเปิดปิดเร็วขึ้น สามารถผ่านกระแสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ในปัจจุบันแต่ละบริษัทที่เกี่ยวข้องได้มีการแข่งขันกันอย่างกว้างขวางในด้านการพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อให้สามารถที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์ค (พลังงาน) ให้เร็วขึ้น ละเอียดขึ้น และถูกต้องขึ้น

หมายเหตุ : FET = Field Effect Transistor

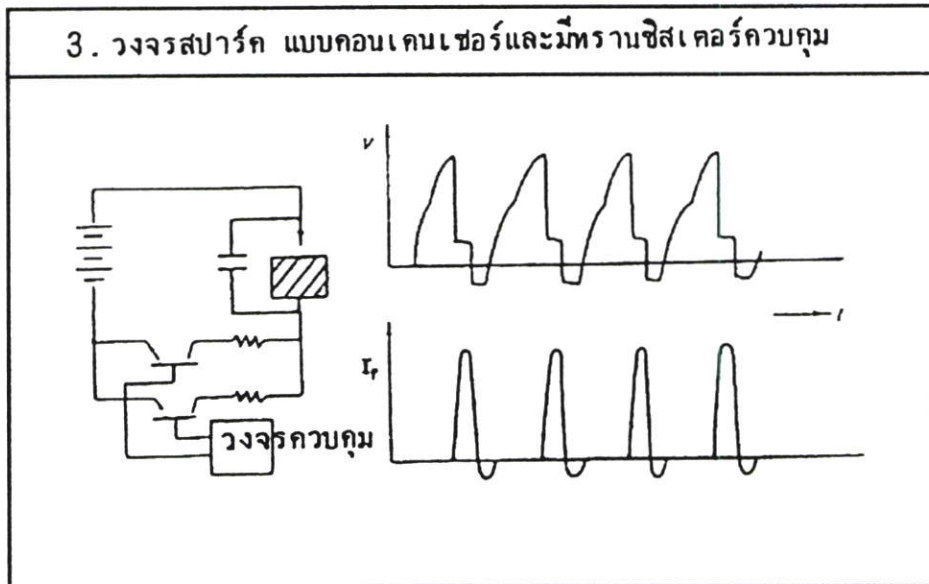
MOS = Metal Oxide Semi-conductor

ในปี 1960 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการทดลองเร่งความเร็วในการเปิดปิดอย่างต่อเนื่องกันของการสปาร์คโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการขึ้นรูปให้มีระดับสูงขึ้นไปกว่าเดิมมาก ในสมัยนั้น ฟุรุทากา (ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานบริษัทโซดิกส์) ได้เป็นแกนกลางของกลุ่มผู้ทำการทดลองซึ่งในการทดลองครั้งนั้น ได้ผลที่ไม่คาดหมายมาก่อน คือ ขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการสึกหรอโดยการขึ้นรูป และตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ก็เป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนว่าการขึ้นรูปหยาบด้วยวิธีการสปาร์คนั้น สามารถกระทำในเงื่อนไขแบบไม่สึกหรอได้

วงจรคอนเดนเซอร์ควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์

วงจร RC นั้นมีจุดบกพร่อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ว่าการสอคใส่คอนเดนเซอร์ที่มีขนาดความจุเข้าไปที่ระหว่างขั้วของวงจรทรานซิสเตอร์ ก็จะสามารถเพิ่มขนาดของค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า  $I_p$  ขึ้นได้ (ในการใช้งานจริงนั้น วงจรสามารถที่จะ ON/OFF เฉพาะส่วนของคอนเดนเซอร์ได้ด้วยสวิตช์หรือคำสั่งจากระบบ NC)

ดังนั้น วงจร ดังกล่าวจึงสามารถที่สร้างรูปร่างคลื่นของการสปาร์คที่มีค่าสูงสุดของกระแส  $I_p$  สูง และ  $\tau_{on}$  สั้นขึ้นมาได้ ซึ่งลักษณะการสปาร์คเช่นนี้เหมาะสำหรับที่จะใช้ในงานขึ้นรูปละเอียด งานที่มีพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สะดวกในการใช้พลังงานสูง งานขึ้นรูปโลหะผสมคาร์ไบด์



รูปที่ 3.17 วงจรสปาร์ค แบบคอนเดนเซอร์และมีทรานซิสเตอร์ควบคุม

### 3.2.4 เครื่อง EDM ในปัจจุบัน

ถึงแม้ว่าเราจะสามารถ ทำให้การสปาร์คอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้น ได้หลายลูกคลื่นแต่จบลงเพียงแค่นั้น ก็ไม่ได้มีความหมายในการใช้งาน อย่างไรก็ตามเรามีความจำเป็นจะต้องควบคุมให้สภาพการสปาร์คสมบูรณ์อยู่ได้ตลอดเวลาอีกด้วย

ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับหัวข้อนี้ก็คือ จะมีวิธีการเช่นไรที่จะสามารถควบคุมการสปาร์ค ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เร็วมากได้ นอกจากนั้นการควบคุมเครื่อง EDM ซึ่งเป็นเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปจะสามารถทำได้อย่างไร

#### องค์ประกอบของการควบคุม

การควบคุมเครื่อง EDM นั้นมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ

1. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค
2. การควบคุมแกนพิคดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทาง การขึ้นรูป)

การควบคุมทั้ง 2 อย่างนี้ จะต้องถูกดำเนินการอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งถ้าขาดอย่างใดอย่างหนึ่งก็จะทำให้การขึ้นรูปดำเนินไปด้วยดีไม่ได้



รูปที่ 3.18 องค์ประกอบของการควบคุมเครื่อง EDM

#### ก. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค (การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)

การที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์คนั้นก่อนอื่นจำเป็นต้องรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วเสียก่อน หนึ่งสิ่งในระบบ NC จะสามารถตรวจจับได้จริงโดยตรงนั้นคือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว และถ้าเราติดตามคอยบันทึกแรงดันไฟฟ้านี้ของแต่ละช่วงเวลาเราก็จะได้รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (บันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสถานะของฟังก์ชันของเวลา) การติดตามจับรูปร่างคลื่นดังกล่าวนี้ จะทำให้เราสามารถรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วได้  $\tau_{on}$ ,  $\tau_{off}$  ในความเป็นจริง เราก็สามารถที่จะตรวจวัดได้จากรูปร่างคลื่นนี้ยกตัวอย่างเช่น ระดับความเสถียร (Stability) ของการสปาร์คนั้น เราสามารถคำนวณหาได้โดยอินทิเกรท รูปร่างของคลื่นแรงดันไฟฟ้าในสถานะของฟังก์ชันของเวลา เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค (การกระจายของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์คที่ดูในเชิงเวลา) ค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค จะมีความหมายเช่นเดียวกับ “ระดับความเสถียรของการสปาร์ค” ดังนั้น ถ้ามีการคำนวณค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้อยู่อย่างสม่ำเสมอ ก็จะสามารถที่จะตรวจดูสภาพของความเสถียรของการสปาร์คได้

#### ข. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

การควบคุมแกนพิกัดของเครื่อง EDM นั้น จะแตกต่างจากเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น เครื่องกัด (milling machine) กล่าวคือ การส่งป้อนแกนพิกัดตามธรรมชาติภายใต้คำสั่งจากอุปกรณ์ระบบ NC นั้น ไม่เพียงพอ

ถึงแม้ว่าจะได้รับคำสั่งแบบเดียวกันกับเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น “จงเคลื่อนที่ไปข้างหน้า 10 mm” ก็ตาม ถ้าเพียงแต่ทำตามคำสั่งคือ เลื่อนแกนพิกัดในการขึ้นรูปไป

ข้างหน้าเพียงอย่างเดียว ขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานจะสัมผัสกัน (ระยะระหว่างขั้วกลายเป็น 0) ทำให้เกิดการลัดวงจรคือไม่สามารถเริ่มการสปาร์คขึ้นได้

การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนั้น ระยะระหว่างขั้วที่ถูกต้องสมบูรณ์ พอที่จะทำให้เกิดการสปาร์คได้ถูกกำหนดตามพลังงานการขึ้นรูป หรือพื้นที่การสปาร์คที่กำหนดตั้งเอาไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดให้ระยะดังกล่าวนี้คงที่อยู่เสมอตลอดเวลาที่ทำการขึ้นรูป

ถ้าเกิดการสปาร์คอย่างราบรื่นตลอดเวลาที่ทำการขึ้นรูปกำลังดำเนินอยู่ ระยะระหว่างขั้วจะเปิดออกห่างเรื่อยๆ จึงต้องมีการควบคุมให้ระยะห่างระหว่างขั้วคงที่อยู่เสมอโดยการส่งป้อนแกนพิกัดให้สามารถทดแทนระยะที่คลาดเคลื่อนไป นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีที่เศษผงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขั้ว โดยการสปาร์คถูกขจัดระบายออกไปไม่เพียงพอและบรรยากาศระหว่างขั้วกลายเป็นบรรยากาศที่เกิดการสปาร์คซ้ำขึ้นได้ ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเปรียบเสมือน ระยะระหว่างขั้วแคบลง ดังนั้น ต้องมีการควบคุมให้แกนพิกัดในการขึ้นรูปเคลื่อนที่ในทิศทางที่แยกขั้วออกจากกัน ระยะระหว่างขั้วนี้สามารถทราบได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแรงดัน แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วหมายถึง แรงดันระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ซึ่งถ้าระยะระหว่างขั้วแคบลง (ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้กันเกินไป) แรงดันไฟฟ้าจะสูง แต่ถ้าระยะกว้างขึ้นแรงดันจะต่ำลง จากความสัมพันธ์ที่ว่านี้แรงดันไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางนั้น เราสามารถรู้สึกถึงระยะระหว่างขั้วได้ โดยการวัดแรงดันระหว่างขั้ว

### 3.3 ทฤษฎีการควบคุมเครื่อง NC-EDM

ระบบควบคุมต่างๆของ เครื่อง NC-EDM นั้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้ รูปที่ 3.19 และ รูปที่ 3.20

อุปกรณ์ระบบ NC จะป้อนข้อมูลเกี่ยวกับระยะระหว่างขั้ว มาจากวงจรการสปาร์คและคำสั่ง ซึ่งกำหนดปริมาณการส่งป้อนของแกนไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์ นอกจากนั้นแล้วหน้าที่ของ NC ก็ยังมีการรับคำสั่งจากผู้ปฏิบัติการควบคุมเครื่องหรือบอกแสดงภาพต่างๆ ของเครื่องวงจรการสปาร์ค

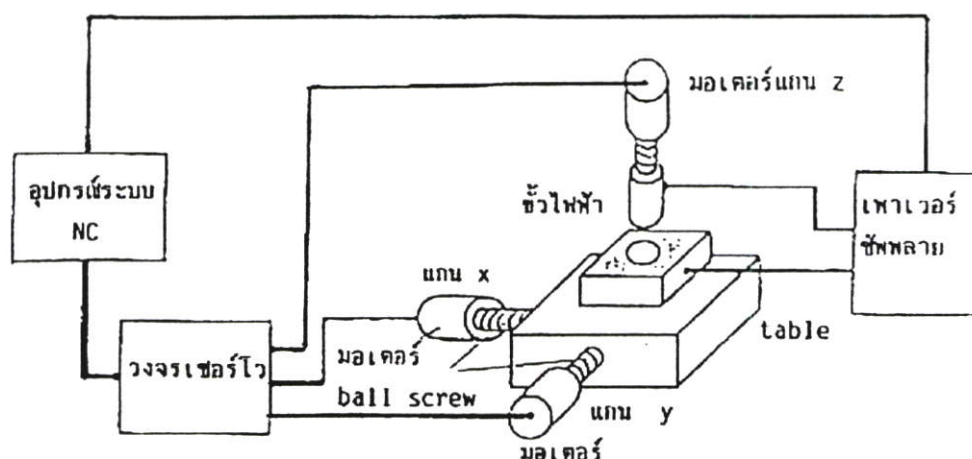
วงจรที่สร้างพัลส์การสปาร์ค วงจรนี้จะเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า ชิ้นงานและทำหน้าที่ป้อนจ่ายพลังงานในการขึ้นรูป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นคือ เครื่องที่ถูกผลิตขึ้นมาในปัจจุบันนี้ โดยส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์ P-MOS เป็นส่วนหัวใจสำคัญของวงจร ซึ่งสามารถควบคุมพัลส์ได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ m.sec

นอกจากนั้นแล้ว คุณสมบัติพิเศษในการเริ่มไหลของกระแสไฟฟ้าการสปาร์คนั้นจะมีความเร็วสูงคือ ขึ้นสูงถึง 800 A ได้ในระยะเวลาเพียง 1  $\mu$ sec

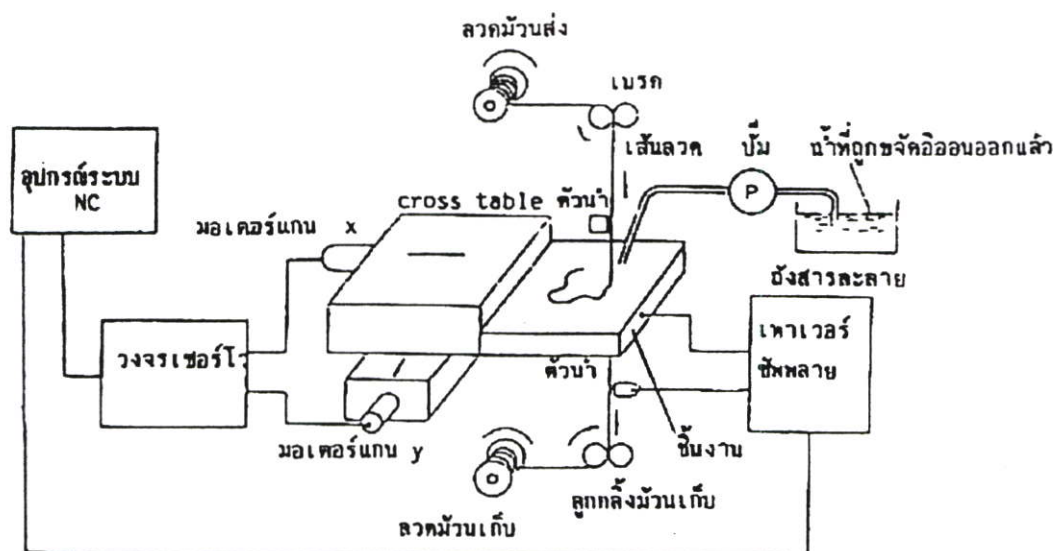
วงจรควบคุมมอเตอร์ (หรือที่เรียกอีกอย่างว่า Motor driver)

ระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งรวมถึงมอเตอร์ด้วยนั้นเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมเครื่อง ในปัจจุบันเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนของการกำหนดตำแหน่งการส่งป้อน

มอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานดังกล่าวนี้จะสาร์ทและหยุดสลับกันไปบ่อยมากคุณสมบัติพิเศษในช่วงเริ่มสาร์ทจึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อระดับความละเอียดในการขึ้นรูป



รูปที่ 3.19 การควบคุมเครื่อง EDM



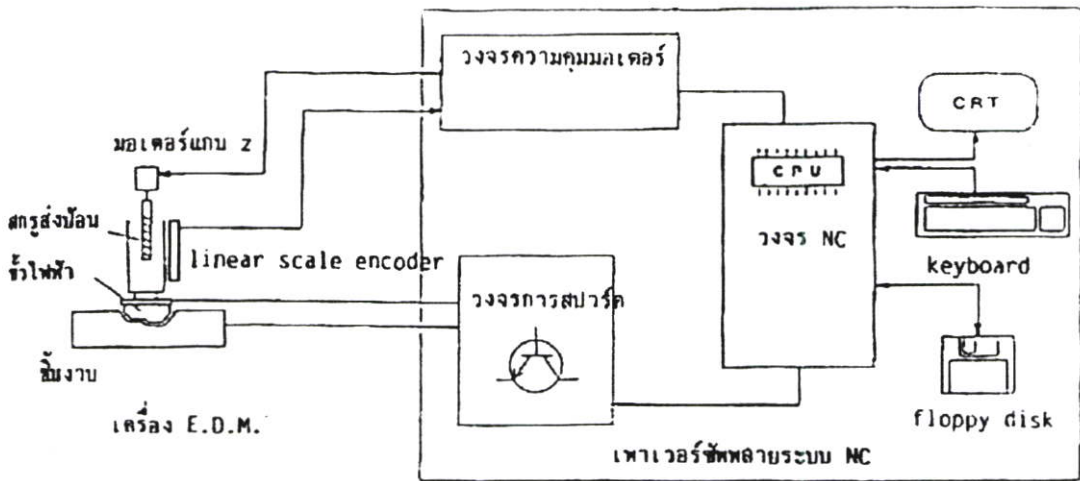
รูปที่ 3.20 การควบคุมเครื่อง Wire cut EDM



### Semi Closed Feedback

ในกรณีที่มีค่า lead angle ของสกรูส่งป้อน และแรงเสียดทานทางกลของแท่นส่งป้อนมีค่าคงที่ เราสามารถถือได้ว่ามุมการหมุนของมอเตอร์ = ปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนได้ ซึ่งหมายถึง ถ้าควบคุมมุมการหมุนของมอเตอร์ได้ก็สามารถนับได้ว่า แกนได้เคลื่อนที่ตามระยะที่กำหนด

วิธีการตรวจวัดตำแหน่ง และควบคุมเช่นนี้เรียกกันว่า “Semi closed feedback” เครื่องมือกลทุกวันนี้ โดยส่วนมากนำวิธีการนี้เข้ามาใช้



รูปที่ 3.22 Full Closed Feedback

### Full Closed Feedback

ส่วนวิธีการอื่นซึ่งเรียกกันว่า “Full closed feedback” นั้นจะใช้วิธีการตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนที่ที่แท้จริงของแกนโดยตรง และส่งข้อมูลป้อนกลับ (feedback) ไปยังวงจรควบคุม เนื่องจากว่าแกนดังกล่าวจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง จึงจำเป็นที่จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดตำแหน่ง (linear encoder) ที่เหมาะสมกับระยะชัก (stroke) ของเครื่องจักรขึ้นรูปนั้นๆ ด้วยวิธีการเช่นนี้จะใช้กับเครื่องจักรขึ้นรูปที่ทำงานขึ้นรูปที่ความละเอียดสูงในระดับ  $1\mu\text{m}$ . หรือละเอียดกว่านั้น

วิธีการนี้ใช้การตรวจวัดตำแหน่งที่แท้จริงโดยตรงจึงสามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างถูกต้องมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Semi closed feedback แต่ในทางกลับกันวิธีการนี้ก็ยังมีปัญหาที่เหลืออยู่อีกคือ ปัญหาการจัดหาช่องว่างสำหรับติดตั้ง linear encoder ปัญหาการตอบสนองช้าของระบบกลไกอื่นเนื่องมาจากน้ำหนักเฉื่อยของส่วนที่เคลื่อนที่ของแกนนอกจากนี้แล้วคุณสมบัติพิเศษในการตอบสนองของระบบควบคุมโดยรวม จะมีแนวโน้มที่ไวเกินไปอันเนื่องมาจากความละเอียดในการตรวจวัดสูงจึงทำให้ปรับตั้งค่าต่างๆ ทำได้ยาก

ผลสรุปก็คือ การใช้วิธีการนี้จะต้องลงทุนอุปกรณ์ระบบ NC สูงกว่ามาก

อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ระบบ NC จะมีความจำเป็นในการนำมาช่วยให้ควบคุมได้ทั้ง 2 อย่าง คือ “การควบคุมพัลส์การสปาร์ค” และ “การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป” การนำระบบ NC เข้ามาใช้กับเครื่อง EDM ทำให้เครื่อง EDM สามารถที่จะทำงานขึ้นรูปละเอียดได้

เราสามารถกล่าวได้ว่า CPU (Central Processing Unit) เป็นสมองของอุปกรณ์ของ อุปกรณ์ NC ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ขนาด 16 bit เป็นหลัก แต่ทว่าแนวโน้มในปัจจุบันแสดงถึงว่า ระบบควบคุมจะถูกพัฒนาให้มีระดับสูงและซับซ้อนมากขึ้น ไปอีกรวมทั้งจะมีการเพิ่มเติมฟังก์ชันต่างๆ เข้าไปด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ NC ที่มีระดับสูง จะเริ่มมีการนำ CPU ขนาด 32 bit เข้ามาใช้แทน เพื่อที่จะให้ทำงานได้เร็วขึ้นเหมาะสมกับซอฟต์แวร์ ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นด้วย

สำหรับ “MARK 20 Series” ของบริษัท โชดิกส์ ก็เช่นกันคือใช้ CPU ขนาด 32 bit ใน อุปกรณ์ NC

นอกจากนี้แล้ว อุปกรณ์ระบบ NC ยังทำให้ขอบเขตของวิธีการควบคุมกว้างขวางหรือ มีอิสระมากขึ้นด้วย ถ้าเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบ NC เข้าระหว่างเซนเซอร์ (sensor) ซึ่งทำหน้าที่ ตรวจวัดปรากฏการณ์กับส่วนที่เป็นกลไกการเคลื่อนที่ทำงาน เราก็สามารถจะเปลี่ยนแปลง วิธีการควบคุมระบบที่ซับซ้อนและมีระดับสูงได้ รวมทั้งควบคุมปรากฏการณ์ที่รวดเร็วมาก เช่น การสปาร์คได้ด้วย

เครื่องจักรในสมัยที่ผ่านมา นั้น จะใช้วิธีผลิตลึงค์หรือเคมขึ้นมาใหม่ และถ้ายังไม่เพียงพออาจจะต้องออกแบบใหม่เลย ดังนั้นอุปกรณ์ระบบ NC จะช่วยทำให้ขั้นตอนการพัฒนาซึ่ง จะต้องมีการลองผิดลองถูก (Try & Error) สลับกันไปจนกว่าจะสำเร็จให้เร็วขึ้นมากได้

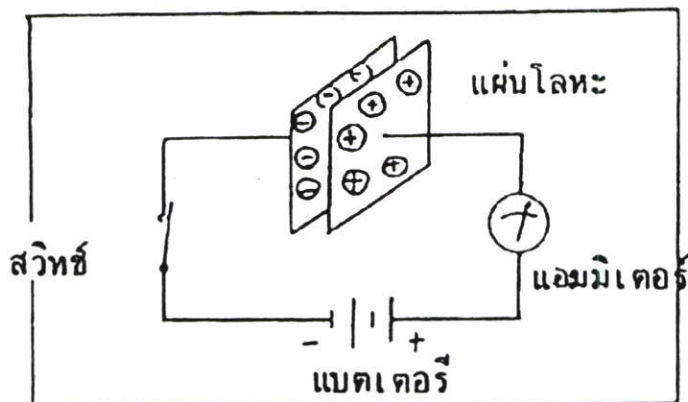
สำหรับวิธีการควบคุมนั้นจะอยู่ในรูปของ ซอฟต์แวร์ในตัวกลางเก็บบันทึก เช่น ROM (Read Only Memory) หรือ Floppy Disk ซึ่งซอฟต์แวร์เหล่านี้จะสนับสนุนอุปกรณ์ระบบ NC โดยสามารถที่จะเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มเติมฟังก์ชันเกี่ยวกับวิธีการควบคุมได้อย่างง่ายดาย โดยการ สับเปลี่ยนตัวกลางเก็บบันทึกเท่านั้น และยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้เข้ากับความต้องการของ ผู้ใช้ (Users) ได้อีกด้วย

### 3.3.1 บรรยากาศของระหว่างขั้ว

ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานที่จะทำให้เกิดการสปาร์คนั้นจำเป็นต้องมีบรรยากาศ อย่างเป็นบาง

#### คอนเดนเซอร์และความจุไฟฟ้าสถิต

ความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วนั้นถ้าคิดเช่นเดียวกันกับหลักการ ของคอนเดนเซอร์ ก็จะทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น คอนเดนเซอร์เป็นชิ้นส่วนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่ง สามารถเก็บสะสมไฟฟ้าไว้ได้ชั่วคราวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง



รูปที่ 3.23 หลักการของคอนเดนเซอร์

เป็นที่ทราบกันว่าถ้าจัดให้แผ่นโลหะ 2 แผ่น หันหน้าเข้าหากัน และต่อ แบตเตอรี่ แอมมิเตอร์ สวิตช์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแอมมิเตอร์ทันทีในจังหวะที่เปิดสวิตช์

สาเหตุก็คืออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังแผ่นโลหะของคอนเดนเซอร์ และขั้วลบอิเล็กตรอนของแผ่นโลหะด้านบวกไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ (การที่เข็มชี้ของแอมมิเตอร์แกว่งนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเพราะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนเดนเซอร์ เราจะเห็นคล้ายกับมีกระแสไฟฟ้าไหล ในช่วงที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น) และเมื่อความดันไฟฟ้าของระหว่างแผ่นโลหะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุดไหล (การชาร์ตไฟเสร็จสิ้นลง) หลังจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าจะถอดแบตเตอรี่ออกจากประจุไฟฟ้าก็จะยังคงเหลืออยู่ในคอนเดนเซอร์ ความสามารถในการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่า ความจุไฟฟ้าสถิต (ความจุของคอนเดนเซอร์)

องค์ประกอบที่จะกำหนดความจุไฟฟ้าสถิตนี้มี 3 อย่าง

1. การเปลี่ยนพื้นที่ของแผ่นโลหะ  
ถ้าพื้นที่ใหญ่ ก็สามารถสะสมประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น
2. การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง  
ถ้าระยะห่างแคบลง ความจุสูงขึ้น (แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทนทานได้จะต่ำลง)
3. การเปลี่ยนชนิดของสารไดอิเล็กตริก

ความจุไฟฟ้าสถิตจะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ค่าความต้านทานของฉนวน) ของวัตถุ (สาร ไดอิเล็กตริก) ถ้าความต้านทานสูง ความจุก็จะสูงด้วย ในรูปที่อธิบายหลักการนั้นได้จัดวางแผ่นโลหะในอากาศ สาร ไดอิเล็กตริกก็คืออากาศ หนึ่ง น้ำมันมีค่าความต้านทานสูงกว่าอากาศ จึงถูกใช้เป็นสาร ไดอิเล็กตริกในคอนเดนเซอร์ที่มีความจุสูงเสียเป็นส่วนมาก

ซึ่งเรียกกันว่า ออกซ์-คอนเดนเซอร์ นอกจากนั้นยังมี ไมก้า-คอนเดนเซอร์ เปเปอร์-คอนเดนเซอร์ ซึ่งล้วนแต่ใช้ชื่อตามสาร ไดอิเล็กทริกทั้งนั้น

**ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว**

ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ถ้านำมาก้าวในกรณีของระหว่างขั้วของเครื่อง EDM ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว (ความจุไฟฟ้าสถิตย์) จะมีขนาดตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

ก. ถ้าพื้นที่การสปาร์คมีขนาดใหญ่ ความจุจะสูง

พื้นที่การสปาร์คหมายถึง พื้นที่ของส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นจริงระหว่างขั้วไฟฟ้า และชิ้นงานในฝั่งตรงกันข้าม

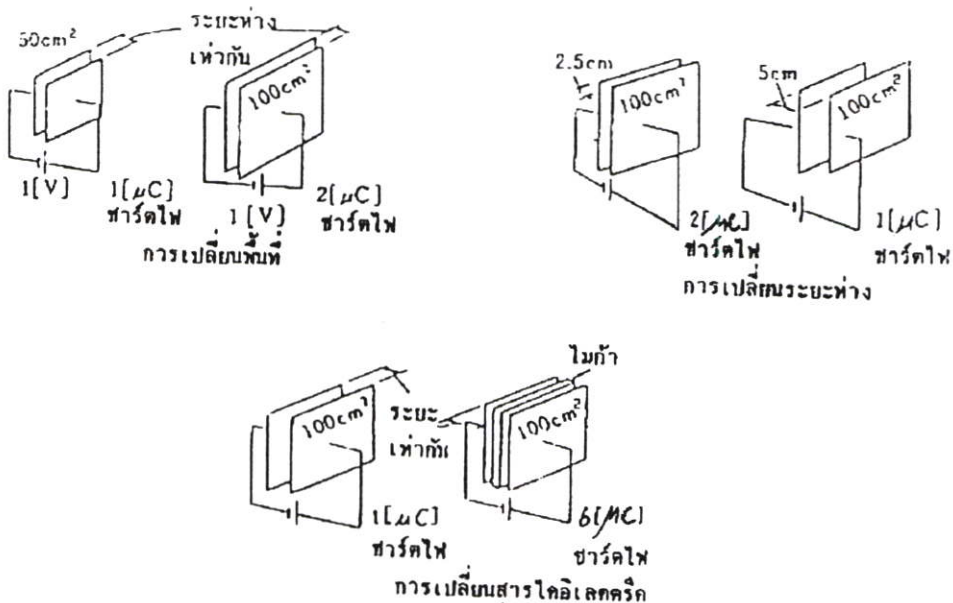
ข. ถ้าระยะระหว่างขั้ว (ระยะห่างการสปาร์ค) แคบ ความจุจะสูง

ถ้าระยะระหว่างขั้วแคบ ความจุไฟฟ้าสถิต ก็จะมีค่าสูงขึ้น

ค. ถ้าค่าความต้านทานของสาร ไดอิเล็กทริก ซึ่งหมายถึงสารละลายที่ใช้กับเครื่อง

EDM สูง ความจุจะสูง

โดยปกติแล้ว การสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศ แต่ในเครื่อง EDM นั้น จะใช้ของเหลว ซึ่งก็คือ น้ำ เป็นสาร ไดอิเล็กทริกระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานการขึ้นรูป ด้วยเครื่อง EDM นั้น จำเป็นต้องขจัดระยะขยาศ โลหะซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปออกไป ดังนั้นของเหลวที่มีคุณสมบัติการไหลที่ดี จะเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสาร ไดอิเล็กทริกดังกล่าวนี้



รูปที่ 3.24 องค์ประกอบที่กำหนดความจุของคอนเดนเซอร์

### ระยะห่างการสปาร์ค (ระยะระหว่างขั้ว)

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานนั้น จำเป็นต้องมีระยะห่างขนาดหนึ่ง ถ้าใกล้เกินไป จะเกิดการสปาร์คแบบอาร์ค เช่นเคียวกับการเชื่อม หรือถ้าห่างเกินไป การสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้น ระยะห่างดังกล่าวนี้จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรก หรือสภาพการไหลของสารละลาย

### ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการสปาร์คกับค่าความต้านทานของฉนวน

การที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ให้มีความละเอียดสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ระยะห่างการสปาร์คแคบลง เนื่องจากพื้นที่การสปาร์คจะถูกกำหนดลงไปโดยรูปทรงการขึ้นรูป ดังนั้น การที่จะขยับระยะห่างการสปาร์คให้แคบลง ก็ควรที่จะเพิ่มค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้สูงขึ้นด้วย

ค่าความต้านทานของฉนวนนั้น โดยทั่วไปแล้ว น้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ เครื่อง EDM จึงใช้น้ำมันมาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก น้ำมันมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงถึงขนาดที่ถูกใช้เป็นฉนวนของหม้อแปลงขนาดใหญ่

ในกรณีที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริก ระหว่างขั้วสูง (ค่าความต้านทานของสารละลายสูง) จะทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นได้ยาก ดังนั้นจึงต้องจัดวางให้ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้กับชิ้นงานมากขึ้น ผลที่ได้รับคือ เราสามารถขยับระยะห่างการสปาร์คให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีสำหรับงานขึ้นรูปละเอียด

ในทางกลับกัน ถ้าใช้น้ำเป็นสารละลายในเครื่อง EDM ค่าความต้านทานจะต่ำกว่าน้ำมัน ดังนั้น การสูญเสียความเป็นฉนวนของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ง่ายในระยะที่ห่างกว่า เมื่อเทียบกับน้ำมัน ซึ่งก็หมายความว่า ระยะห่างการสปาร์คจะกว้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน และเกิดมีกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลขึ้นแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดใหญ่ ตามส่วนที่ค่าความต้านทานต่ำลง ดังนั้น เราสามารถที่จะให้พลังงานระดับสูงได้ ซึ่งจะมีผลดีคือ สามารถที่จะใช้กับงานขึ้นรูปที่ต้องการความเร็วสูงได้

### 3.3.2 องค์ประกอบ 4 ประการที่ควรทราบ

ผู้ใช้เครื่อง EDM ในการขึ้นรูปนั้น คงจะมีเป้าหมายต่างๆ เหมือนกัน คือ ความเร็วในการขึ้นรูปที่สูง ผิวการขึ้นรูปที่สวย และความละเอียดในการขึ้นรูปที่สวย และความละเอียดในการขึ้นรูปที่สูง ซึ่งเป้าหมายเหล่านี้ก็กลายมาเป็นหัวข้อในการพัฒนาของบริษัทผู้ผลิตเช่นเคียวกัน เวลาที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น เราจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบ 4 ประการต่อไปนี้

### 3.3.2.1 ความเร็วในการขึ้นรูป (g/min)

ถ้ามองจากจุดยืนของประสิทธิภาพการผลิตแล้ว ความเร็วในการขึ้นรูป เป็นหัวข้อปัญหาที่สำคัญมาก การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คนั้น ถ้าจะเปรียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ เช่น การตัด ก็จะถูกจัดอยู่ในประเภทที่มีความเร็วต่ำมาก การใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้น จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ แต่ถ้าจะเปลี่ยนมาใช้เงื่อนไขที่ทำให้ความเร็วสูงขึ้น ก็อาจจะทำให้ผิวขึ้นรูปที่ได้หยาบ ระยะห่างการสปาร์คก็กว้างขึ้น ทำให้ความละเอียดถูกต้องของขนาดต่างๆ ไม่ดีพอ

- ความเร็วในการขึ้นรูปสำหรับเครื่อง EDM นั้น จะบอกแสดงด้วยปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา ปริมาณที่ถูกขจัดออกไปนี้ มีทั้งวิธีที่บอกแสดงด้วยปริมาตร และวิธีที่บอกแสดงด้วยน้ำหนัก ในประเทศญี่ปุ่นส่วนมากจะบอกแสดงด้วยน้ำหนัก  
g/min (ญี่ปุ่น) mm<sup>3</sup>/sec (ยุโรป) in<sup>3</sup>/h(อเมริกา)
- สำหรับเครื่อง EDM ประเภท Wire Cut นั้นจะบอกแสดงด้วยพื้นที่หน้าตัด การขึ้นรูปต่อหน่วยเวลา และมีการบอกแสดงความหนาของชิ้นงานด้วยในเวลาเดียวกัน

$$\text{ความเร็วการส่งป้อน} \times \text{ความหนาของชิ้นงาน} = \text{ความเร็วในการขึ้นรูป} \quad (3.1)$$

$$\text{mm/min} \quad \times \quad \text{mm} \quad = \quad \text{mm}^2/\text{min}$$

ในการบอกแสดงความเร็วในการขึ้นรูปนั้นจะมีการบอกแสดงเงื่อนไขต่างๆ เวลาขึ้นรูปประกอบไปด้วย

- วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน (เช่น ขั้วไฟฟ้า = Cu , ชิ้นงาน = SKD-11)
- ประเภทของสารละลาย (น้ำมันหรือน้ำ ถ้าเป็นน้ำจะบอกค่าความต้านทานด้วย)
- เงื่อนไขการขึ้นรูป (เช่น  $\tau_{on}, \tau_{off}, I_p$ )
- ความหยาบของผิว ( $\mu R_{max}$ )

### 3.3.2.2 ความหยาบของผิว ( $\mu R_{max}$ )

ความหยาบของผิวขั้นสุดท้ายของแม่พิมพ์ จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตมาจากแม่พิมพ์นั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติก ความหยาบของผิวด้านในแม่พิมพ์ จะถ่ายทอดกลายเป็นความหยาบของผิวผลิตภัณฑ์ไปโดยปริยาย ตามปกติแล้วจะมีการขัดซึ่งเรียกว่า lapping (ผู้ปฏิบัติงานขัดด้วยมือ) เพื่อแต่งผิวของแม่พิมพ์ให้ละเอียดขึ้น แต่เนื่องจากว่า

กระบวนการขัด lapping นี้ใช้เวลาอย่างมาก ดังนั้นถ้าสามารถแต่งผิวให้ละเอียดไปได้ในตัวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ก็จะช่วยลดเวลา การขัด lapping ให้สั้นลงได้

นอกจากนั้นแล้วเครื่อง EDM สมัยนี้ ยังได้มีการติดตั้งวงจรช่วยแต่งผิวละเอียด (PIKA) ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ผิวที่มีค่าความหยาบของผิวดำกว่า  $1 (\mu R_{max})$  ซึ่งถ้าเป็นผิวด้านที่เป็นรอยจับของผลิตภัณฑ์ก็อาจจะใช้ผิวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยตรงเลย โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการขัด lapping อีกครั้ง

- ความหยาบของผิวนั้นบอกแสดงถึงระดับความราบเรียบของพื้นผิวด้วยความแตกต่างของระดับความสูงต่ำระหว่างส่วนที่เป็นภูเขา กับส่วนที่เป็นหุบ ในช่วงระยะความยาวหนึ่งๆ โดยใช้หน่วยเป็น m วิธีการบอกแสดงนั้น มีหลายวิธี ในญี่ปุ่นจะใช้วิธีการบอกแสดงซึ่งเรียกว่า “ค่าสูงสุดของความสูง” กันมาก

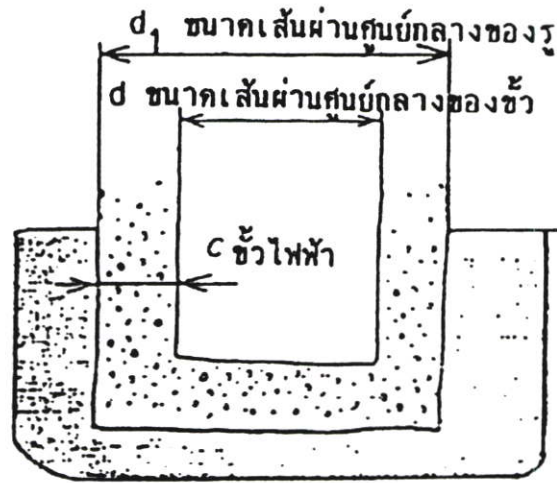
### 3.3.2.3 ระยะห่างการสปาร์ค ( $\mu m$ )

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน จำเป็นต้องมีช่องว่างขนาดหนึ่ง ซึ่งถ้าใกล้กันเกินไป จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสปาร์คแบบอาร์คเช่นเดียวกับการเชื่อมแต่ถ้าห่างกันเกินไปการสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้นระยะห่างนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรก และสภาพการไหลของสารละลาย ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับงานขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ จะต้องคำนวณระยะห่างนี้ล่วงหน้า เพื่อเตรียมผลิตขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กเมื่อไว้

นอกจากนี้แล้วในการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายจะต้องคำนวณระยะห่างภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวเพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้าย

โดยทั่วไปแล้ว การขึ้นรูปหยาบซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดใหญ่ จะมีระยะห่างนี้กว้าง แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดเล็กกว่าระยะห่างนี้จะแคบลง

ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ทำกรกัวร์ โดยปราศจากการสั้นแกว่งของขั้วไฟฟ้า โดยให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู เท่ากับ  $d_1$  ระยะห่างการสปาร์คเท่ากับ  $C$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าจะเท่ากับ  $d = d_1 - 2C$



รูปที่ 3.25 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

### 3.3.2.4 อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (%)

การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค เป็นวิธีการขึ้นรูปที่แปลกอยู่อย่างหนึ่งคือ ระหว่างที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานจะเกิดการสึกหรอ (ถูกตัดหรือกัดออกไป) ขึ้นโดยที่ขั้วไฟฟ้าไม่เป็นเช่นนั้นแต่ตามความเป็นจริงแล้วขั้วไฟฟ้าจะมีอัตราการสึกหรอที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น เงื่อนไขการขึ้นรูปหรือการเลือกใช้วัสดุของขั้วไฟฟ้ากับวัสดุที่ทำงาน สภาพการไหลของสารละลาย ดังนั้นเราจำเป็นต้องคำนวณการสึกหรอนี้ล่วงหน้า เพื่อกำหนดปริมาณสุดท้ายของขั้วไฟฟ้า

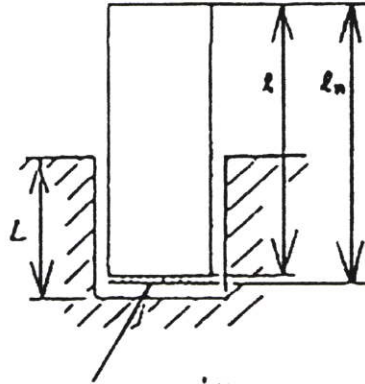
สำหรับอัตราการสึกหรอดังกล่าวนี้ถ้าต่ำกว่า 1% จะเรียกว่า “ไม่สึกหรอ” 1-10% จะเรียกว่า “อัตราการสึกหรอดำ” และถ้าสูงกว่า 10% จะเรียกว่า “มีการสึกหรอ” การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยปกตินั้น ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบ อัตราดังกล่าวจะอยู่ในประเภท “ไม่สึกหรอ” แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียด จะอยู่ในประเภท “อัตราการสึกหรอดำ” หรือ “มีการสึกหรอ” อนึ่งการที่ไม่คำนวณการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายด้วยเงื่อนไขที่ทำให้ “ไม่สึกหรอ” นั้นมีเหตุผลคือ การยอมรับผลเสียจากการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเล็กน้อย เพื่อที่จะขยี้ระดับให้เงื่อนไข(องค์ประกอบ) อื่นๆ ดีเด่นขึ้นมา นั้นจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปที่สูงกว่า

$$\text{อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (\%)} = \frac{\text{ปริมาณที่ขั้วไฟฟ้าสึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)} \times 100}{\text{ปริมาณการขึ้นรูป (g หรือ mm}^3\text{)}} \quad (3.2)$$

### วิธีเอนด์แวย์

ในบางกรณีจะมีการใช้ “วิธีเอนด์แวย์” ซึ่งบอกแสดง อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าด้วยความยาวกตัวอย่าง เช่น ถ้าขั้วไฟฟ้าเป็นกราไฟต์ สารละลายจะซึมเข้าไปในระหว่างการใช้งานขึ้นรูป ทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

$$\text{อัตราการสึกหรอ (\%)} = \frac{\text{ความยาวที่ด้านปลายข้อสึกหายไป (mm)} \times 100}{\text{ความลึกการขึ้นรูป (mm)}} \quad (3.3)$$



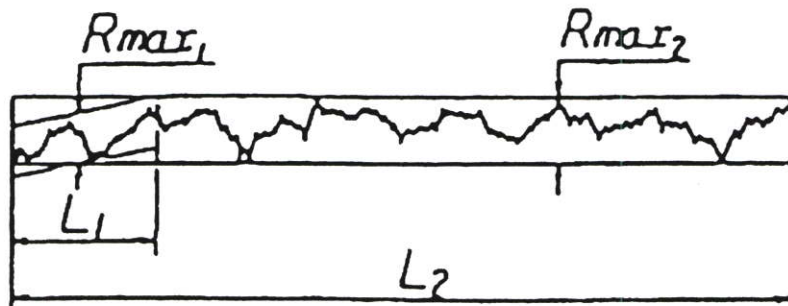
ความยาวที่ข้อไฟ้าสึกหายไป

รูปที่ 3.26 การสึกหรอของข้อไฟ้า

### 3.3.3 ความหยาบละเอียดของผิว

#### 3.3.3.1 ค่าความสูงสุดของความหยาบ $R_{max}$

เป็นวิธีการบอกแสดงที่เลือกเส้นแสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัด ออกมาด้วย ความยาวมาตรฐานระดับหนึ่งและใช้หน่วย  $\mu\text{m}$  ในการบอกแสดงความแตกต่างสูงสุดของภูเขากับเหวที่อยู่ในส่วนนั้น (ภูเขาหรือเหวที่สูงหรือลึกผิดปกติจะไม่นำมานับรวมด้วย)

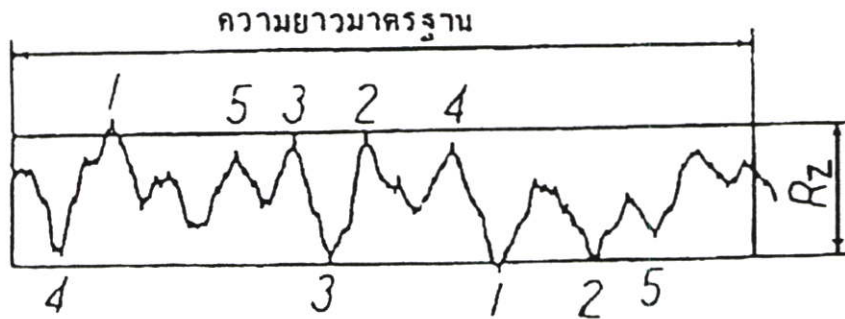


รูปที่ 3.27 ค่าสูงสุดของความหยาบ  $R_{max}$

### 3.3.3.2 ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด $\mu\text{mRz}$

เป็นวิธีบอกแสดงที่เลือกเส้นแสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัด ออกมาด้วยความยาวมาตรฐานระดับหนึ่ง และคำนวณหาความแตกต่างระหว่างความสูงเฉลี่ยของภูเขาที่สูงที่สุด 5 จุด กับความสูงเฉลี่ยของกันเหวที่ลึกที่สุด 5 จุด

$$R_z = \frac{(1+2+3+4+5) - (6+7+8+9+10)}{5} \quad (3.4)$$



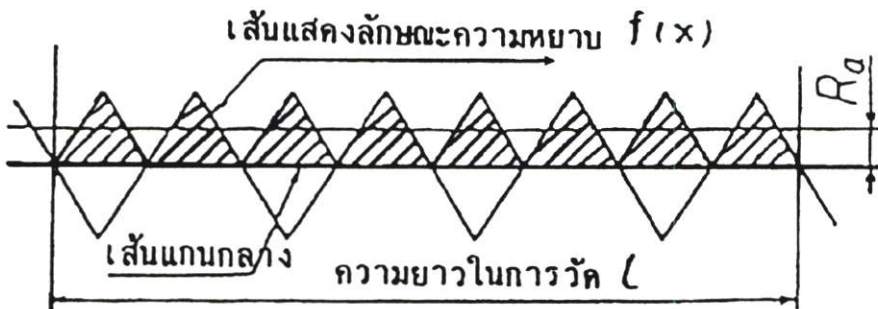
รูปที่ 3.28 ความหมาย Rz

### 3.3.3.3 ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง $R_a$

เป็นวิธีบอกแสดงที่ใช้เส้นแกนกลางเป็นแนวพับสำหรับเส้นแสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัดและหารพื้นที่ส่วนที่ระบายเส้นเฉียงด้วยความยาวในการวัด

วิธีการแปลงหน่วย

$$\begin{aligned} 1 \mu\text{Rmax} &= 6-8 \mu\text{Ra} \\ (\text{ญี่ปุ่น}) &= (\text{ยุโรป}) \end{aligned}$$



รูปที่ 3.29 ความหยาบเฉลี่ย  $R_a$

### วิธีกำหนดความยาวมาตรฐาน

ความหยาบผิวของผิวจะบอกแสดงด้วยความสูงของกราฟ ซึ่งวัดออกมาโดยเครื่องมือวัดแต่อย่างไรก็ตาม เราจำเป็นต้องกำหนด ความยาวมาตรฐาน (ขอบเขตของการวัด) ให้ใช้มาตรฐานเดียวกัน

ตารางด้านล่างนี้แสดงถึงค่ามาตรฐานของความยาวมาตรฐานที่ใช้สำหรับความหยาบระดับต่างๆ ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้บอกแสดงในแบบ เกี่ยวกับค่าสูงสุดของความสูง  $R_{max}$ , ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด  $R_z$ , ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง  $R_a$  ความยาวมาตรฐาน  $L$  และเครื่องสามเหลี่ยม

ตารางที่ 3.1 ค่ามาตรฐานของความยาว L ในการวัดที่เหมาะสมกับค่า Rmax, Rz, Ra ของชิ้นงาน

ประเภทของ Rmax	ประเภทของ Rz	ประเภทของ Ra	ค่ามาตรฐานของ ความยาว L	เครื่องหมาย สัมพันธ์
(0.05 S)	(0.05 Z)	(0.00125 a)	-	▽▽▽▽
0.1 S	0.1 Z	0.025 a		
1.2 S	1.2 Z	0.05 a		
0.4 S	0.4 Z	0.10 a		
0.8 S	0.8 Z	0.20 a	0.25	
1.6 S	1.6 Z	0.40 a	0.8	▽▽▽
3.2 S	3.2 Z	0.80 a		
6.3 S	6.3 Z	1.6 a		
12.5 S	12.5 Z	3.2 a	2.5	▽▽
(18 S)	(18 Z)			
25 S	25 Z	6.3 a		
35 S	(35 Z)	12.5 a	8	▽
50 S	50 Z			
70 S	(70 Z)			
100 S	100 Z			
(100 S)	(140 Z)	(50 a)	-	-
200 S	(200 Z)			
(280 S)	(280 Z)			
400 S	400 Z			
(660 S)	(560 Z)			

(หมายเหตุ) ประเภทที่อยู่ในวงเล็บนั้น ถ้าไม่จำเป็นจริงๆ จะไม่ใช่

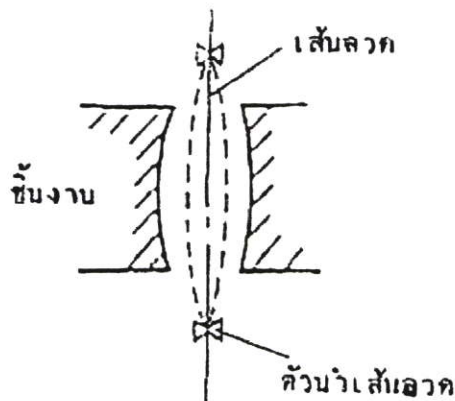
แรงดึงของเส้นลวด รูปที่ 3.30 ประกอบ

เส้นลวดที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังกล่าวนี้ต้องมีความตึงที่เหมาะสม ถ้าเส้นลวดซึ่งเป็นเครื่องมือของ เครื่อง EDM ประเภท Wire Cut หย่อนจะทำให้ความละเอียดในการขึ้นรูปต่ำลง และ

ควบคุมระยะห่างการสปาร์คได้ยากในระหว่างการขึ้นรูปนั้นแรงดันการสปาร์คที่เกิดขึ้นจะถ่ายทอดสู่เส้นลวดซึ่งถูกขึงยึดไว้กับตัวนำเส้นลงบนล่าง ทำให้เส้นลวดเกิดการสั่นไปด้วย ถ้าแรงดึงในเส้นลวดต่ำเกินไป จะทำให้ช่วงระยะการสั่นกว้างมากขึ้น จนมีอิทธิพลต่อความละเอียดของงาน ซึ่งผลเสียที่ตามมาก็คือ จะเกิดปรากฏการณ์ผิวชิ้นงานจะเว้าเข้าเป็นลักษณะแอ่งที่มีกันอยู่ตรงกลางชิ้นงาน ดังในรูป 3.30 (ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “กล่องใหญ่”)

ในทางกลับกัน ถ้าใช้แรงดึงกับเส้นลวดมากจนดึงเกินไป โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์กล่องใหญ่ขึ้นจะน้อยลงแต่เวลาที่สภาพการสปาร์คเกิดการเปลี่ยนแปลงจนมีกระแสไฟฟ้าไหลมากเกินไป อาจจะทำให้เส้นลวดขาดลงได้

นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงในเส้นลวด ก็มีผลต่อความละเอียดในการขึ้นรูปด้วย ดังนั้น เครื่อง EDM ประเภท Wire Cut รุ่นที่มีระดับแรงดันสูงบางรุ่นจะมีกลไกระบบ tension servo ประกอบติดไว้เพื่อควบคุมให้แรงดึงคงที่อยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 3.30 การสั่นของเส้นลวดระหว่างตัวนำ

#### - ความเร็วในการป้อนเส้นลวด

เส้นลวดที่ใช้ในเครื่อง EDM ดังกล่าว จะมีขนาดเล็ก (โดยปกติ  $\phi$  0.2 mm) ซึ่งถ้าเกิดการสปาร์คขึ้นหลายๆ ครั้ง ที่ตำแหน่งเดียวกัน ก็จะทำให้สึกหรองขนาดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการส่งป้อนเส้นลวดด้วยความเร็วคงที่ระดับหนึ่ง เพื่อสำหรับส่งจ่ายเส้นลวดใหม่ๆ มาใช้งานอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่ความเร็วในการส่งป้อนลวดนี้ช้าเกินไป ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบซึ่งมีกระแสไหลผ่านขนาดใหญ่ เส้นลวดก็อาจจะขาดได้ แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ก็จะมีผลเสียต่อความละเอียดของงาน ในทางกลับกันถ้าเร็วเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง (เส้นลวดใช้แล้วทิ้ง) ซึ่งถ้าปริมาณขนาดของลวดที่เตรียมไว้มีไม่มากพอ ก็อาจจะไม่สามารถทำการขึ้นรูปที่ใช้เวลานานได้

- คำนวณ (Guide)

เส้นลวดไม่สามารถทำงานตามลำพังได้ด้วยตนเอง จึงต้องมีตัวนำคอยยึดประคองที่ด้านบนและล่างของชิ้นงาน ส่วนที่เป็นตัวนำนี้เป็นส่วนที่สำคัญมากในเครื่อง EDM ประเภท Wire Cut ที่มีอิทธิพลต่อความละเอียดในการขึ้นรูป เส้นลวดทองเหลืองนี้ถึงจะอ่อนก็จริง แต่จะวิ่งอยู่ตลอดเวลาที่ใช้งาน ดังนั้นตัวนำจึงทำหน้าที่รองรับเส้นลวดนี้ จึงใช้วัสดุประเภทหินแร่ที่มีความแข็งสูง เช่น Ruby, Sapphire ในบางกรณีก็มีการใช้ Diamond ซึ่งมีราคาสูงมาก

รูปแบบของตัวนำนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ๆ ตามรูปทรงหน้าตัด

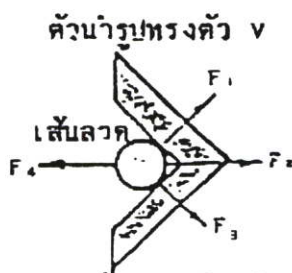
● ตัวนำหน้าตัดทรงตัว V

ตัวนำรูปทรงตัว V นี้ จะมีต้นทุนผลิตที่ไม่สูง แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปในทิศทางที่ปิดของตัว V แล้ว ตัวนำจะต้องรับแรงดันการสปาร์คจากผิวการขึ้นรูป ทำให้แรงดันสัมผัสตัวนำของเส้นลวดต่ำ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้สูญเสียความละเอียดในการขึ้นรูปไป

● ตัวนำหน้าตัดทรงกลม

สำหรับตัวนำที่รูปทรงหน้าตัดกลม (Die) นั้น ส่วนที่สัมผัสกันของตัวนำและเส้นลวดจะเป็นส่วนโค้งของวงกลมทั้งคู่ จึงทำให้ความดันการสัมผัสต่ำ และมีแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง กล่าวคือ ขึ้นรูปได้สม่ำเสมอโดยไม่เลือกทิศทาง แต่การผลิตตัวนำรูปทรงนี้จะยาก และจำเป็นที่จะต้องคอยระวังเกี่ยวกับช่องระยะเผื่อ (Clearance) ระหว่างขนาดเส้นลวดกับขนาดรูตัวนำในการบำรุงรักษาประจำวันอีกด้วย

รายละเอียดของส่วนนี้นั้น แต่ละบริษัทก็มี Know how ของตนเอง จึงไม่สามารถกล่าวสรุปได้ว่าประเภทไหนจะดีกว่ากัน



ตัวนำสามารถรองรับแรง  $F_1, F_2, F_3$  ได้ แต่ไม่สามารถเป็นตัวนำของแรง  $F_4$  ได้

ตัวนำรูปทรงกลม



ถ้ารูใหญ่เกินไปหรือเกิดการสึกหรอ ก็จะทำให้เส้นลวดภายในทำงานได้ไม่เต็มที่

รูปที่ 3.31 ประเภทของตัวนำเส้นลวด

- การขึ้นรูปประเภท taper และการควบคุม

การขึ้นรูปโดยปกติแล้วจะมีหลักการอยู่ว่า ขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นเส้นลวดจะต้องตั้งฉากกับผิวอ้างอิงของชิ้นงาน ซึ่งจะต้องมีการปรับตั้งตัวนำด้านบน และตรวจเช็คระดับความตั้งฉากก่อนการขึ้นรูปด้วย

แต่ถ้าเลื่อนตำแหน่งตัวนำบนล่างให้คลาดเคลื่อนกัน ก็สามารถที่จะเอียงเส้นลวดได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานขึ้นรูปประเภท taper กล่าวคือติดตั้งตัวนำเส้นลวดด้านบนไว้ที่แกน U, V ซึ่งขนานกับแกน x, y และควบคุมทั้ง 4 แกนพร้อมกันด้วยคำสั่งจาก NC

สเปคตามปกติแล้ว จะมีขอบเขตการขึ้นรูปประมาณ  $\pm 5^\circ$  แต่บางเครื่องอาจมีถึง  $\pm 30^\circ$

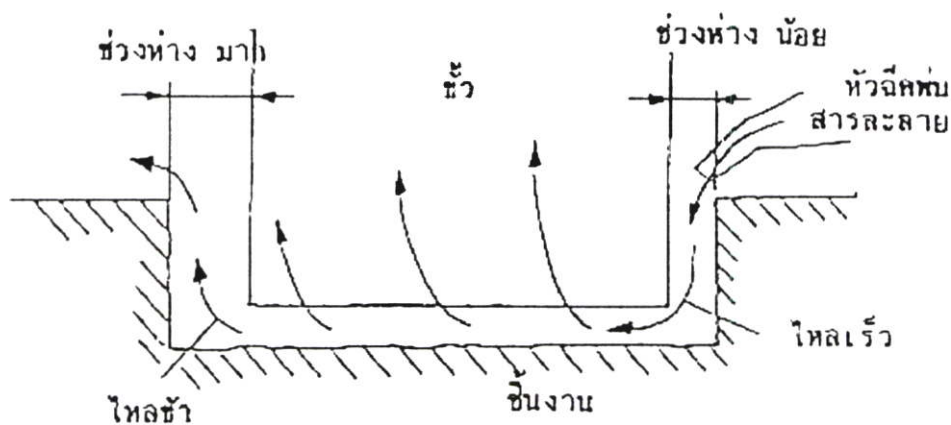
### 3.4 การขึ้นรูปในสารละลาย

เศษที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการสปาร์คไฟฟ้าติดค้างอยู่ในช่องห่างระหว่างขั้วแล้วเศษนั้นจะเป็นตัวไปขัดขวางไม่ให้สามารถสปาร์คได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติจริงเราจะพ่นสารละลายที่ใช้เข้าไปในช่องห่างขั้ว เพื่อล้างนำให้เศษเหล่านั้นไหลออกมา ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในรูปที่ 3.32 จะเห็นได้ว่าความเร็วของสารละลายที่พ่นเข้าไป ถ้ามีความแตกต่างด้านความเร็วของการไหลแล้ว ในส่วนที่สารละลายไหลตัวเข้า ช่องห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะกว้างขึ้น การที่สารละลายไหลตัวเข้านั้นมีสาเหตุมาจากปริมาณเศษที่ลอยค้างอยู่ในช่องห่างระหว่างขั้วที่มีอยู่มาก ทำให้ค่าความต้านทาน ความเป็นฉนวนของสารละลายนั้นๆ ลดต่ำลง และช่องห่างระหว่างขั้วก็จะกว้างขึ้นเท่ากับค่าความต้านทานฉนวนที่ต่ำลง

ลักษณะการเกิดชิ้นจะเกิดขึ้น เช่นกันกับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ซึ่งในการขึ้นรูปลวดของ Wire Cut จะขึ้นรูปคล้ายกับการเจาะร่อง และสารละลายที่พ่นออกมาจาก Guide จะไหลเสาะเข้าไปในร่องอย่างสมดุลเพื่อนำพาเศษที่ได้จากการตัดหลุดออกไป

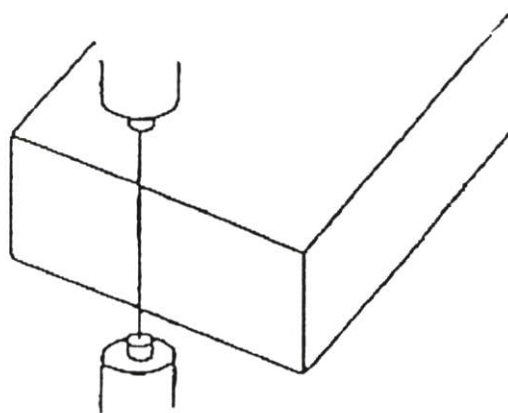
ในการขึ้นรูป ถ้าแรงดัน (ความเร็ว) ของการฉีดพ่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ก็จะยังผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ช่องห่างระหว่างขั้วด้วย นอกจากนี้ การพ่นสารละลายในทิศทางความหนาของชิ้นงานควรจะทำให้สมดุลทั้งส่วนบนและล่าง แต่ในความเป็นจริงแล้ว เราไม่สามารถจะทำให้สมดุลได้ เนื่องจากมีส่วนเกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วง ดังนั้นเราจะพ่นสารละลายทางส่วนบนให้เบาว่าสารละลายที่พ่นจากทางส่วนล่าง หรืออาจจะขึ้นรูปโดยการปิดสารละลายส่วนล่างและพ่นแค่สารละลายส่วนบนเพียงอย่างเดียว



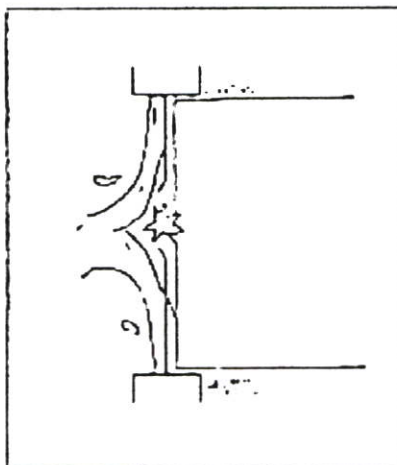
รูปที่ 3.32 ความแตกต่างของการไหลของสารละลายและช่องห่างระหว่างขี้

### 3.4.1 การกระจายหลุดของสารละลาย

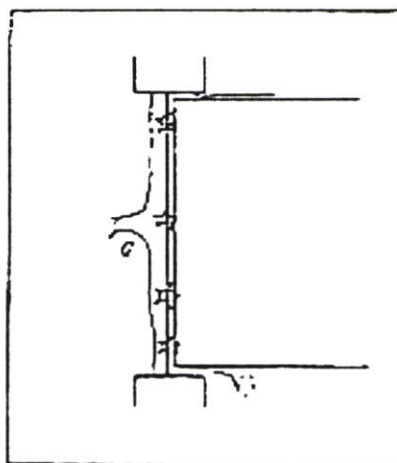
ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM เมื่อเริ่มตัดจากด้านปลายทางชิ้นงานเข้าไป ถ้าเราเปิดแรงดันของสารละลายแรงเกินไปจะทำให้สารละลายนั้นกระจายหลุดจากด้านปลายที่ขึ้นรูปได้เมื่อเกิดการกระจายหลุดขึ้นก็เท่ากับเป็นการสปาร์คในอากาศทำให้สภาพการสปาร์คไม่สมบูรณ์ เป็นผลให้त्वเกิดการขาดขึ้นได้ ดังนั้นเราจะป้องกันการกระจายหลุดของสารละลาย โดยการพ่นสารละลายให้ค่อยลงในช่วงแรก หลังจากขึ้นรูปได้สักระยะหนึ่งจึงเพิ่มแรงดันของการพ่นสารละลายขึ้น



รูปที่ 3.33 ขึ้นรูปจากด้านปลายชิ้นงาน



รูปที่ 3.33.1 พันแรงทำให้สารละลายกระจายหลุดเกิดการสปาร์คในอากาศขึ้น



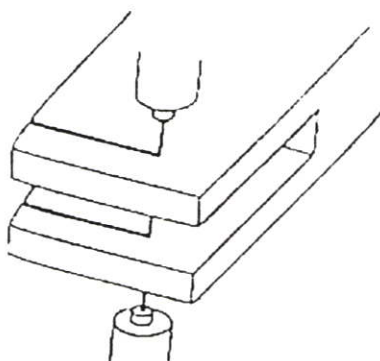
รูปที่ 3.33.2 ลดแรงพันสารละลายลง

#### 3.4.2 การขึ้นรูปแบบแซ่

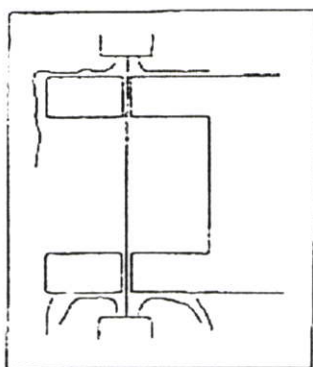
การขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ในบางครั้งอาจเกิดปัญหาขึ้นในเรื่องของสภาพการพันสารละลายเป็นไปไม่ได้ไม่ดีพอ หรือ แรงดันของการฉีดพ่นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่มีการคิดค้นหาวิธีป้องกันขึ้น และวิธีหนึ่งก็คือ “การขึ้นรูปแบบแซ่” เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยการแซ่ชิ้นงานในสารละลายช่วยป้องกันการกระจายหลุดของสารละลายหรือแรงดันพ่นที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนั้น วิธีการขึ้นรูปแบบแซ่นี้ ยังเป็นการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย

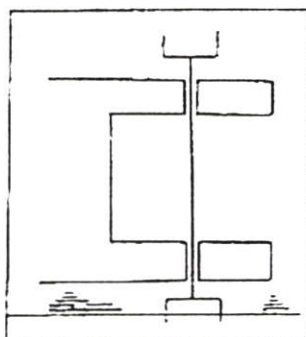
สามารถขึ้นรูปที่มีความละเอียดแน่นอนสูงได้ (อนึ่ง เมื่อความต้านทานจำเพาะของสารละลายที่เป็นน้ำต่ำลงอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอิเล็กโทรไลต์ ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน)



รูปที่ 3.34 การขึ้นรูปชิ้นงานที่ตรงกลางกลวง



รูปที่ 3.34.1 สารละลายที่พุ่งออกไปจะเข้าไปในส่วนกลวงได้ยาก ทำให้เสถียรภาพในการขึ้นรูปไม่  
ดี

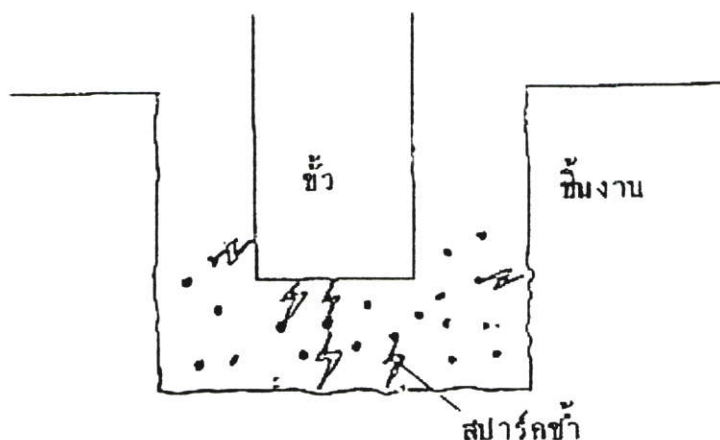


รูปที่ 3.34.2 การขึ้นรูปแบบแฉ่งในสารละลายจะช่วยแก้ปัญหานี้ สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีเสถียรภาพ

### 3.4.3 การสปาร์คช้ำ

ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่แล้ว ปรากฏการณ์สปาร์คจะถูกควบคุมด้วยระบบ NC แต่ไม่ว่าจะเป็นเครื่อง EDM หรือเครื่อง Wire Cut EDM ก็ตาม ถ้าสภาพการสปาร์คในระหว่างขั้วไม่ดีพอ เศษที่ได้จากการขึ้นรูปจะติดค้างอยู่ในช่วงระหว่างขั้วไม่สามารถหลุดออกมาได้ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างเศษกับขั้ว หรือเศษกับชิ้นงาน โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับจังหวะ (Timing) ของคลื่น Pulse ที่ส่งจากวงจรสปาร์คเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การสปาร์คช้ำ”

ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างขั้วกับชิ้นงาน (ระยะสปาร์ค) นั้นจะกำหนดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าไรโพลด พื้นที่สปาร์คและสภาพการพ่นสารละลาย ถ้ามีเศษที่ได้จากการขึ้นรูปลอยตกค้างอยู่ระหว่างขั้ว ก็จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานฉนวนของสารละลายในส่วนนั้นต่ำลงเกิดการสปาร์คไปเป็นได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการสปาร์คที่ไม่สามารถควบคุมได้จะไม่ใช้สภาพการสปาร์คที่เหมาะสม ดังนั้น ผิวชิ้นงานที่ออกมาก็จะหยาบ นอกจากนี้ ช่วงเวลา  $\tau_w$  (ช่วงเวลาชาร์จแรงดันไฟฟ้าไรโพลด) จะสั้นลง ในบางครั้งอาจทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้



รูปที่ 3.35 การสปาร์คช้ำ

### 3.4.4 คุณสมบัติพิเศษของสารละลายและสมรรถภาพการขึ้นรูป

สมรรถภาพของการขึ้นรูปโดยใช้สารละลายที่เป็นน้ำและสารละลายที่เป็นน้ำมันมีความแตกต่างกัน ในที่นี้จะขอกกล่าวเปรียบเทียบตัวเลขให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้น (ตัวเลขเดือนสิงหาคม 2534)

ตาราง 3.2 คุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน

	ขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM	ขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM
	โดยทั่วไป ---> ใช้น้ำมันในการขึ้นรูป	พิเศษ ---> ใช้น้ำในการขึ้นรูป
ใช้น้ำในการขึ้นรูป		<p>ความเร็วในการขึ้นรูป 2 - 10 เท่าของน้ำมัน</p> <p>ความเรียบของผิว 20 <math>\mu</math> mRmax (กำลังพัฒนาให้ได้ถึง 10 <math>\mu</math> mRmax)</p> <p>การใช้งาน : แม่พิมพ์ขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า</p> <p>เครื่องจักร : เครื่อง EDM ความเร็วสูง "ED MILL"</p>
	พิเศษ ---> ใช้น้ำมันในการขึ้นรูป	โดยทั่วไป ---> ใช้น้ำมันในการขึ้นรูป
ใช้น้ำมันในการขึ้นรูป	<p>ความเรียบของผิว 0.5 <math>\mu</math> mRmax</p> <p>การใช้งาน : การขึ้นรูปละเอียดโดยใช้ ลวดบาง</p> <p>เครื่องจักร : เครื่อง Wier Cut EDM ความละเอียดสูง "AP SERIES"</p>	<p>ความเร็วในการขึ้นรูป 30 g/min<sup>2</sup> (กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 300 A)</p> <p>ความเรียบของผิว ต่ำกว่า 1 <math>\mu</math> mRmax</p>

(หมายเหตุ)

คุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและสารละลายน้ำมัน สรุปได้ดังนี้ สารละลายน้ำมัน ความเรียบของผิวจะละเอียด เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปละเอียด หรือ สักส่วนขนาดที่ถูกต้องแน่นอน แต่ความเร็วในการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมันจะช้า สำหรับ สารละลายน้ำหรือน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น ความเร็วในการขึ้นรูปจะรวดเร็ว แต่ความเรียบผิวที่ได้ จะค้ำยกว่าการขึ้นรูปโดยใช้สารละลายน้ำมัน

ตาราง 3.3 สรุปคุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน

	ชนิดของสารละลาย	
	น้ำ	น้ำมัน
ความเร็วในการขึ้นรูป	เร็ว	ช้า
ความเรียบของผิว	หยาบ	ละเอียด

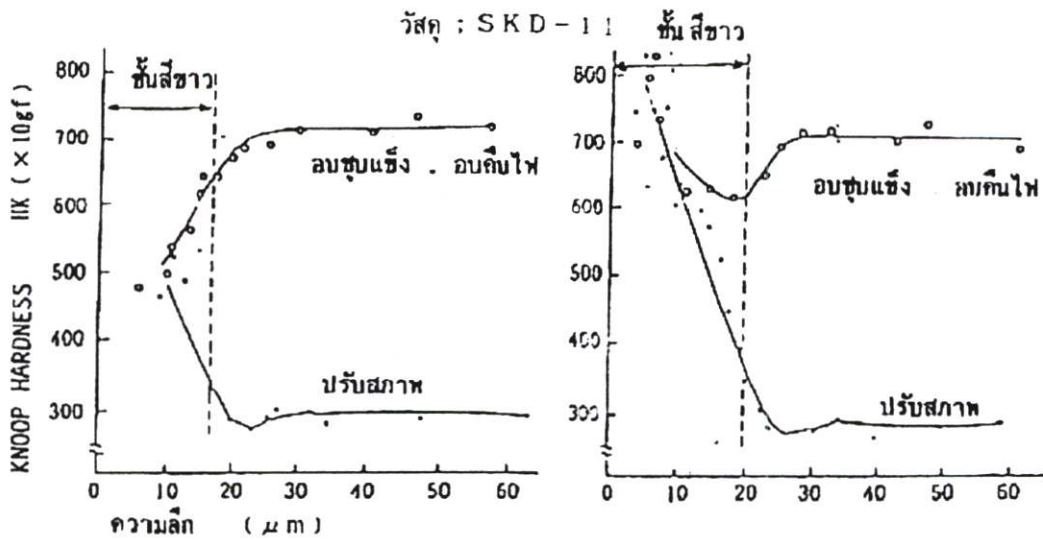
#### 3.4.5 ชั้นผิวที่เกิดจากการขึ้นรูป

การขึ้นรูปโดยการสปาร์ค เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยอาศัยพลังงานจาก การสปาร์คไปทำให้ชิ้นงานบางส่วนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและวัสดุเกิดการละลายตัวดังนั้นผิวของชิ้นงานส่วนที่ขึ้นรูปจะมีชั้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง (Affected Zone) ขึ้น

เหล็กกล้าเมื่อหลอมตัวและถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าเราส่องดูหน้าตัดของด้านที่ขึ้นรูปด้วยกล้องขยายจะเห็นสีขาว ซึ่งเราเรียกว่า ชั้นสีขาว (White Zone) (ดูรูปที่ 3.37 ประกอบ) ชั้นสีขาวนี้เกิดจาก โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่แตกตัวออกและโครงสร้างออสเทนไนต์ (Austenite) ที่เหลือค้าง ส่วนใต้ของชั้นสีขาว แม้ว่าจะไม่ถูกหลอมตัวแต่ก็ได้รับความร้อน ทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์แตกตัวออกและแข็งตัวกลายเป็นชั้น Heat-Affected Zone ขึ้น ซึ่งเราเรียกรวม ชั้นสีขาว และชั้น Heat-Affected Zone นี้ว่า ชั้นผิวเปลี่ยนแปลง (Affected Zone)

รูปที่ 3.36 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของชั้นผิวตามความลึกจากผิวหน้าทั้งการขึ้นรูปในสารละลายน้ำและน้ำมัน เราจะเห็นได้ว่า ในช่วงของชั้นสีขาวความแข็งของบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้าของวิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำจะต่ำลง แต่ความแข็งของวิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมันจะแข็งขึ้น

ความลึกของชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลงตามนี้ แตกต่างกันตามวิธีการให้พลังงานในการขึ้นรูป โดยทั่วไปจะลึกประมาณความหยาบของผิวหรือประมาณ 2 เท่าตัว จากการวิเคราะห์รอยสปาร์คที่เกิดจากการสปาร์คครั้งหนึ่งแล้ว ความลึกของชั้นผิวเปลี่ยนแปลง จะเกี่ยวข้องกับเวลาที่ความร้อนจะแผ่ซ่อนอยู่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ กับการนำความร้อนของวัสดุด้วย

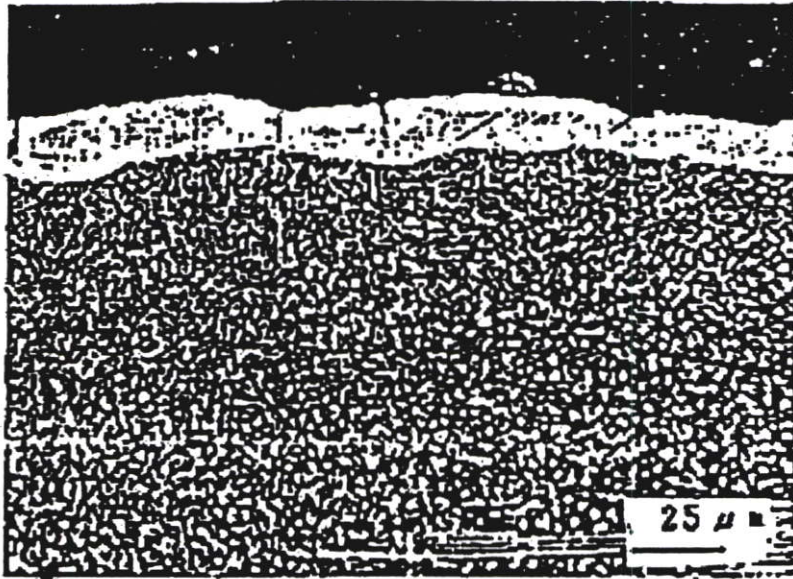


การทำชั้นผิวเปลี่ยนแปลงให้น้อยลงนั้น ทำได้โดยการตั้งกระแสไฟฟ้าสูงสุด  $I_p$  ให้สูง และช่องกว้างของคลื่น Pulse ( $\tau_{on}$ ) ให้สั้น เพื่อทำช่วงเวลาที่ความร้อนจะคงอยู่ที่สั้นลง และในการขึ้นรูปโลหะพยายามให้โลหะที่หลอมตัวลอยหลุดออกไป ไม่เหลือค้างติดอยู่ที่ผิวชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

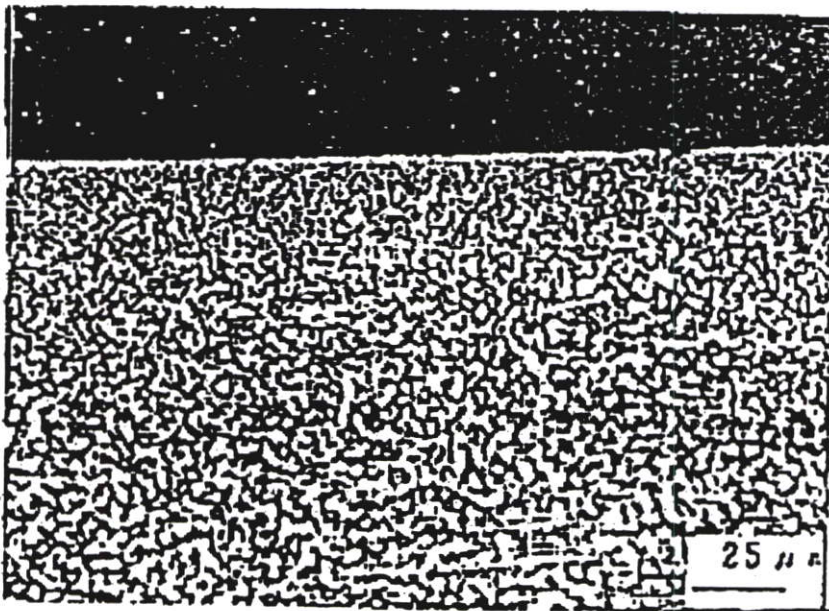
#### ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำมันมีแนวโน้มที่จะแข็งกว่าวัสดุเดิมนั้น เป็นเพราะ ความร้อนจากการสปาร์จะทำให้ คาร์บอนที่แตกตัวออกจากน้ำมัน ถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Carbunization) แม้ว่าชั้นของผิวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะแข็งแต่จะเปราะได้ง่าย ซึ่งเราจะเห็นได้ว่ามีรอยแตกเล็กๆ (Micro Crack) ในชั้นสีขาวของเหล็กกล้าผสมที่มี โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตน อยู่มาก (เหล็กแม่พิมพ์ เหล็กไฮคาร์บไนด์ เป็นต้น)

รูปที่ 3.37 เป็นชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปแบบหยาบในสารละลายน้ำมัน จะเห็นเป็นชั้นสีขาว และรอยแตกเล็กๆ ได้อย่างเด่นชัด รูปที่ 3.38 เป็นการขึ้นรูปแบบละเอียดซึ่งจะทำให้ชั้นสีขาวที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปแบบหยาบหมดหายไป สามารถได้ผิวหน้าที่มีคุณภาพดี มีความแข็งแรงเหมาะสม



รูปที่ 3.37 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปหยาบในสารละลายน้ำมันความละเอียดของผิว 3.8 $\mu$ m



รูปที่ 3.38 ชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปละเอียดในสารละลายน้ำมันความละเอียดของผิว 1.5 $\mu$ m

(หมายเหตุ) วัสดุ : STAVAX ERS (เหล็กกล้าโครเมียม C = 0.38%, Cr = 13.6 % บริษัท UDDEHOLM)

### ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ

ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คในสารละลายน้ำ จะตรงกันข้ามกับสปาร์คในสารละลายน้ำมันคือ ความแข็งแรงของผิวมีแนวโน้มที่จะอ่อนกว่าวัสดุเดิม เพราะมีสาเหตุมาจากสารละลายนี้ไม่ทำให้เกิด Carburization แล้ว ยังเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ชั้นเล็กน้อยที่ผิว อันเนื่องมาจาก ความต้านทานจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าต่ำ ดังนั้นบางส่วนของทองแดงที่ใช้ทำขั้วจะละลายหลุดออกไปรวมกับเหล็กกล้าเหลือคินบนผิวเป็นผลให้ความแข็งแรงของผิวลดลงได้

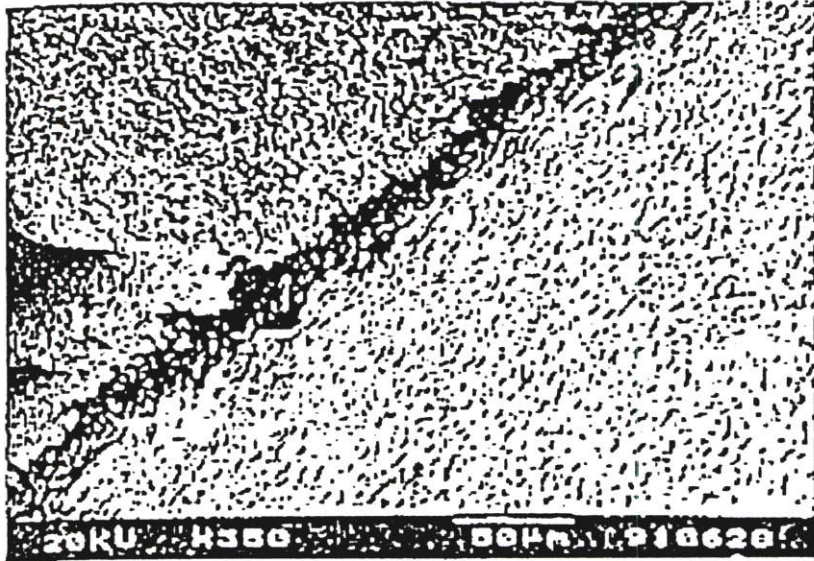
การขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำ นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ซึ่งเราจะพยายามไม่ให้เกิดการแยกตัวเป็นอ็อกไซด์ โดยหาวิธีทำค่าความต้านทานจำเพาะ (ความต้านทานฉนวน) ของสารละลายน้ำให้สูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำ เมื่อถูกความสกปรกของเศษโลหะ จะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงได้ง่าย การที่จะนำค่าความต้านทานให้สูงกว่าปกติ ( $50,000-100,000 \Omega \cdot Cm$ ) จะทำให้การควบคุมดูแลค่าความต้านทานจำเพาะยุ่งยากขึ้น

นอกจากนี้การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ ยังมีการพัฒนาวงจรสปาร์คกระแสสลับ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากลับ (Reverse Voltage) เข้าไปเลี้ยงวงจร ในช่วงเวลาหยุดสปาร์ค ( $\tau_{off}$ )

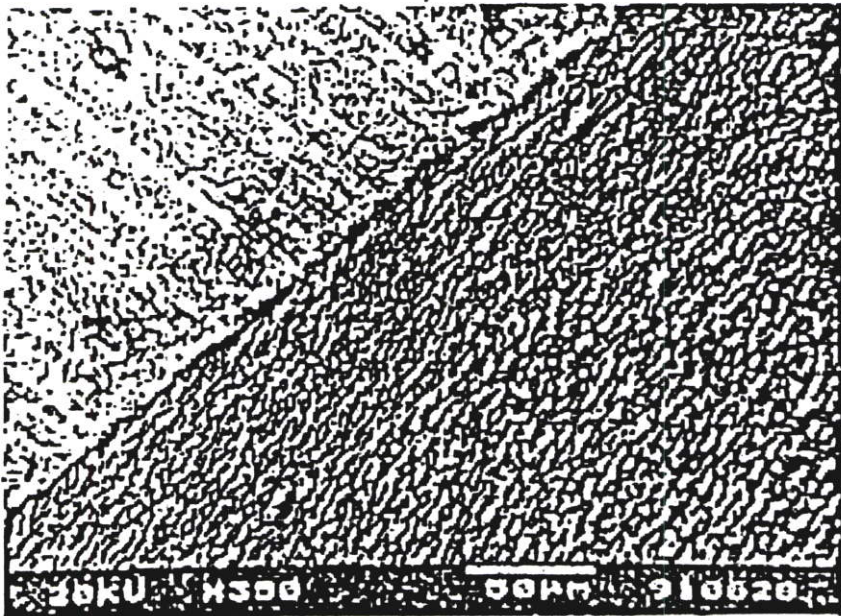
### ข้อดีของการขึ้นรูปเครื่อง Wire Cut EDM ในสารละลายน้ำมัน

รูปที่ 3.39, รูปที่ 3.40 แสดงให้เห็นถึงภาพขยาย (350 เท่า) ของด้านบนและมุมเหลี่ยมของด้านขึ้นรูป ซึ่งผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM

รูปที่ 3.39 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ จะสังเกตเห็นการเกิดการแยกตัวของอ็อกไซด์ที่ด้านบน เห็นเป็นผิวหยาบ และบางส่วนของมุมเหลี่ยมไม่เป็นระเบียบ ส่วนรูปที่ 3.40 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน จะเห็นได้ว่าด้านบนของผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการแยกตัวของอ็อกไซด์ และเหลี่ยมของมุมก็เป็นระเบียบดี



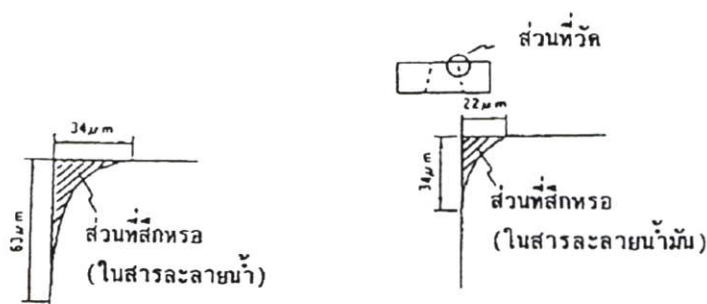
รูปที่ 3.39 เหล็กที่ เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ



รูปที่ 3.40 เหล็กที่ เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

รูปที่ 3.41 เป็นการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมมีดของ Die แม่พิมพ์ Press ดัดเจาะ  
ซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ในสารละลายน้ำและน้ำมัน และผ่านการใช้งานในสภาพ  
เงื่อนไขเดียวกัน

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ถ้าเราขึ้นรูปละเอียดส่วนปลายของ Punch และ Die ของแม่พิมพ์ Press ในสารละลายน้ำมันแล้ว จะทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีความแข็งแรง และ สึกหรอได้ยาก ซึ่งทำให้อายุการใช้งานของปลายคมมีคยาวนานกว่าคมมีคที่ขึ้นรูปในสารละลายน้ำ (ดูรูปที่ 3.41 ประกอบ)



รูปที่ 3.41 เปรียบเทียบการสึกหรอของปลายมีคของ Die (ขึ้นรูปด้วย Wire Cut EDM) วัสดุ : SKD-11, ความแข็ง HRC 59, ขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว 70,000 ชิ้น)

### 3.5 วัสดุที่ใช้ตัดขอบด้วยโคบอลต์ (WC-Co)

ลวดขอบโคบอลต์จะถูกใช้อย่างกว้างขวางสำหรับขึ้นส่วนที่ทนต่อการสึกกร่อนและการตัดขอบเครื่องมือ การที่มีความแข็งและมีความต้านทานต่อการสึกหรอมากทำให้มันยากต่อการที่จะทำการขึ้นรูปชิ้นงานของวัสดุที่มีความแข็งมากๆ จึงจำเป็นต้องใช้ Electrical Discharge Machine (EDM) วิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Petrofes และ Gadalla ขั้นตอนของกระบวนการ EDM เริ่มจากการกัดกร่อนโดยใช้ Controlled Electrical Sparks จะไม่มีโอกาสสัมผัสโดยตรงระหว่าง Electrode และ ชิ้นงาน และไม่มีแรงทางฟิสิกส์ ดังที่กล่าวมาแล้ว ความแข็งและความเปราะของวัสดุสามารถที่จะนำมาทำแม่พิมพ์และเครื่องมือได้ดี

จากการตรวจสอบผลงานที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบที่ออกมา นั้นเกิดจากการที่กระบวนการ EDM เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการละลายผิวของ WC-Co และทำให้โคบอลต์หมดไป

การผลิตโดยใช้วิธี EDM ถูกกล่าวว่าเป็นผลผลิต Carbide ของการผลิตที่บกพร่องของวัสดุที่ทำออกมาได้ไม่ดี เหตุผลจริงๆ สามารถแสดงให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่า ไม่มีข้อจำกัดของการทำงานในการใช้การเรียงแถวของตัวเก็บประจุที่เป็นตัวเก็บพลังงาน ไฟฟ้านี้จะถูกปล่อยออกมาเพื่อทำให้เกิดประกายไฟ เมื่อเกิดความแตกต่างของความต่างศักย์ของฉนวนออรอนที่มาถึง

ภายหลังจากการที่พลังงานถูกปล่อยออกมาตัวเก็บประจุเริ่มสะสมพลังงานใหม่สำหรับการสปาร์คครั้งต่อไป ปัญหาที่เกิดขึ้นกับ Power Supply ชนิดนี้ก็คือ ตัวเก็บประจุอาจจะ Charged สำหรับสปาร์คครั้งหนึ่งๆ สามารถปลดปล่อยพลังงานได้มากที่สุดและเคลื่อนย้ายวัสดุจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามสำหรับการสปาร์คครั้งอื่นๆความแตกต่างของกระแส (Gap Voltage) อาจจะได้ค่าที่เหมาะสมก่อนที่ Capacitor จะเต็ม ดังนั้น การปลดปล่อยพลังงานจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณภาพที่ไม่ค่อยดี โดยได้บอกในหัวข้อข้างต้นแล้ว ในเครื่องชนิดใหม่ Power Supply ชนิดให้สัญญาณ Pulse จะถูกใช้พลังงานที่ปลดปล่อยโดยการสปาร์คจะถูกควบคุมและให้อยู่ในรูปสัญญาณ pulse ที่เที่ยงตรงโดยให้เป็นช่วงๆ

#### เทคนิคการทดลอง

ลักษณะของการพิจารณาที่ประกอบขึ้นจากสิ่งต่างๆ

การพิจารณาครั้งนี้ใช้ WC=Co 3 ตัว ที่มี WC grain ขนาด 1-3  $\mu\text{m}$  และมีส่วนประกอบที่เป็นโคบอลท์อยู่ 6, 12 และ 24% จะถูกเลือกมาศึกษาถึงผลของส่วนประกอบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของ WC grain จะพิจารณาว่า ส่วนประกอบทั้ง 3 มี โคบอลท์ 6% และขนาด grain 1-3, 2-4 และ 3-6  $\mu\text{m}$  ผลสรุปของคุณสมบัติที่ได้จากส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.4 ค่าความแข็ง (hardness) และ modulus ของความยืดหยุ่นจะลดลง เมื่อส่วนประกอบที่เป็นโคบอลท์เพิ่ม ในขณะที่ค่าความเหนียวแตกหัก และสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นคุณสมบัติจะลดลง ขณะอุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าของส่วนประกอบที่เป็นโคบอลท์สูงจะถูกรักษาไว้ ความพรุน 2.0%, 3.0%, 7.3% ได้จากส่วนประกอบที่เป็นโคบอลท์ 6, 12 และ 24 % ตามลำดับ

ตาราง 3.4 คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่างๆ

Cobalt content (%)	WC grain size ( $\mu\text{m}$ )	Hardness ( $R_A$ )	Thermalexpansion $\times 10^6$ °C
6	1-3	91.1+0.4	4.55
12	1-3	89.4+0.5	5.36
24	1-3	86.9+0.6	6.30
6	1-3	91.4+0.4	4.55
6	2-4	88.6+0.5	4.68
6	3-6	87.3+0.5	4.85

ตาราง 3.4 (ต่อ)คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่างๆ

Cobalt content (%)	WC grain size ( $\mu\text{m}$ )	Elastic modul ( $\text{kg/mm}^2$ )	K ic ( $\text{Mpa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ )
6	1-3	65.0+2.5	9.1+0.7
12	1-3	60.5+2.3	11.0+0.9
24	1-3	44.2+3.2	6.9+2.6
6	1-3	65.0+2.5	9.1+0.7
6	2-4	60.9+1.9	13.4+0.9
6	3-6	59.4+2.2	17.4+2.6

ตาราง 3.4 (ต่อ)คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่างๆ

Cobalt content (%)	WC grain size ( $\mu\text{m}$ )	Eectrical conductivity (mhos/cm.)	Thermal conductivity (W/m-k)
6	1-3	0.0585	100
12	1-3	0.0585	105
24	1-3	0.056	93
6	1-3	0.0585	100
6	2-4	0.0610	105
6	3-6	0.0620	107

ตารางที่ 3.4 จำนวน โคบอลต์, ค่าความแข็ง, ค่า Modulus ยึดหยุ่นจะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของ WC grain มีขนาดเพิ่มขึ้น ขณะที่สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิความเหนียวแตกหัก, อุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงต่างๆ นี้เชื่อว่าจะเกิดจากบริเวณที่มีพันธะค้ำและการเพิ่มจำนวนโคบอลต์ หมายถึง ระยะทางระหว่าง WC grain ที่ทำให้ WC grain ใหญ่ขึ้น

Wire Cut EDM ซึ่งผลิตโดย Agietron Characterization ใน Switzerland ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนที่ใช้ในการตัดจะใช้รุ่น 612 และส่วนที่ใช้ในการควบคุมจะใช้รุ่น CNC-100 ส่วนของการควบคุมจะใช้ pulse ที่เปลี่ยนตามเวลา ความหนาแน่นของกระแส และความถี่ขณะที่

กำลังรักษาอัตราการจ่ายลวดที่ 30 mm/min สายลวดประกอบด้วยทองแดง 63% และสังกะสี 37% ส่วนผสมของน้ำที่ไม่แตกตัวและถูกกักไว้จะถูกใช้เป็นของเหลว Dielectric และอัตราส่วนจะถูกปรับเพื่อให้ค่าความจุคงที่ 6 s/cm การใช้กำลังงานจะถูกกำหนดไว้ในแต่ละกลุ่มของภาระการทำงาน เช่น rectangular pulse ตัวยก โดยการหาค่ากำลังด้วยอัตราค่าที่เคลื่อนที่ไปมีการตัดชิ้นส่วนตัวอย่าง และผิวตามขวางที่ถูกตัด JSM-25 S Scanning Electron Microscope ถูกใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบและโครงสร้างพื้นผิว X-ray photoelectron spectroscopy XPS ทำขึ้นจาก Kratos XSAM 800 ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว

ตัวเลขของ Vickers micro hardness ถูกกำหนดโดย EDM-ed, diamond sawed (เลื่อยที่มีพื้นแข็งมาก) และการกระทำต่อพื้นผิว

ดูเหมือนว่า การใช้ Power Supply ชนิด Pulse เพื่อกำหนดรูปร่างและคาบเวลาของ Pulse ที่แน่นอนและเป็นตัวให้กำเนิดความร้อนซึ่งเป็นตัวทำลายโครงสร้างของพื้นผิว

การใช้ Power Supply ชนิด Pulse ผู้เขียนพบว่าช่วงเวลาที่โคบอลต์หลอมละลายระหว่าง Off Time เมื่อ Plasma เกิดการปะทะกันทำให้เกิด Shock Wave เคลื่อนที่ออกจาก WC grain (ดูจากรูปที่ 3.42) ระหว่างขั้นตอนนี้ของเหลวพยายามที่จะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง และเนื่องจากการขยายตัวอย่างมากของอุณหภูมิของพื้นที่รอบแตกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นบนพื้นผิวนั้นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของ โคบอลต์และขนาด Grain ของ WC



รูปที่ 3.42 EDM-ed Surface texture of WC-Co

(6%, 1-3 $\mu$ m WC grains) using operating condition of: 1-10A, t-1.4 s, f-0.56 kHz

ความเค้นที่ถูกสร้างขึ้นจะหลงเหลืออยู่ภายในพื้นผิวของ EDM-ed ถูกคำนวณแล้วโดยการใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาโดย Cel และ Fachette ซึ่งคิดจากรัศมีความโค้ง ซึ่งเป็นการวัดด้วยสายตาในทางวิทยาศาสตร์ โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง

ในการใช้ capacitant type power supply นั้น Zolotvkil และ Korobova ได้แสดงให้เห็นว่า EDM ของ WC-Co สามารถผลิต microcrack ที่ surface full ได้โดยมีช่องว่างระหว่าง 21 ถึง 630  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Bormann ได้แสดงให้เห็นว่าโคบอลต์จะถูกทำให้หมดไปจากพื้นผิว Bormann ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้ว่า Cobalt binder มีความสามารถในการเหนียวมาก ในขณะที่ carbide granules สามารถต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน binder และรอบๆ carbide granules นี้จะทำให้เกิด distergration ของโคบอลต์ และเกิดแรงดึงที่เก็บเอา granules เอาไว้ด้วยกัน จากการติดตาม high-energy EDM pulse นี้ granule บางตัวจะถูกปลดปล่อยจนหมดและจะหายไป ส่วน granules อื่นๆ บางส่วน จะถูกเก็บไว้ที่ที่เฉพาะ และอาจ flake away ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม นอกจากนี้ความร้อนที่สูงขึ้นจาก EDM spark จะละลายรอบๆ ขอบของ carbide granules

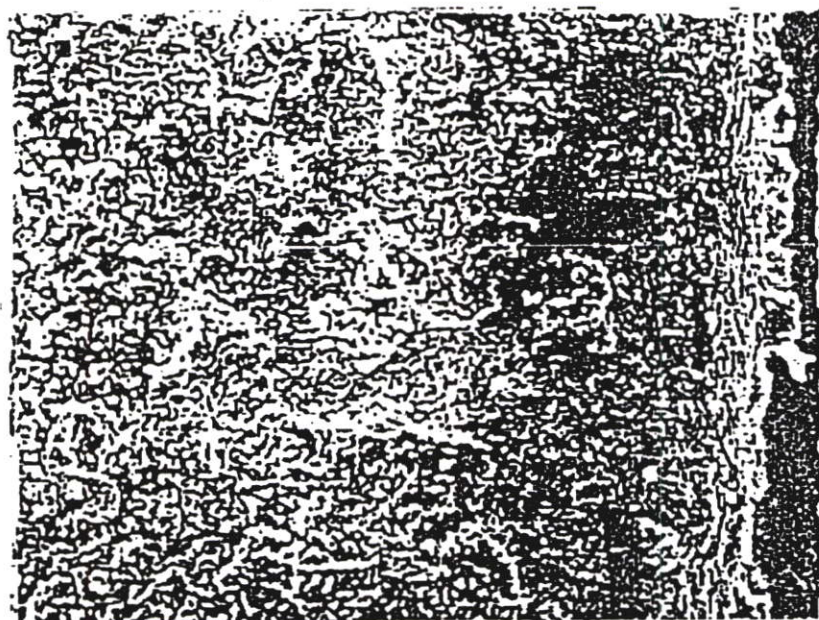
ในทางกลับกัน การวิเคราะห์ Scanning electron microscopy (SEM) แสดงให้เห็นว่า ขณะที่กำลังใช้ขบวนการ EDM ที่มี power supply ชนิด pulse จะทำให้พื้นผิวที่ทำออกมาถูกปกคลุมด้วยหยดน้ำเล็กๆ รอบแตกเล็กๆ เป็นสิ่งเดียวที่สังเกตเห็นได้จากบนพื้นผิวที่มีโคบอลต์เป็นองค์ประกอบ 24% คาดว่ารอยแตกนี้จะแตกน้อยกว่า  $\mu\text{m}$  ดังนั้นมันจึงไม่เจาะทะลุเข้าไปภายใต้พื้นผิว

ตารางที่ 3.5 แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด

t (s)	I (A)	f (kHz)	cutting rate (mm/min)	Rate of removal (mm <sup>2</sup> /min)
1.00	0.75	0.58	0.25	0.30
1.40	0.75	0.58	0.26	0.31
1.75	0.75	0.58	0.29	0.35
2.25	0.75	0.58	0.31	0.37
2.50	0.75	0.58	0.32	0.38
3.00	0.75	0.58	0.32	0.38
3.50	0.75	0.58	0.32	0.38
1.40	0.50	0.58	0.19	0.22
1.40	0.75	0.58	0.26	0.31
1.40	1.00	0.58	0.32	0.38
1.40	1.25	0.58	0.32	0.38
1.40	1.50	0.58	0.32	0.38
1.40	0.75	0.50	0.20	0.24
1.40	0.75	0.60	0.26	0.31
1.40	0.75	0.70	0.31	0.37
1.40	0.75	0.80	0.32	0.38
1.40	0.75	1.25	0.32	0.38
1.40	0.75	2.00	0.32	0.38

ตารางที่ 3.5 แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด (ต่อ)

t (s)	I (A)	f (kHz)	Power	Energy per unit volume removed
1.00	0.75	0.58	0.031	6.20
1.40	0.75	0.58	0.043	8.30
1.75	0.75	0.58	0.053	9.20
2.25	0.75	0.58	0.089	11.20
2.50	0.75	0.58	0.076	12.00
3.00	0.75	0.58	0.092	14.50
3.50	0.75	0.58	0.107	16.90
1.40	0.50	0.58	0.028	7.60
1.40	0.75	0.58	0.043	8.30
1.40	1.00	0.58	0.057	9.00
1.40	1.25	0.58	0.071	11.20
1.40	1.50	0.58	0.086	13.60
1.40	0.75	0.50	0.037	9.30
1.40	0.75	0.60	0.044	8.50
1.40	0.75	0.70	0.052	8.40
1.40	0.75	0.80	0.059	9.31
1.40	0.75	1.25	0.092	14.50
1.40	0.75	2.00	0.147	23.20



รูปที่ 3.43 EDM-ed surface texture of WC-Co

(12% Co, 1-3  $\mu\text{m}$  WC grains) using operation conditions of: 1-10A, t-1.4 s, f-0.56 kHz

ในการเพิ่มขึ้นของกระแส-ความถี่ หรือช่วงเวลาของสัญญาณ pulse ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเร็วการตัด และอัตราการเคลื่อนที่ที่มีตำแหน่งแน่นอนที่ซึ่งต้องใช้พลังงานมากกว่าโดยปราศจากการเคลื่อนที่ในสภาวะการทำงาน สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ที่มากที่สุดนั้นสามารถได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบ และขนาดของ grain พบว่าขณะที่มีการนำไฟฟ้าอย่างสูงขององค์ประกอบที่ส่วนมากเป็น โคบอลท์หรือองค์ประกอบที่มี WC grain อย่างหนาแน่น ชีตจำกัดของอัตราการทำงานสูงสุดสามารถ ประยุกต์เพื่อให้เกิดอัตราการเคลื่อนที่เร็วสูงกว่าได้ (ตารางที่ 3.5) การวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่เคลื่อนที่

### 3.6 ภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่อง CNC Wire Cut EDM

ในการที่จะนำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมเครื่องจักรกลให้ได้พอดีนั้นต้องกำหนดภาษาระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และต้องต่อเชื่อมโยงมาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล เรียกว่า ภาษาเครื่องจักรกล ในระบบ ISO CODE ซึ่งจะมีโค้ดต่างๆ ที่สำคัญอยู่ 4 โค้ด

- ก. G-Code ใช้ส่งอ่านคอมพิวเตอร์
- ข. M-Code ใช้เรียกโปรแกรม
- ค. T-Code ใช้ปรับ Parameter ของเครื่อง
- ง. H-Code ใช้ปรับ Off-Set

### ตารางที่ 3.6 จีโค้ด (G-Code)

G-Code	Group	Function
G00		เลื่อนโต๊ะงานจนเส้นลวดแล้วหยุด
G01		ตัดตามเส้นตรง หรือตัดเฉียง
G02	A	ตัดเป็นส่วนโค้งตามเข็มนาฬิกา
G03		ตัดเป็นส่วนโค้งทวนเข็มนาฬิกา
G04	B	หยุดชั่วขณะ (หน่วยเวลา)
G40		ยกเลิกชดเชยรัศมีเส้นลวด
G41	G	ชดเชยรัศมีเส้นลวดไปทางซ้าย
G42		ชดเชยรัศมีเส้นลวดไปทางขวา
G50		ยกเลิกคำสั่งทำ Taper
G51	H	ทำ Taper ไปทางซ้าย
G52		ทำ Taper ไปทางขวา
G54		ย้าย Coordinate 0
G55		ย้าย Coordinate 1
G56		ย้าย Coordinate 2
G57	I	ย้าย Coordinate 3
G58		ย้าย Coordinate 4
G59		ย้าย Coordinate 5
G90		โปรแกรมคิดระยะ โคออดิเนตถึงจุดที่ กระทำ
G91	J	โปรแกรมคิดระยะจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง
G92		การตั้ง X, Y เป็นศูนย์

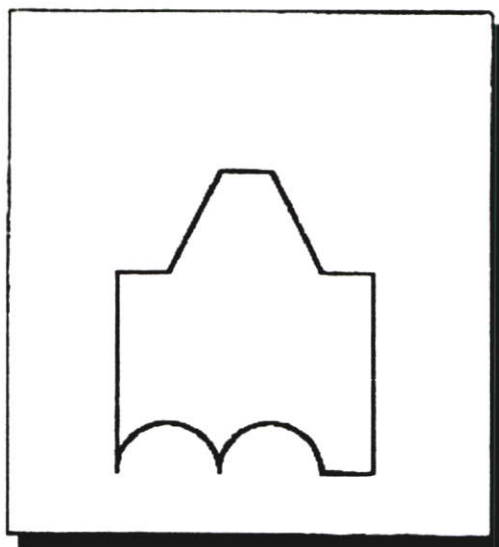
ตารางที่ 3.7 เอ็มโค้ด (M-Code)

M-Code	Function
M00	หยุดโปรแกรมก่อนขึ้นชิ้นงานขาด
M01	โปรแกรมหยุดขึ้นอยู่กับที่ตั้ง Flag
M02	จบโปรแกรมแล้วให้คอมพิวเตอร์อ่านใหม่
M05	ยกเลิก Sendor touch ใช้คู่กับการป้อนโต๊ะงาน
M98	เรียกโปรแกรมย่อย
M99	จบการเรียกโปรแกรมย่อย

ตารางที่ 3.8 ทีโค้ด (T-Code)

T-Code	Function
T80	สั่งให้ลวดเดิน
T81	สั่งให้ลวดหยุดเดิน
T84	เปิดปั๊มน้ำมันหล่อเย็น
T85	ปิดปั๊มน้ำมันหล่อเย็น
T86	เปิดการใช้ Flush
T87	ปิดการใช้ Flush
T94	เปิดการใช้ Submerge
T89	ปิดการใช้ Submerge
T96	เปิด Sink Pump
T97	ปิด Sink Pump

## ตัวอย่างชิ้นงานและตัวโปรแกรมของ Wire Cut EDM



### การเขียนโปรแกรมกึ่งระยะโคออดิเนตถึงจุดที่กระทำ

G90 (ABSOLUTE)

G92 X0. Y40. ;

G41 H015 G01 X0. Y30. ;

G41 H167 G01 ;

G01 X-10. Y20. ;

G02 X-30. Y20. ;

G01 X-30. Y20. I-10. J0. ;

G01 X-20. Y-30. ;

G01 X-20. Y-10. ;

G02 X-10. I5. J0. ;

G01 X-10. Y-20. ;

G02 X0. Y-30. ;

G02 X30. Y-30. ;

G02 X30. Y-30. I15. J0. ;

G01 X30. Y0. ;

G03 X10. Y20. I-10. J40. ;

G01 X0. Y30. ;  
G41 H015 G01 X0. Y40. ;  
M02

**การเขียนโปรแกรมคิดระยะจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง**

G91 (INCREMENTAL)  
G92 X0. Y40. ;  
G41 H015 G01 X0. Y-10. ;  
G41 H167 ;  
G01 X-10. Y-10. ;  
G02 X-20. Y0. I-10. J0. ;  
G01 X0. Y-50. ;  
G01 X10. Y10. ;  
G01 X0. Y10. ;  
G02 X10. Y0. I5. J0. ;  
G01 X0. Y-10. ;  
G01 X10. Y-10. ;  
G02 X30. Y0. I15. J0. ;G01 X0. Y30. ;  
G03 X-20. Y20. I-10. J10. ;  
G01 X-10. Y10. ;G41 H015 G01 X0. Y10. ;  
M02

## บทที่ 4

### ทฤษฎีการออกแบบการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

สมมติว่าเรามีระดับซึ่งแตกต่างกันของปัจจัยเดียวที่เราต้องการเปรียบเทียบ และค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นกลุ่มตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรจะมีลักษณะเหมือนกัน ในตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าต่างที่แสดงในตาราง (เช่น  $y_{ij}$ ) หมายถึง ค่าสังเกตที่  $j$  ภายใต้ระดับที่  $i$  หรือโดยทั่วไปจะมีค่าสังเกต  $n$  ค่าภายใต้ ระดับ  $i$

เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่างๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้น คือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (4.1)$$

โดยที่  $y_{ij}$  เป็นค่าสังเกตที่  $ij$  ซึ่ง  $i$  มีค่า 1 ถึง  $a$ ,  $j$  มีค่า 1 ถึง  $n$  และ  $\mu$  คือพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า “มัชฌิมรวม (Overall Mean)”  $\tau_i$  คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่  $i$  หรือผลกระทบจากระดับที่  $i$  และ  $\varepsilon$  คือองค์ประกอบความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จุดประสงค์ของเราคือเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่างๆ และทำการประมาณค่าของมัน สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ และเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัย

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment							
(level)		Observations			Totals	Averages	
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$	
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$	
.	.	.	...	.	.	.	
.	.	.	...	.	.	.	
.	.	.	...	.	.	.	
a	$y_{a1}$	$y_{a2}$	...	$y_{an}$	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$	
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$	

แบบจำลองนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Analysis of Variance)” เพราะมีเพียงปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลอง จะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองในต่างๆ (เรียกว่า “หน่วยการทดลอง (Experimental Units)”) จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า “การออกแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)”

แบบจำลองทางสถิติในสมการ 4.1 อธิบายความแตกต่างของ 2 สถานการณ์ที่เกี่ยวกับผลกระทบของระดับ อันดับแรกคือ ระดับ a ระดับสามารถถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ทดลอง ในที่นี้เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับมัธยฐานของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่เราพิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้ได้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่เราไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนั้น เราก็อาจจะต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง  $(\mu, \tau, \sigma^2)$  ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกันถ้าระดับ a ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่างๆ ที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับตัวอย่างของระดับที่ใช้) ของเราไปยังทุกๆ ระดับของประชากร ถึงแม้ว่าเราอาจจะไม่ได้ทำการพิจารณาระดับนั้นๆ อย่างชัดเจนก็ตาม ในการวิเคราะห์ในที่นี้  $\tau_i$  คือ ตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับค่าตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างใด เราทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ  $\tau$ , และพยายามที่จะประมาณค่าความแปรผันนี้ ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model)”

#### 4.1.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า  $\alpha$  หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยสามารถบอกได้ว่า  $H_0 : \mu_1 = \mu_2$  ถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คำกล่าวสรุปมักจะไม่ใช่เพียงพอ เพราะไม่ได้บอกให้ผู้ตัดสินใจรู้ว่าค่าทดสอบทางสถิติที่คำนวณได้คอยู่ที่ใดบนพื้นผิววิกฤต ยิ่งกว่านั้นการหาผลลัพธ์โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นที่พึงพอใจ เนื่องจากผู้ทำการทดลองบางคนอาจไม่ต้องการใช้ระดับความเสี่ยงที่  $\alpha = 0.05$

วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ  $H_0$  และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้เรายังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก  $H_0$  ก็ได้

ปกติแล้วเรานิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก  $H_0$  ถูกปฏิเสธดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า  $\alpha$  ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

การคำนวณหา P-Value ที่แม่นยำไม่ใช่สิ่งที่ทำได้ง่ายนัก แต่โปรแกรมทางสถิติใหม่ๆ ก็จะมีค่านี้แสดงไว้ หรือแม้แต่ในเครื่องคำนวณแบบที่สามารถพกพาได้

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตอนนี้เราจะค้นหาว่า การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการในกรณีที่ไม่มีความแตกต่างในมัธยฐานของระดับ ( $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$  หรือ  $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$ ) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากเราต้องสมมติให้  $\varepsilon_{ij}$  มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน มีมัธยฐาน = 0 และค่าความแปรปรวน  $= \sigma^2$  ค่าสังเกต  $y_{ij}$  มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีมัธยฐาน  $= \mu + \tau_i$  และความแปรปรวน  $\sigma^2$  ดังนั้น  $SS_T$  คือ ผลรวมของกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า  $SS_T / \sigma^2$  จะมีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี  $N-1$  ระดับขั้นความเสรี ยิ่งกว่านั้นเราสามารถแสดงได้ว่า  $SS_E / \sigma^2$  มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี  $N-a$  ระดับขั้นความเสรี และ  $SS_{Treatment}$  มีการกระจายแบบ Chi-Square ที่มี  $a - 1$  ระดับขั้นความเสรี ถ้าสมมติฐานหลัก  $H_0 : \tau_i = 0$  เป็นจริง อย่งไรก็ตาม ค่าผลรวมของกำลังสองทั้ง 3 ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน เพราะ  $SS_E$  และ  $SS_{Treatment}$  รวมกันเป็น  $SS_T$  ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มีประโยชน์ในการสร้างความเป็นอิสระให้แก่  $SS_E$  และ  $SS_{Treatment}$

#### ทฤษฎีของ Cochran

ให้  $Z_i$  เป็น NID (0,1) สำหรับ  $i = 1, 2, \dots, v$  และ

$$\sum_{i=1}^v Z_i^2 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_s \quad (4.2)$$

ซึ่ง  $s \leq v$ , และ  $Q_i$  มี  $v_i$  ระดับขั้นความเสรี ( $i = 1, 2, \dots, s$ ) ดังนั้น  $Q_1, Q_2, \dots, Q_s$  เป็นการแจกแจง Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า  $v_1, v_2, \dots, v_s$  ระดับขั้นความเสรีตามลำดับ ก็ต่อเมื่อ

$$v = v_1 + v_2 + \dots + v_s \quad (4.3)$$

เพราะระดับขั้นความเสรีของ  $SS_{Treatment}$  และ  $SS_E$  รวมกันเท่ากับ  $N - 1$  ซึ่งเป็นระดับขั้นความเสรีรวมทั้งหมด ทฤษฎีของ Cochran บอกเป็นนัยว่า  $SS_{Treatment} / \sigma^2$  และ  $SS_E / \sigma^2$

เป็นตัวแปรอิสระที่มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น ถ้าหากสมมติฐานหลักคือ ไม่มีความแตกต่างของมัธยิมของระดับเป็นจริง ดังนั้นอัตราส่วน

$$F_0 = \frac{SS_{Treatments} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \quad (4.4)$$

จะมีการแจกแจงแบบ F ด้วยระดับขั้นความเสรีเท่ากับ  $a - 1$  และ  $N - a$  สมการ (4.4) คือ สถิติทดสอบสำหรับสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างของมัธยิมของระดับ

จากค่าคาคหมายกำลังสองเฉลี่ยเราพบว่า โดยทั่วไป  $MS_E$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  ภายใต้สมมติฐานหลัก  $MS_{Treatment}$  จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ  $\sigma^2$  เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาคหมายของ  $MS_{Treatment}$  จะมากกว่า  $\sigma^2$  ดังนั้นภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาคหมายของตัวตั้งของสถิติทดสอบ (สมการ 4.4) จะมากกว่าค่าคาคหมายของตัวหาร และเราจะปฏิเสธ  $H_0$  ถ้าค่าของสถิติทดสอบมีค่าที่มาก หรือค่าดังกล่าวตกอยู่ในบริเวณวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ( $F_{\alpha, a-1, N-a}$ ) ดังนั้นเราจะปฏิเสธ  $H_0$  และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัธยิมของระดับถ้า

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (4.5)$$

ซึ่ง  $F_0$  คำนวณได้จากสมการ 4.4 หรือโดยการใช้ P-Value ในการตัดสินใจก็ได้

สูตรสำหรับคำนวณผลรวมของกำลังสองสามารถหาได้จากการเขียนและลดรูปของ  $MS_{Treatment}$  และ  $SS_T$  จะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (4.6)$$

และ

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (4.7)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองสามารถหาค่าได้จากการลบ กล่าวคือ

$$SS_E = SS_T - SS_{Treatment} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนการทดสอบได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งเรียกว่า “ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table)”

ตารางที่ 4.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว แบบจำลองผลกระทบคงที่

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	$F_0$
Between treatments	$SS_{Treatment}$	$a - 1$	$MS_{Treatment}$	$F_0 \frac{MS_{Treatment}}{MS_E}$
Error (within treatment)	$SS_E$	$N - a$	$MS_E$	
Total	$SS_1$	$N - 1$		

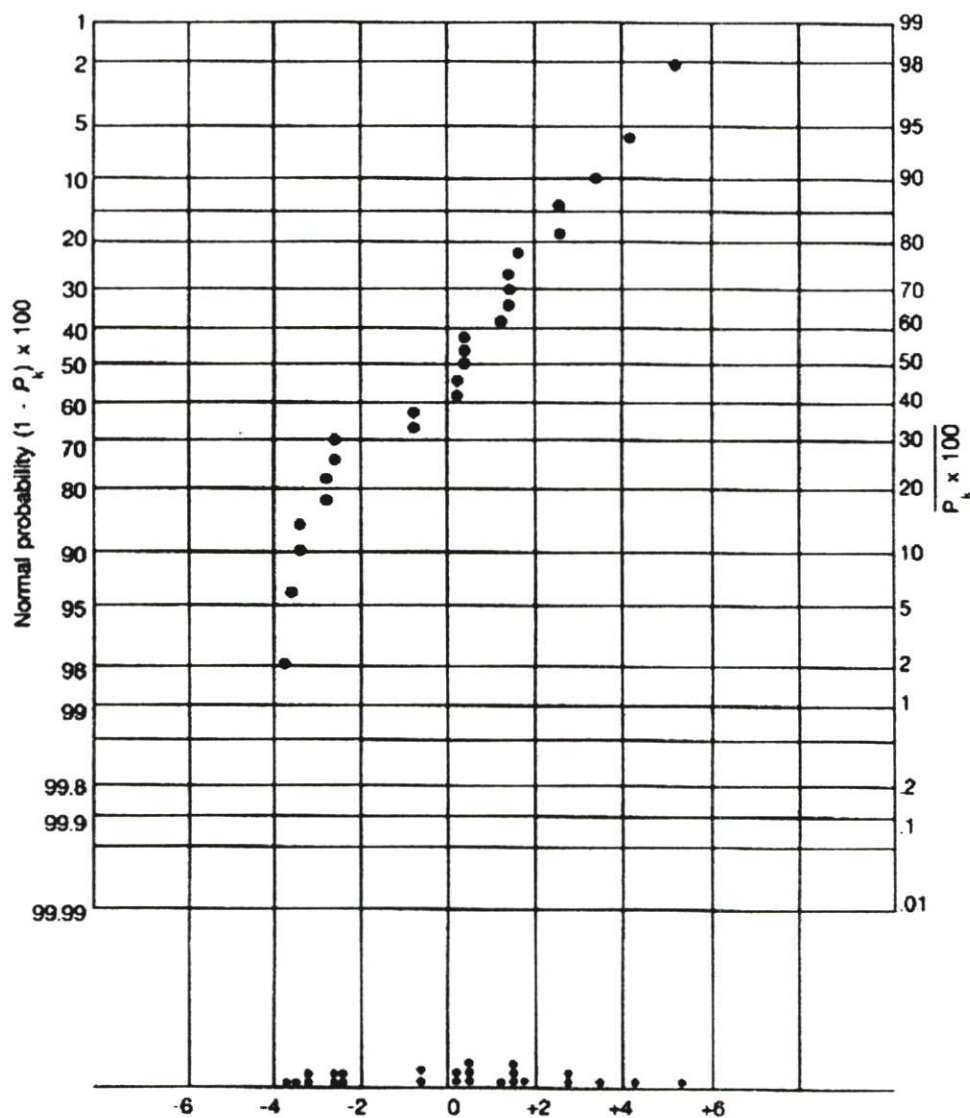
#### 4.1.3 สมมติฐานของความเป็นปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการพล็อตฮิสโทแกรมของส่วนตกค้าง ถ้าหากสมมติฐานที่ว่า ความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบ  $NID(0, \sigma^2)$  เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติซึ่งจะมีมัธยฐานเท่ากับ 0 แต่ในกรณีที่มีตัวอย่างน้อย พบว่ามักจะเกิดการแกว่งของข้อมูลขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติในระดับปานกลางไม่ได้หมายถึงการฝ่าฝืนสิ่งที่กล่าวอยู่ในสมมติฐานอย่างรุนแรงแต่ในกรณีที่มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติอย่างมาก จะมีผลกระทบอย่างรุนแรงและต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป

ขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ขั้นตอนการพล็อตดังกล่าวนี้มีประโยชน์อย่างมากและทำได้โดยตรงไปตรงมา ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติรูปที่พล็อตขึ้นมาจะเป็นเส้นตรง เราควรจะมุ่งเน้นการมองเส้นตรงนี้ไปที่มัธยฐานของรูปมากกว่าค่าที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด

รูปที่ 4.1 แสดงถึง normal Probability Plot ระหว่างส่วนตกค้างกับ  $P_r \times 100$  บนแกนตั้งขวามือ สังเกตด้านล่างของรูปจะมีแผนภาพแบบจุดของค่าส่วนตกค้างแสดงอยู่ จากการพิจารณาแผนภาพนี้พบว่า การแจกแจงของความผิดพลาดอาจจะมีการบิดเบี้ยวเล็กน้อย โดยทางด้านขวาจะยาวกว่าด้านซ้าย แนวโน้มของ Normal Probability Plot จะงอลงเล็กน้อยที่ทางด้านซ้ายของการแจกแจงซึ่งหมายความว่า การแจกแจงของความผิดพลาดจะเบาบางกว่าที่ควรจะเป็นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการแจกแจงแบบปกติ นั่นหมายความว่า ค่าส่วนตกค้างที่มีค่าเป็นลบไม่ได้

มีขนาดใหญ่เหมือนที่คาดเอาไว้ อย่างไรก็ตาม รูปที่ถูกพล็อตขึ้นมาไม่ได้แสดงความไม่เป็นปกติ แต่อย่างไร



รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot และแผนภาพแบบจุดของส่วนตกค้าง

โดยทั่วไปการเบี่ยงเบนปานกลางจากความเป็นปกติจะมีผลน้อยมากสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบผสมกระทบคงที่ การกระจายของความผิดพลาดที่มีทางหนึ่งที่น่ากว่าหรือบางกว่าปกติจะมีความสำคัญมากกว่าการบิดเบี้ยวของรูปร่าง เพราะว่าเป็นการทดสอบ F จะได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เรากล่าวได้ว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะมีความทนทานต่อการเบี่ยงเบนในสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติ การเบี่ยงเบนจากความเป็นปกติมักจะก่อให้เกิดระดับนัยสำคัญที่แท้จริงและทำให้กำลังของการทดสอบ (Power of Test) แดกต่าง (ลดลง) เพียงเล็กน้อยจากค่าที่คิดไว้ สำหรับแบบจำลองแบบผลกระทบสุ่ม (Random Effect Model) จะ

ได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าในกรณีที่เกิดความไม่เป็นปกติขึ้นในแบบจำลอง โดยเฉพาะระดับความเชื่อมั่นที่แท้จริงบนการประมาณ ช่วงของส่วนประกอบของความแปรปรวนอาจจะแตกต่างกันอย่างมากจากค่าที่คิดเอาไว้

สิ่งที่ผิดปกติที่เห็นบ่อยบน Normal Probability Plot คือ ส่วนตกค้างบางค่ามีมากกว่าตัวอื่นๆมาก หรือเรียกว่า “Outlier” การที่มี Outlier เพียง 1 ค่าหรือมากกว่าจะทำให้การวิเคราะห์ความแปรปรวนบิดเบือนไป ดังนั้นถ้าหากมี Outlier ที่สำคัญปรากฏขึ้น เราควรจะมีการตรวจสอบอย่างระมัดระวังบ่อยครั้งการเกิด Outlier มาจากความผิดพลาดจากการคำนวณหรือการเข้ารหัสให้แก่ข้อมูล หรือความผิดพลาดจากการคัดลอกข้อมูล ถ้าสิ่งเหล่านี้ไม่ใช่สาเหตุ เราควรตรวจสอบภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง แต่ถ้าหาก Outlier เป็นค่าแตกต่างในทิศทางที่ดี (ความแข็งแรง ต้นทุนต่ำ ฯลฯ) ดังนั้น Outlier อาจจะเป็นตัวที่ให้ข้อมูลที่มีความสำคัญกว่าข้อมูลตัวอื่นๆ เราจึงไม่ควรที่จะมองข้ามหรือละเลยค่า Outlier เหล่านี้โดยไม่มีเหตุผลทางสถิติที่เพียงพอ อย่างน้อยที่สุดเราอาจจะจบการทดลองด้วยการวิเคราะห์ 2 ลักษณะ คือ ทำโดยรวมเอา Outlier เข้าไปด้วย และทำโดยไม่รวม Outlier

มีหลายวิธีการที่เป็นทางการในการตรวจหา Outlier ในการตรวจหา Outlier อย่างง่าย อาจทำได้โดยการตรวจส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (Standardized Residual)

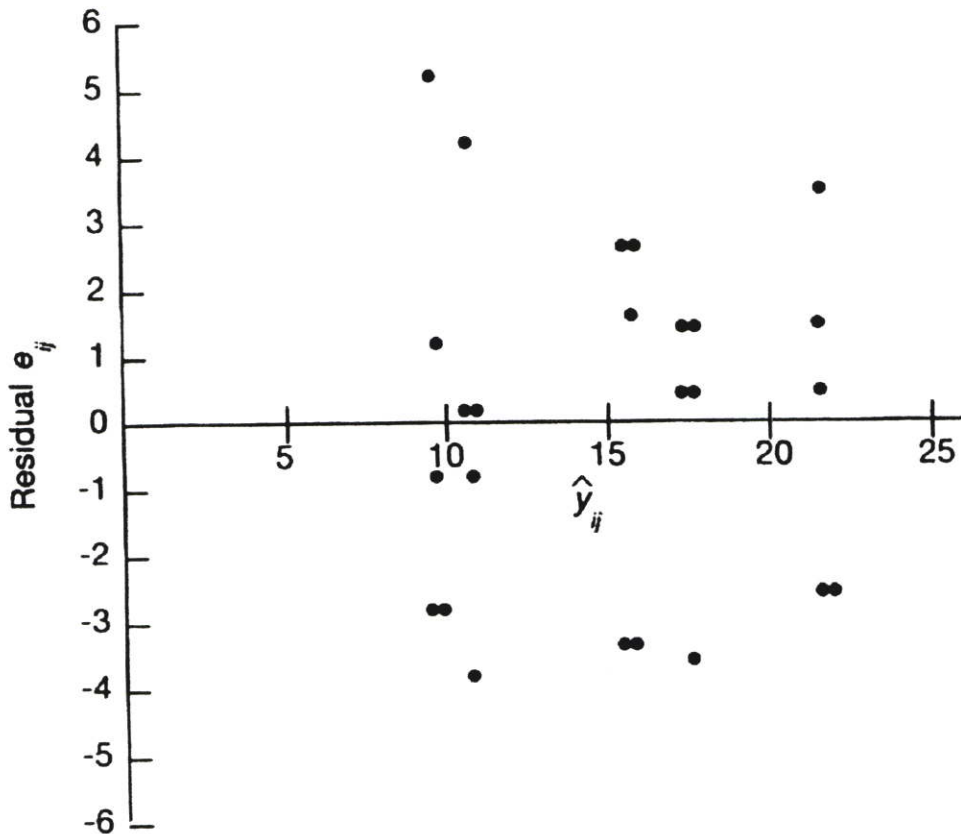
$$d_{ij} = \frac{e_{ij}}{\sqrt{MS_E}} \quad (4.9)$$

ถ้าหากว่าค่าความผิดพลาด  $e_{ij}$  เป็น  $N(0, \sigma^2)$  ดังนั้น ส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรประมาณได้เป็นการกระจายแบบปกติ มีมัธยฐานเป็นศูนย์และมีความแปรปรวน 1 หน่วย ดังนั้น ประมาณ 68% ของส่วนตกค้างที่ถูกเทียบเป็นค่ามาตรฐานควรจะตกอยู่ในช่วง  $\pm 1$  ประมาณ 95% ควรตกในช่วง  $\pm 2$  และประมาณ 99% ควรตกอยู่ในช่วง  $\pm 3$  ค่าส่วนตกค้างที่มากกว่า 3 หรือ 4 ของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานถือเป็น Outlier ที่น่าจะถูกนำมาพิจารณา

#### 4.1.4 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าของผลตอบที่ถูกทำนาย (Predicted Response) อีกด้วย การตรวจสอบอย่างง่าย ๆ คือ การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value)  $\hat{y}_{ij}$  (สำหรับแบบจำลองทิศทางเดียว จะมี  $\hat{y}_{ij} = \bar{y}_i$  หรือค่าเฉลี่ยของระดับที่  $i$ ) กราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะ

แต่อย่างไรรูปที่ 4.2 เป็นการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตของข้อมูลจากรูปพบว่าไม่มีโครงสร้างที่ผิดปกติสังเกตปรากฏให้เห็น



รูปที่ 4.2 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

สิ่งผิดปกติซึ่งแสดงให้เห็นในกราฟ คือ ความแปรปรวนที่ไม่คงตัว บางครั้งความแปรปรวนของค่าสังเกตเพิ่มในขณะที่จำนวนของการสังเกตเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นถ้าหากความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนอยู่เบื้องหลังในการทดลองมีขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คงที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดของค่าสังเกต (ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นบ่อยๆ ในกรณีของเครื่องมือวัด กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอ่านสเกล) ถ้าเป็นเช่นนี้จริง ค่าของส่วนตกค้างจะมากขึ้นเมื่อ  $y_{ij}$  เพิ่มขึ้น และกราฟของส่วนตกค้างกับ  $\hat{y}_{ij}$  จะมีรูปร่างเหมือนเป็นกรวยปลายเปิด ความแปรปรวนที่ไม่คงตัวจะเกิดในกรณีที่ข้อมูลนั้นไม่มีการแจกแจงแบบปกติและบิดเบี้ยวด้วย เพราะว่าการแจกแจงที่บิดเบี้ยวจะทำให้ความแปรปรวนมีแนวโน้มที่จะเป็นฟังก์ชันของมัชฌิม

ถ้าหากสมมติฐานของความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของความแปรปรวนไม่ถูกต้อง ในกรณีของแบบจำลองผสมกระทบคงที่แบบได้คู่ การทดสอบ F จะถูกกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบที่ไม่ได้คู่ หรือกรณีที่ความแปรปรวนค่าหนึ่งมากกว่าค่าอื่นมากๆ

ปัญหานี้จะมีความผิดพลาดรุนแรงขึ้น ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนของความผิดพลาดจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของความแปรปรวนอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบที่ได้คุกกี้ตาม

วิธีการจัดการเกี่ยวกับความแปรปรวนไม่คงตัวเมื่อเกิดขึ้นกับกรณีข้างบนคือ การประยุกต์ใช้ “การแปลงความแปรปรวนให้คงที่ (Variance Stabilizing Transformation)” และจากนั้นก็ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนกับข้อมูลที่มีการแปลงเรียบร้อยแล้ว โดยวิธีการนี้ควรสังเกตว่า ข้อสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ได้กับประชากรที่ถูกแปลงแล้วเท่านั้น

งานวิจัยจำนวนมากกำลังดำเนินการอยู่เพื่อศึกษาถึงการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ถ้าหากผู้ทดลองทราบถึงการแจกแจงทางทฤษฎีของค่าสังเกต เขาควรจะใช้ข้อมูลนี้ในการทำการเลือกการแปลงที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าสังเกตเป็นไปตามการแจกแจงแบบปัวส์ซอง ดังนั้นการแปลงโดยใช้รากที่สองโดย  $y_{ij}^* = \sqrt{y_{ij}}$  หรือ  $y_{ij}^* = \sqrt{1 + y_{ij}}$  ควรจะถูกนำมาใช้ แต่ถ้าข้อมูลมีการแจกแจงแบบ Lo-Normal ดังนั้นการแปลงแบบลอการิทึม โดย  $y_{ij}^* = \log y_{ij}$  จะเป็นวิธีการแปลงที่เหมาะสมในกรณีของข้อมูลแบบไบโนเมียลซึ่งจะแสดงในรูปของเศษส่วน การแปลงแบบ Arcsin โดย  $y_{ij}^* = \arcsin \sqrt{y_{ij}}$  จะเป็นวิธีการแปลงที่ดี แต่เมื่อไม่มีการแปลงที่เด่นชัดที่จะนำมาใช้ ผู้ทดลองควรจะหาการแปลงซึ่งทำให้ความแปรปรวนมีค่าเท่ากัน โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าเฉลี่ย ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ให้เลือกการแปลงที่ทำให้ค่าอันตรกิริยากำลังสองเฉลี่ย (Interaction Mean Square) มีค่าน้อยสุด ซึ่งทำให้การทดลองสามารถแปลความหมายได้ง่าย

#### 4.2 การออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบ

การพิดและวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้นถ้าเราเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ในส่วนนี้ จะขออธิบายเกี่ยวกับแนวทางในการเลือกการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ เมื่อจะเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบ ลักษณะของการออกแบบที่ต้องการบางประการที่ควรพิจารณา คือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of Fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นได้ในบล็อกละ
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องทำการทดลองเป็นจำนวนมาก

7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ลักษณะสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ในบางครั้งอาจขัดแย้งกันได้ ดังนั้น จะต้องมีการไต่ตรองอย่างคึกก่อนที่จะเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

#### 4.2.1 การออกแบบสำหรับพีคแบบจำลองอันดับหนึ่ง

สมมุติว่าเราต้องการพีคแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง (First-Order Model) ที่มี  $k$  ตัวแปร

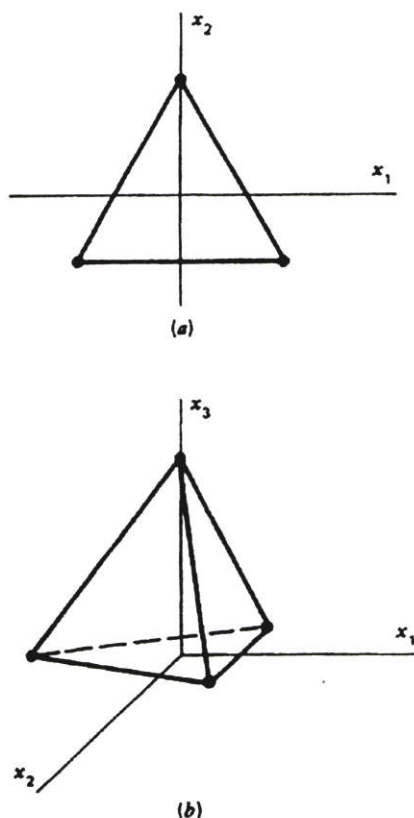
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (4.10)$$

ซึ่งเป็นประเภทของการออกแบบพิเศษชนิดหนึ่งที่จะทำให้ความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์ของการถดถอย  $\{\hat{\beta}_i\}$  มีค่าต่ำที่สุด และเรียกว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับหนึ่ง (Orthogonal First-Order Design) การออกแบบอันดับที่หนึ่งจะเป็นเชิงตั้งฉากถ้าส่วนประกอบทุกตัวของเมทริกซ์  $(x'x)$  ที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งบอกให้ทราบว่า ผลคูณไขว้ของคอลัมน์ของเมทริกซ์  $x$  รวมกันเท่ากับศูนย์

ตัวอย่างของการออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งคือ  $2^k$  แฟกทอเรียล และเศษส่วนของอนุกรม  $2^k$  ซึ่งมีผลหลักไม่ได้เป็นคู่แฝดแฝง (Alias) ซึ่งกันและกัน ในการใช้การออกแบบนี้ เราสมมุติว่าระดับต่ำและสูงของปัจจัย  $k$  ถูกเข้ารหัสให้อยู่ในรูปของ  $\pm 1$

ในการออกแบบ  $2^k$  นั้น เราจะไม่สามารถประมาณความผิดพลาดของการทดลองได้นอกเสียจากว่า บางรันถูกเรพลิเคต วิธีการทั่วไปสำหรับการทำเรพลิเคตให้แก่การออกแบบ  $2^k$  คือเพิ่มหลายค่าสังเกตเข้าไปที่ศูนย์กลางของการออกแบบ (จุด  $x_i = 0, i = 1, 2, \dots, k$ ) การเพิ่มจุดศูนย์กลางเข้าไปยังการออกแบบ  $2^k$  จะไม่ส่งผลกับ  $\hat{\beta}_i$  สำหรับ  $(i \geq 1)$  แต่ตัวประมาณของ  $\beta_0$  จะกลายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ยิ่งกว่านั้น การเพิ่มจุดศูนย์กลางยังไม่ได้แปลงคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของการออกแบบแต่ประการใด

การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งอีกตัวอย่างหนึ่ง คือ ซิมเพล็กซ์ (Simplex) ซึ่งเป็นรูปประกอบด้านข้างทั่วไปที่มีจุดยอด  $k + 1$  จุดใน  $k$  มิติ ดังนั้นสำหรับ  $k = 2$  การออกแบบซิมเพล็กซ์จะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และสำหรับ  $k = 3$  จะเป็นรูปทรงสี่หน้าหรือกรวยสามเหลี่ยม (Tetrahedron) การออกแบบซิมเพล็กซ์ใน 2 และ 3 มิติถูกแสดงในรูป 4.3

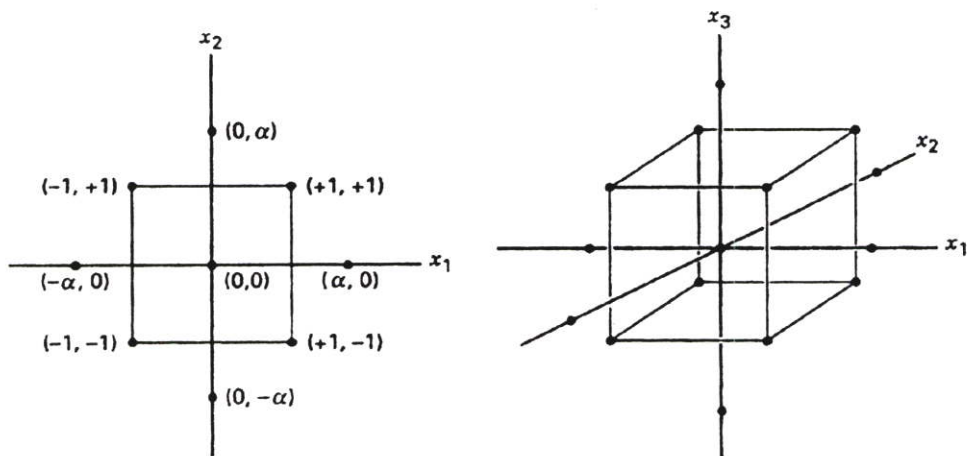


รูปที่ 4.3 การออกแบบซิมเพลกซ์สำหรับตัวแปร (a)  $k = 2$  และ (b)  $k = 3$

#### 4.2.2 การออกแบบสำหรับพีดแบบจำลองอันดับที่สอง

เราจะกล่าวถึงการออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD ซึ่งใช้ในการพีดแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบนี้เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพีดแบบจำลองลักษณะเช่นนี้ โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $n_c$  รัน,  $2^k$  รันในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) และ  $n_c$  รันที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 4.4 แสดง CCD สำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$  ปัจฉย

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ  $2^k$  ถูกนำมาใช้เพื่อพีดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง แล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูลนี้ ดังนั้น จึงได้มีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้เราสามารถใส่พจน์ควอดราติกกลงในแบบจำลอง CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพีดแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์อยู่ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง  $n_c$  ซึ่งเราจะกล่าวถึงในตอนต่อไป



รูปที่ 4.4 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$

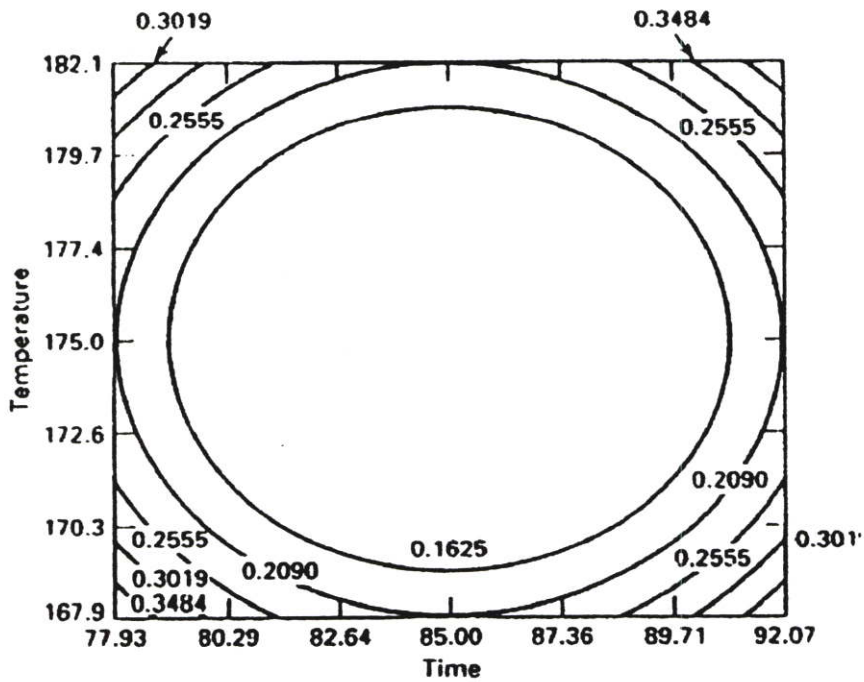
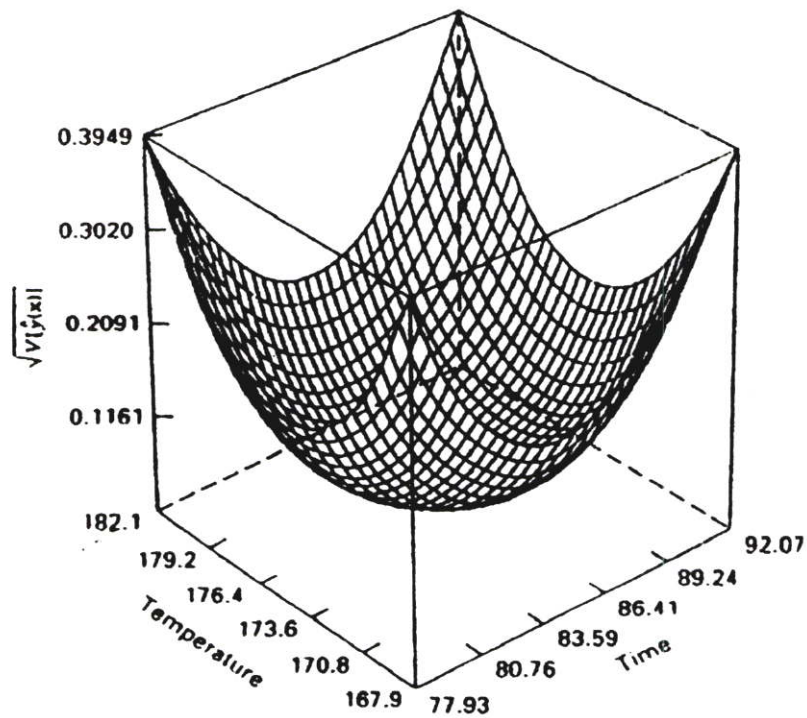
#### 4.2.2.1 ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” ก็คือแบบจำลองนี้จะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมีเหตุผล และมีความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด  $x$  คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(x'x)x \quad (4.11)$$

ซึ่งถูกแนะนำว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า  $V[\hat{y}(x)]$  คือ จุด  $x$  ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม

รูปที่ 4.5 แสดงเส้นโครงร่างของค่าคงตัว  $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$  สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกพิด โดยใช้ CCD สังเกตได้ว่า เส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางร่วมกัน การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{y}$  ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง  $(0, 0, \dots, 0)$  ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable Design)

(a) contours of  $\sqrt{V(\hat{y}(x))}$ 

(b) The response surface plot

รูปที่ 4.5 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ที่ถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการออกแบบพื้นผิวผลตอบ เพราะ ว่า วัตถุประสงค์ของ RSM คือ การหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลที่ดีกว่า ที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง (เราสามารถแสดงได้ว่า การออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับหนึ่งจะเป็นแบบที่หมุนได้)

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ  $\alpha$  ค่าของ  $\alpha$  สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว  $\alpha = (n_r)^{1/4}$  จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่สามารถหมุนได้ โดยที่  $n_r$  คือจำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

#### 4.2.2.2 CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าจะใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตาม การออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เรากำลังสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ  $\alpha$  หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้  $\alpha = \sqrt{k}$  การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้จุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $\sqrt{k}$

#### 4.2.2.3 จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือกค่า  $\alpha$  ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับได้ ตามปกติแล้ว ขอแนะนำให้ใช้ 3 – 5 การทดลอง

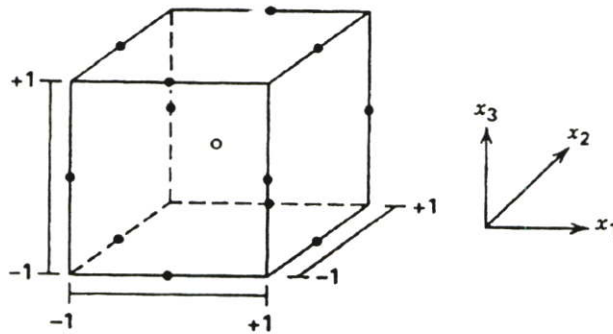
#### 4.2.3 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับ สำหรับพิดพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบ  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.6 สังเกตว่า การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  นอกจากนี้ การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

ตาราง 4.3 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

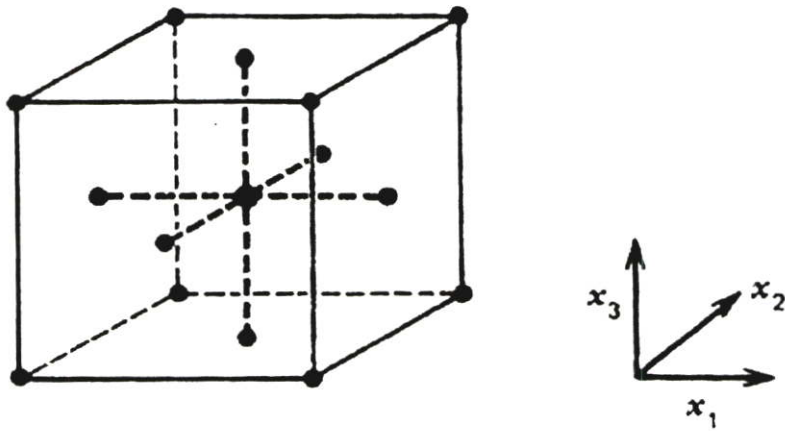
Run	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 4.6 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับสามตัวแปร

#### 4.2.4 บริเวณที่สนใจแบบคิวบอยด์

มีเหตุการณ์มากมายที่บริเวณที่อยู่ในความสนใจเป็นแบบคิวบอยด์ (Cuboidal) แทนที่จะเป็นรูปทรงกลม ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Central Composite) หรือ Face-Centered Cube ที่มี  $\alpha = 1$  ซึ่งมีการพัฒนามาจากส่วนประสมกลาง จะเป็นการออกแบบที่มีประโยชน์อย่างมาก การออกแบบนี้วางจุดดาว (Star) หรือจุดในแนวแกน (Axial) อยู่บนจุดศูนย์กลางของหน้าของรูปทรงลูกบาศก์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 สำหรับ  $k = 3$  การออกแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการออกแบบนี้ต้องการเพียง 3 ระดับของแต่ละปัจจัยเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทำได้ยากในทางปฏิบัติอีกด้วย อย่างไรก็ตาม จะต้องจำไว้ว่า การออกแบบนี้ไม่สามารถหมุนได้



รูปที่ 4.7 การออกแบบ Face-Centered ส่วนประสมกลาง สำหรับ  $k = 3$

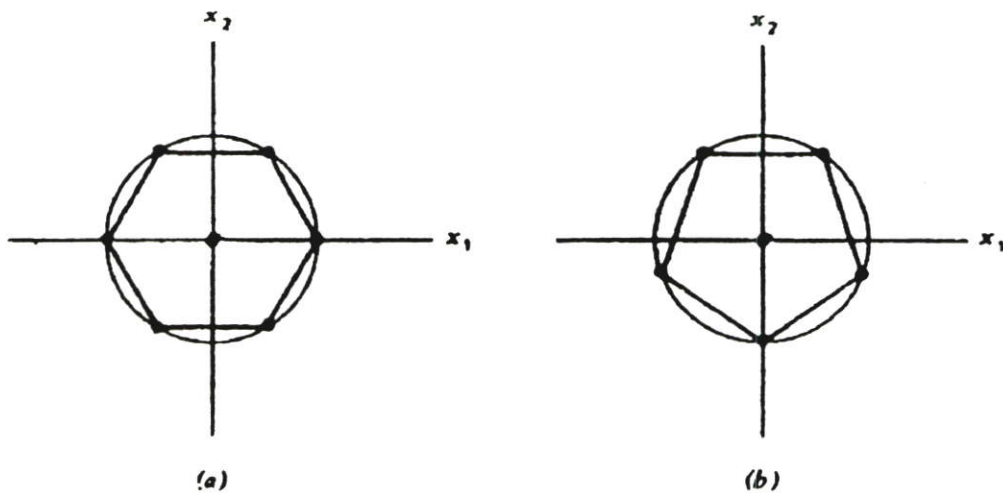
การออกแบบ Face-Centered Cube ไม่ต้องการใช้จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมาก เหมือนกับ CCD รูปทรงกลม ในทางปฏิบัติ  $n_c = 2$  จะพอเพียงที่จะทำให้ความแปรปรวนของการพยากรณ์อยู่ในระดับที่ดี ตลอดจนบริเวณของการออกแบบ ให้จำไว้ว่า บางครั้งการที่เราต้องรันที่จุดศูนย์กลางเป็นจำนวนมากขึ้นเนื่องจากต้องการให้ค่าประมาณของความผิดพลาดของการทดลองเป็นที่ยอมรับได้

#### 4.2.5 การออกแบบชนิดอื่น

ยังมีการออกแบบพื้นผิวผลตอบอีกเป็นจำนวนมากที่อาจจะเป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติบางโอกาส สำหรับกรณี 2 ตัวแปร เราสามารถใช้การออกแบบที่เกิดจากจุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลม และการออกแบบลักษณะนี้จะทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) เนื่องจากจุด

ของการออกแบบนี้มีระยะห่างจากจุดกำเนิดเท่ากัน การจัดวางเช่นนี้ถูกเรียกว่า การออกแบบรัศมีเท่ากัน (Equiradial Design)

สำหรับ  $k = 2$  การออกแบบรัศมีเท่ากันที่สามารถหมุนได้หาได้จากการรวมจุด  $n_2 \geq 5$  จุดที่มีระยะห่างเท่ากันบนวงกลมที่มีจุด  $n_1 \geq 1$  จุดที่ศูนย์กลางของวงกลม การออกแบบที่สำคัญสำหรับ  $k = 2$  คือ รูป 5 เหลี่ยม และ 6 เหลี่ยม การออกแบบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การออกแบบรัศมีเท่ากันสำหรับ 2 ตัวแปร (a) หกเหลี่ยม (b) ห้าเหลี่ยม

### 4.3 การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization)

ในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้าหลายตัวแปร และมีตัวแปรส่งออกมากกว่าหนึ่งตัวแปรจะต้องทำการรวมฟังก์ชันของตัวแปรส่งออกทั้งหมด ในที่นี้ขอนำเสนอในกรณีที่มีตัวแปรป้อนเข้า 3 ตัวแปรและตัวแปรส่งออก 2 ตัวแปร

#### 4.3.1 การหาค่าตัวถ่วงน้ำหนัก (Weight)

เมื่อมีตัวแปรส่งออก 2 ตัวแปรทำให้มีฟังก์ชันของตัวแปรส่งออก 2 ฟังก์ชัน ทำให้มีตัวถ่วงน้ำหนัก 2 ตัวคือ  $w_1$  และ  $w_2$  ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ  $w_1$  ต่อ  $w_2$  โดยสังเกตจากกราฟของ Objective function ( $f_{eq}$ ) ที่รวมฟังก์ชันของตัวแปรส่งออกทั้ง 2 ดังแสดงในสมการที่ 4.12

$$f_{eq}(f_1, f_2) = w_1 f_1(x, y, z) + w_2 f_2(x, y) \quad (4.12)$$

ซึ่ง  $f_1$  คือ ฟังก์ชันของตัวแปรส่งออกที่ 1,  $f_2$  คือฟังก์ชันของตัวแปรส่งออกที่ 2,  $w_1$  คือตัวถ่วงน้ำหนักที่ 1,  $w_2$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 2,  $x$  คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่ 1,  $y$  คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่ 2 และ  $z$  คือ ตัวแปรป้อนเข้าที่ 3

สมมติให้  $f_1$  คือ สมการ Sp,  $f_2$  คือสมการ Ra,  $w_1$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 1,  $w_2$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 2, x คือ ตัวแปร ON, y คือ ตัวแปร OFF และ z คือ ตัวแปร WT

$$\text{โดยที่ } f_1 = Sp = 2.63356 + 0.316792(ON) - 0.0539(OFF) + 0.0374417(WT) \quad (4.13)$$

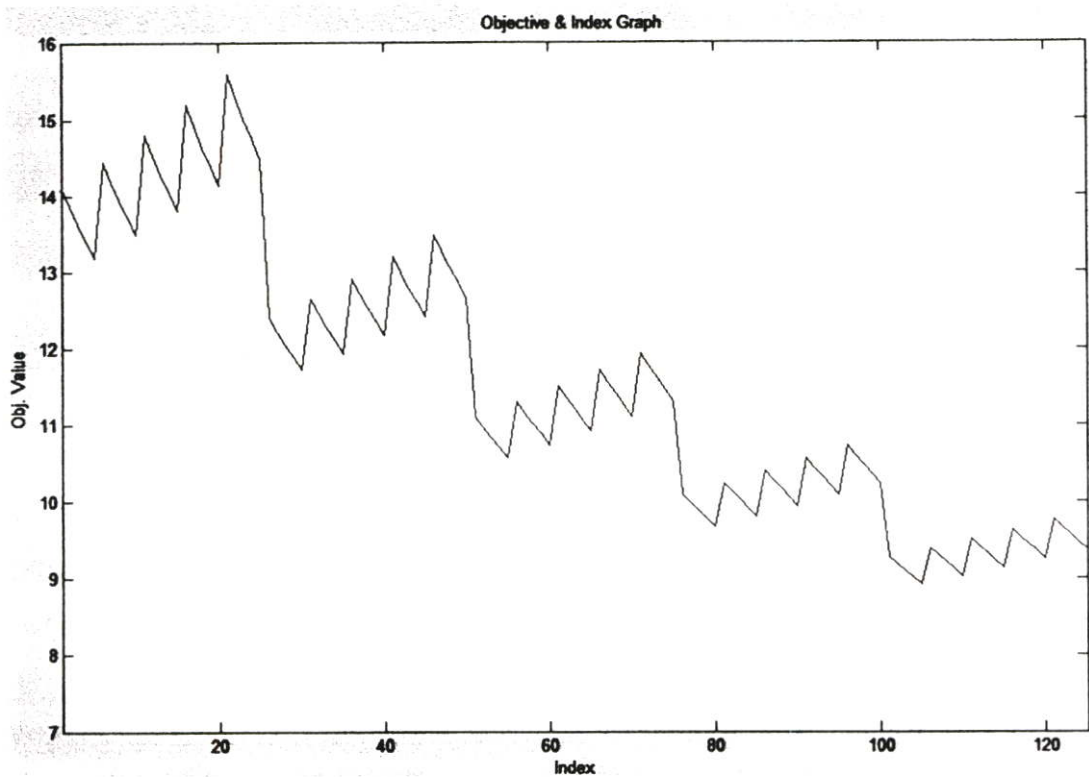
$$f_2 = Ra = 2.93523 + 0.179696(ON) - 0.0463875(OFF) - 0.019774(ON)^2 \quad (4.14)$$

ตัวแปร ON, OFF และ WT มีค่าระหว่าง -2 ถึง 2

จะได้สมการ Objective function ( $f_{cq}$ ) คือ

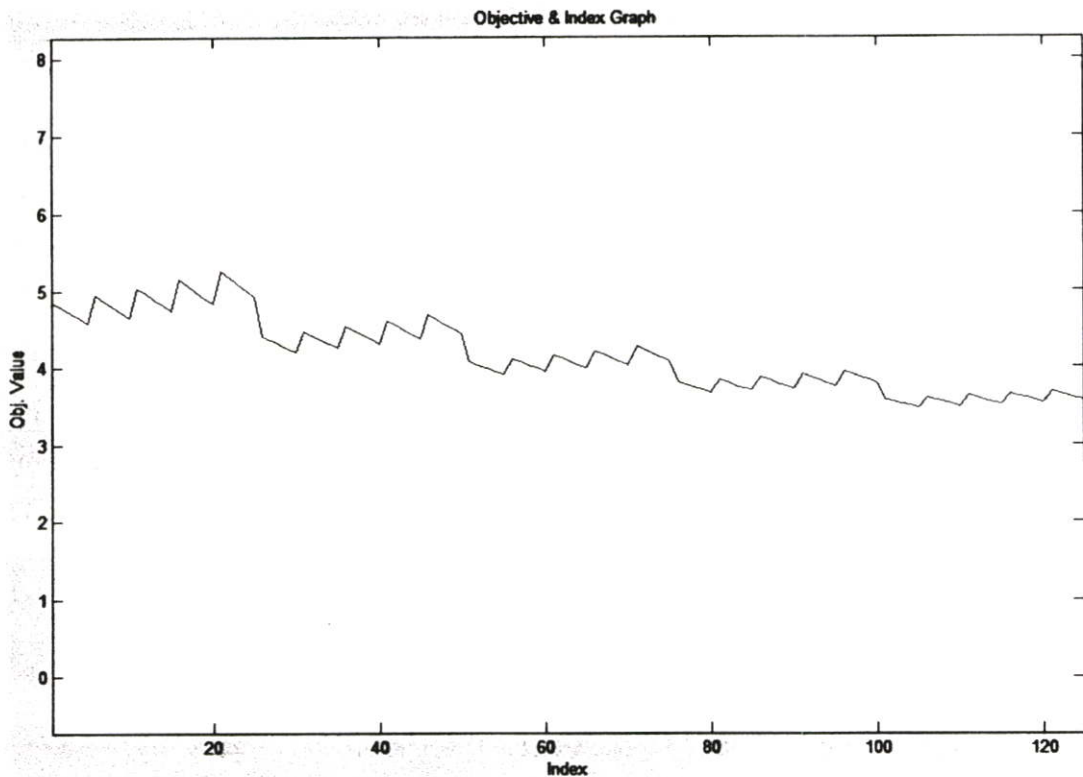
$$f_{cq}(Sp,Ra) = w_1Sp(ON,OFF,WT) + w_2Ra(ON,OFF) \quad (4.15)$$

เมื่อทำการ Run สมการ 4.15 ตามเงื่อนไขข้างต้น โดยให้ค่า  $w_1 = 10$ ,  $w_2 = 1$  จะได้กราฟตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟ Objective function เมื่อค่า  $w_1 = 10$ ,  $w_2 = 1$

เมื่อทำการ Run สมการ 4.15 ตามเงื่อนไขข้างต้น โดยให้ค่า  $w_1 = 3$ ,  $w_2 = 1$  จะได้กราฟตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟ Objective function เมื่อค่า  $w_1 = 3$ ,  $w_2 = 1$

จากรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มค่า  $w_1$  โดยที่  $w_2$  คงที่นั้นจะทำให้ค่า Objective function สูงขึ้น และสังเกตได้ว่ารอยหยักของกราฟมีลักษณะชัดเจนมากขึ้นโดยที่ถ้าเลือกใช้  $w_1 = 3$  จะสังเกตจุดของข้อมูลบนกราฟได้ยาก แต่เมื่อเลือกใช้  $w_1 = 10$  จะสังเกตจุดของข้อมูลบนกราฟได้ง่ายและชัดเจน

หมายเหตุ ถ้าเราเพิ่มอัตราส่วน  $w_1$  ต่อ  $w_2$  สูงขึ้นมากกว่า 10 ต่อ 1 มากๆ ค่า Objective function ก็จะสูงขึ้นจนสังเกตได้ยาก (ไม่สามารถเห็นกราฟทั้งหมดในหน้าจอ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน  $w_1$  ต่อ  $w_2$  จะมีค่าเหมาะสมที่เท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะกราฟนั้นๆ เพื่อแสดงให้เห็นจุดข้อมูลและการกระจายของข้อมูลได้เด่นชัด ในที่นี้อัตราส่วน  $w_1$  ต่อ  $w_2$  เท่ากับ 10 ต่อ 1 จะสังเกตจุดของข้อมูลบนกราฟได้ง่ายและชัดเจน

#### 4.3.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสม

การหาค่าความเหมาะสมนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในที่นี้เราได้ใช้ Search Method โดยการใส่ค่าตัวแปรป้อนเข้าทีละ 1 ค่าโดยที่ค่าตัวแปรป้อนเข้าอื่นทำการคงไว้ โดยเพิ่มค่าตัวแปรที่

ละ 1 ระดับจากค่า -2 ถึง 2 ทั้งหมด 3 ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรจะเก็บในรูป Matrix 5x5 (เท่ากับ 25 ข้อมูลต่อ 1 ตัวแปร) จากนั้นทำการนำข้อมูลที่เก็บไว้มาพล็อตเป็นกราฟ จำนวน 125 ข้อมูล และทำการหาค่าข้อมูลตัวที่มีค่าน้อยที่สุดโดยใช้โปรแกรมใน tool box ของ Matlab ซึ่งลักษณะโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมในวิชานีพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงไว้ในบทที่ 6 อย่างละเอียด

## บทที่ 5

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 5.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง

วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 (ค่าความแข็ง 217HB จากภาคผนวก ก. รูปที่ ผ.ก. 1) เนื่องจากเหล็กชนิดนี้นิยมใช้กันโดยทั่วไป เช่น ทำแม่พิมพ์ตัดโลหะเย็น ทำลูกรีดสำหรับม้วนท่อต่าง ๆ ใบมีดสำหรับตัดกระดาษ ตัดเหล็ก แบบพิมพ์สำหรับทำอิฐบล็อก พิมพ์ขึ้นรูปเกลียว พิมพ์ปั๊มกลวดลาย พิมพ์ปั๊มชิ้นหัวสกรู พิมพ์รีดโลหะเย็น คัดเตอร์ กัดเฟือง กัดไม้ มีครูด ฯลฯ ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

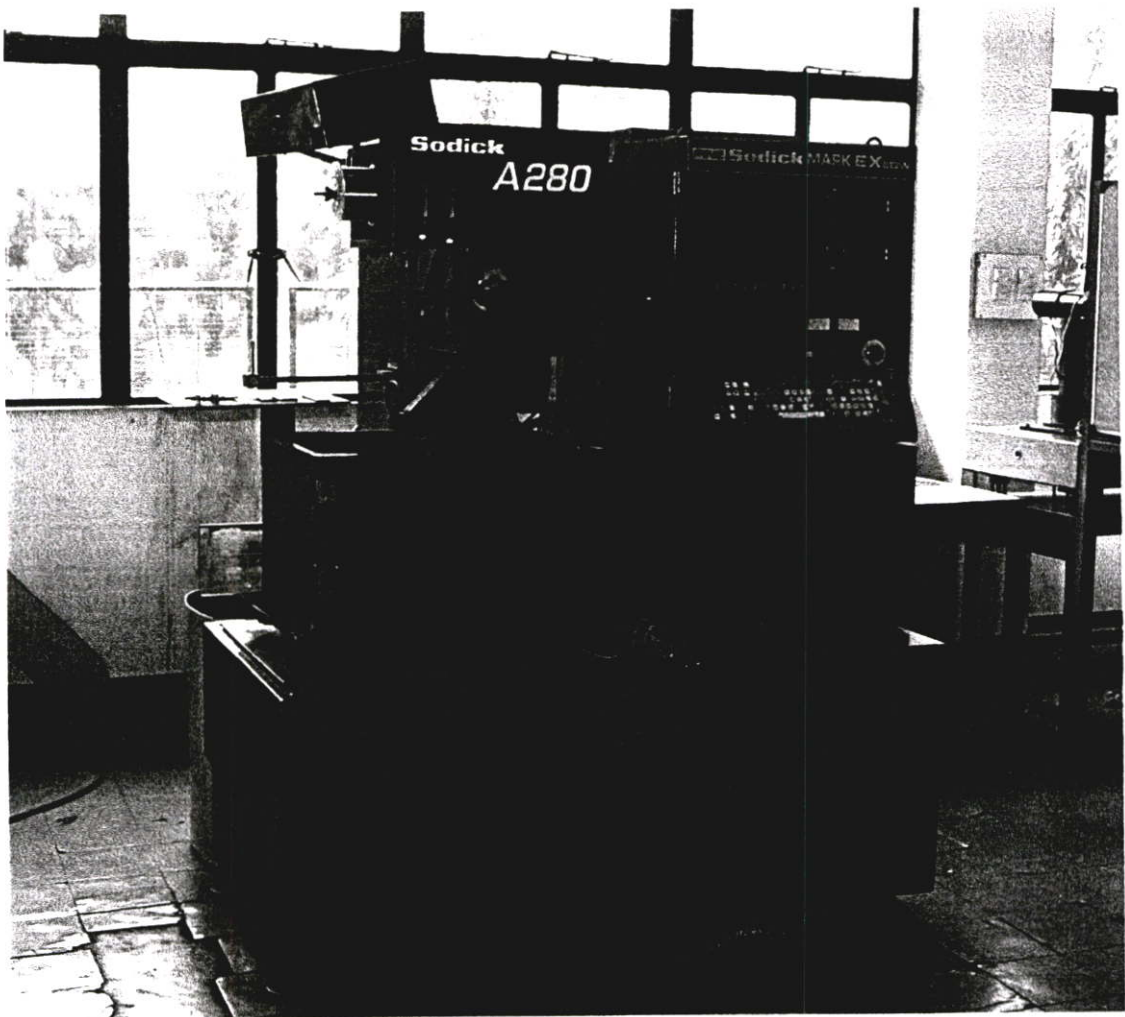
ตารางที่ 5.1 ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53

ส่วนผสม (wt %)			
C	Cr	Mo	Fe
0.96	8.23	1.94	Balance

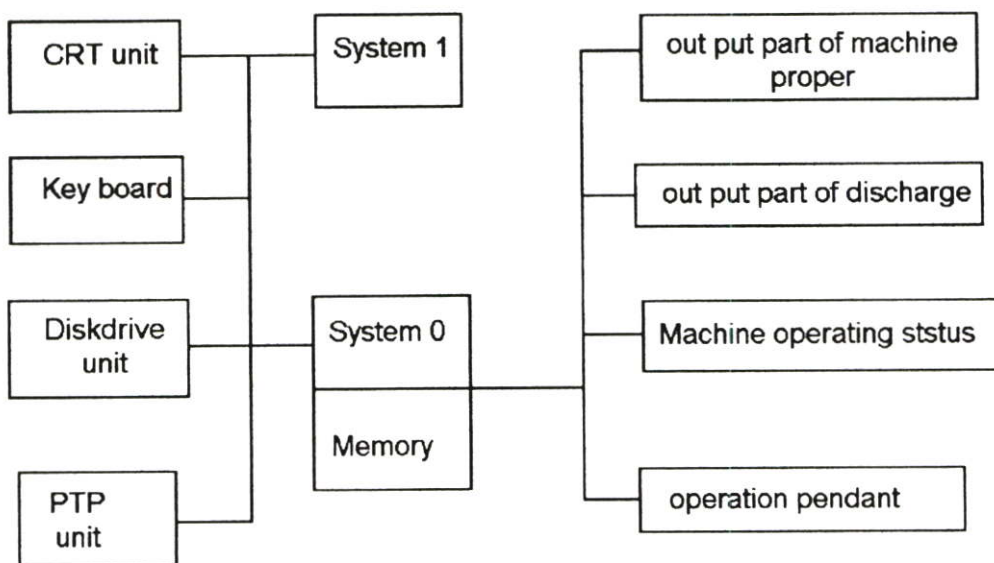
ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 คุณสมบัติเทียบเท่ากับเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สำหรับชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาด (กว้าง × ยาว × หนา) 27 mm × 65 mm × 13mm หลังจากนั้นทำการเจียรระในผิว เพื่อให้ผิวมีความเรียบ

#### 5.2 การตัดชิ้นงาน

ใช้เครื่อง CNC Wire Cut EDM ของ Sodick รุ่น A280 ดังรูปที่ 5.1 และมีระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง ดังรูปที่ 5.2

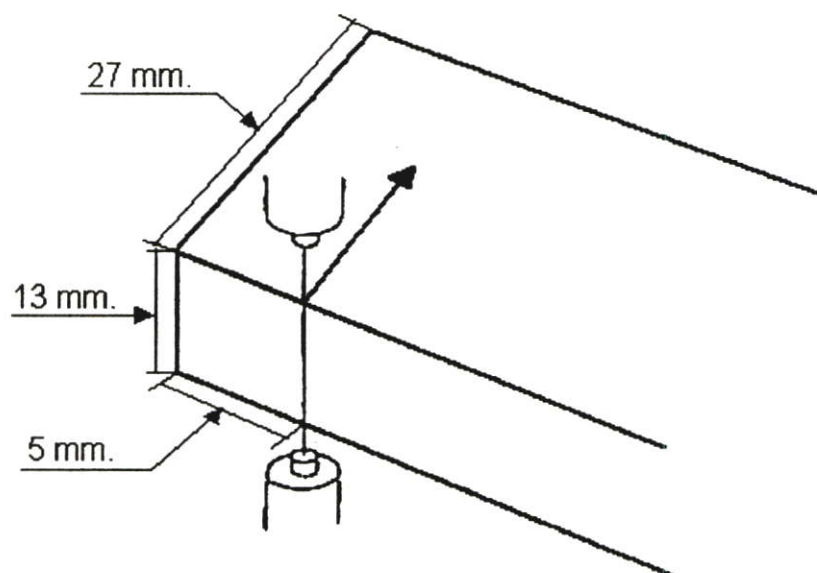


รูปที่ 5.1 เครื่อง CNC Wire Cut EDM



รูปที่ 5.2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC Wire Cut EDM

ลวดที่ใช้ในการตัดชิ้นงานเป็นของ KHSodick รุ่น KHW-250P5-5 (65 Cu – 35 Zn) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25mm ทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด (กว้าง × ยาว × หนา) 27 mm × 5 mm × 13 mm ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ลักษณะการตัดชิ้นงาน

การออกแบบการทดลองใช้วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้ (Response surface model based on a central composite rotatable experimental design) ในรูปแบบ Full Factorial Design ( $2^k$ ) เมื่อ  $k$  คือจำนวนตัวแปรป้อนเข้าในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้มีตัวแปรป้อนเข้าอยู่ 4 ตัวแปรด้วยกัน

ได้แก่ ON คือเวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน

OFF คือ เวลาในการหยุดการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน

WT คือ ความตึงของเส้นลวด

WS คือ ความเร็วในการจ่ายเส้นลวด

ซึ่งตัวแปรป้อนเข้าและระดับของตัวแปรป้อนเข้าที่ใช้ในการดำเนินการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.2 โดยมีการตั้งค่า IP ไว้ที่ 17 เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองการตัดแบบหยาบ (Rough cut)

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรป้อนเข้าและระดับที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรป้อนเข้า	ระดับ/รหัส					
	1/-2	2/-1	3/0	4/+1	5/+2	หน่วย
A : ON	1	2	3	4	5	unit
B : OFF	12	13	14	15	16	unit
C : WT	4	5	6	7	8	unit
D : WS	6	7	8	9	10	unit

ในการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้แบบ  $2^k$  และมี 5 ระดับ ซึ่งสามารถแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ

1. การทดลองแบบ  $2^k$  คำนึงถึงเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมดจึงมี  $2^4$  หรือ 16 เงื่อนไข
2. การทดลองที่จุดศูนย์กลาง สำหรับ  $k = 4$  จะต้องมี 6 เงื่อนไข แต่เพื่อความแม่นยำเราจึงเพิ่มเป็น 12 เงื่อนไข
3. การทดลองที่จุดปลายของแกน สำหรับ  $k = 4$  จะต้องมี 8 เงื่อนไข

ซึ่งได้แสดงการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้แบบ  $2^k$  และมี 5 ระดับ แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้

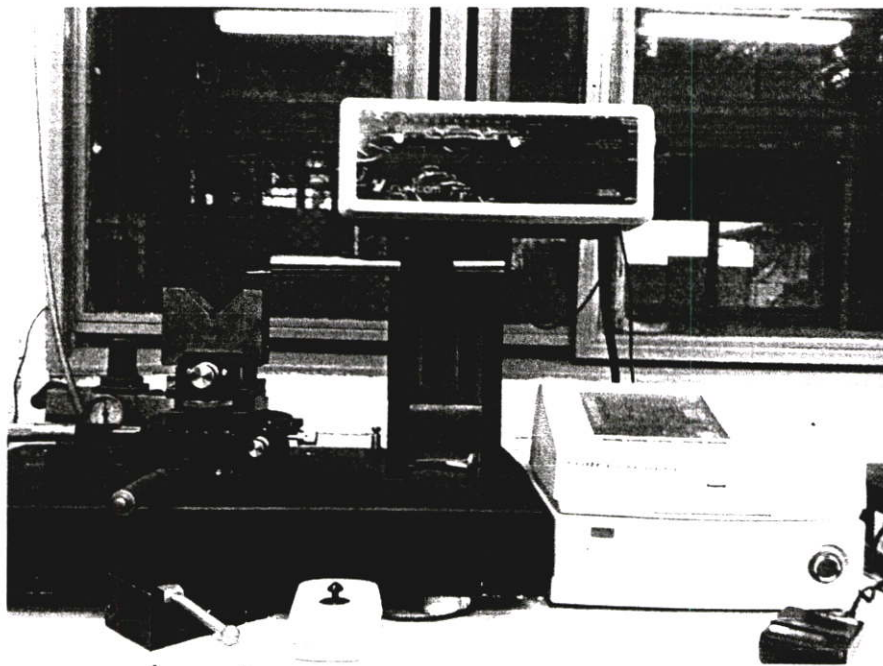
Exp.No.	ON	OFF	WT	WS	code
1	2	15	5	7	2 <sup>k</sup>
2	4	15	7	9	2 <sup>k</sup>
3	3	14	6	8	c1
4	3	14	6	8	c2
5	3	14	6	8	c3
6	3	14	8	8	a1
7	3	14	6	8	c4
8	3	14	6	8	c5
9	2	13	5	9	2 <sup>k</sup>
10	3	14	6	10	a3
11	3	14	6	8	c6
12	4	13	7	9	2 <sup>k</sup>
13	2	15	5	9	2 <sup>k</sup>
14	2	13	7	7	2 <sup>k</sup>
15	2	15	7	9	2 <sup>k</sup>
16	4	13	7	7	2 <sup>k</sup>
17	4	15	7	7	2 <sup>k</sup>
18	1	14	6	8	a8
19	3	14	6	6	a4
20	3	14	6	8	c7
21	2	13	7	9	2 <sup>k</sup>
22	3	16	6	8	a5
23	2	15	7	7	2 <sup>k</sup>
24	4	13	5	7	2 <sup>k</sup>

ตารางที่ 5.3 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองสำหรับพื้นผิวผลตอบที่สามารถหมุนได้(ต่อ)

Exp.No.	ON	OFF	WT	WS	code
25	4	13	5	9	2 <sup>k</sup>
26	3	14	6	8	c8
27	3	14	6	8	c9
28	4	15	5	7	2 <sup>k</sup>
29	4	15	5	9	2 <sup>k</sup>
30	2	13	5	7	2 <sup>k</sup>
31	3	14	6	8	c10
32	3	14	4	8	a2
33	3	14	6	8	c11
34	3	14	6	8	c12
35	3	12	6	8	a6
36	5	14	6	8	a7

### 5.3 การวัดค่า Surface Roughness (Ra)

หลังจากที่ได้ตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่า Surface Roughness (Ra) ตามแนวการตัด โดยใช้เครื่อง SURFCOM 480A ของ TOKYO SEIMITSU ดังรูปที่ 5.4 โดยที่ทำการวัดค่า Ra ที่ตำแหน่งต่างๆ 6 จุดต่อ 1 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยใช้ Stroke เท่ากับ 2.5 mm ความเร็วในการวัดเท่ากับ 0.3 mm/s และ Cut-off length เท่ากับ 0.80 mm แล้วนำมาทำการเฉลี่ย



รูปที่ 5.4 เครื่อง SURFCOM 480A ของ TOKYO SEIMITSU

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

#### 6.1 การวิเคราะห์หาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra) และ ความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed)

จากการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานสามารถทำได้โดยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) ซึ่งผลของการวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วในการตัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 ANOVA ในการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra)

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:ON	0.774974	1	0.774974	489.27	<0.0001
B:OFF	0.0516432	1	0.0516432	32.6	<0.0001
C:WT	0.00014751	1	0.00014751	0.09	0.7632
D:WS	0.00195662	1	0.00195662	1.24	0.2789
AA	0.0125123	1	0.0125123	7.9	0.0105
AB	0.000185641	1	0.000185641	0.12	0.7355
AC	0.000113956	1	0.000113956	0.07	0.7911
AD	1.66056E-05	1	1.66056E-05	0.01	0.9194
BB	7.80209E-05	1	7.80209E-05	0.05	0.8265
BC	0.000413106	1	0.000413106	0.26	0.6149
BD	0.000106606	1	0.000106606	0.07	0.7978
CC	0.00332045	1	0.00332045	2.1	0.1624
CD	1.10556E-05	1	1.10556E-05	0.01	0.9342
DD	0.00462642	1	0.00462642	2.92	0.1022
Total error	0.0332624	21	0.00158392		
Total (corr.)	0.883368	35			

R-squared = 96.2346 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 93.7243 percent

ตารางที่ 6.2 ANOVA ในการวิเคราะห์ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงาน

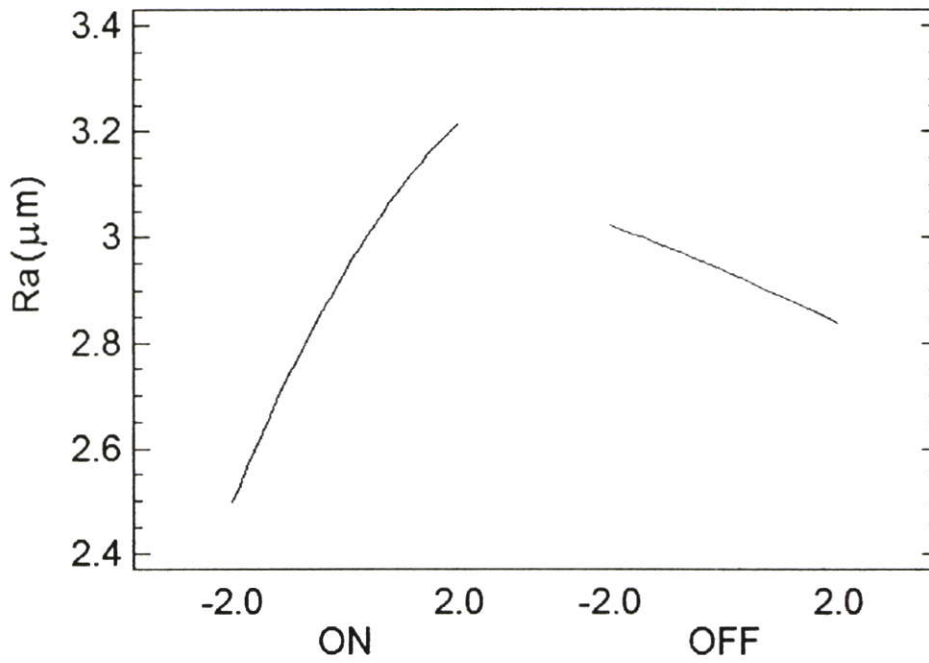
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:ON	2.40857	1	2.40857	344.96	<0.0001
B:OFF	0.069725	1	0.069725	9.99	0.0047
C:WT	0.0336451	1	0.0336451	4.82	0.0395
D:WS	7.42017E-05	1	7.4202E-05	0.01	0.9189
AA	0.00017672	1	0.00017672	0.03	0.8751
AB	0.00069169	1	0.00069169	0.1	0.7561
AC	0.00001521	1	0.00001521	<0.0001	0.9632
AD	0.00027556	1	0.00027556	0.04	0.8444
BB	0.0225781	1	0.0225781	3.23	0.0865
BC	0.00025921	1	0.00025921	0.04	0.8491
BD	0.00010201	1	0.00010201	0.01	0.9049
CC	0.0178227	1	0.0178227	2.55	0.1251
CD	0.00001521	1	0.00001521	<0.0001	0.9632
DD	0.0174471	1	0.0174471	2.5	0.1289
Total error	0.146626	21	0.00698218		
Total (corr.)	2.71802	35			

R-squared = 94.6054 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 91.009 percent

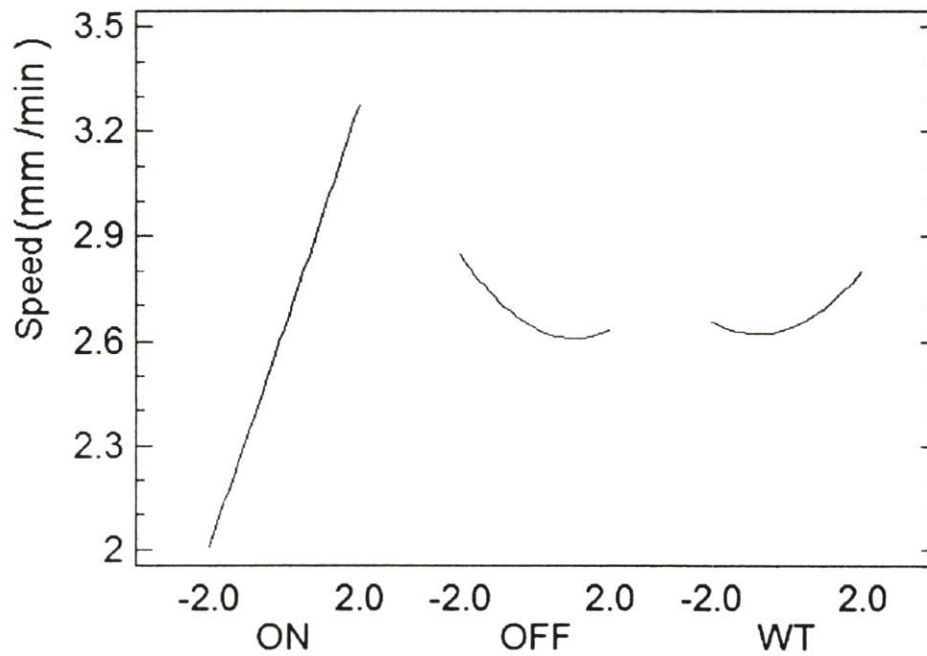
ซึ่งจากตาราง ANOVA เราสามารถสร้าง Main Effect Plot เพื่อแสดงให้เห็นถึงตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์กับความหนาผิวและความเร็วในการขึ้นรูปได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น รูปที่ 6.1 สำหรับตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหนาผิว และรูปที่ 6.2 สำหรับตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป

Main Effects Plot for Ra



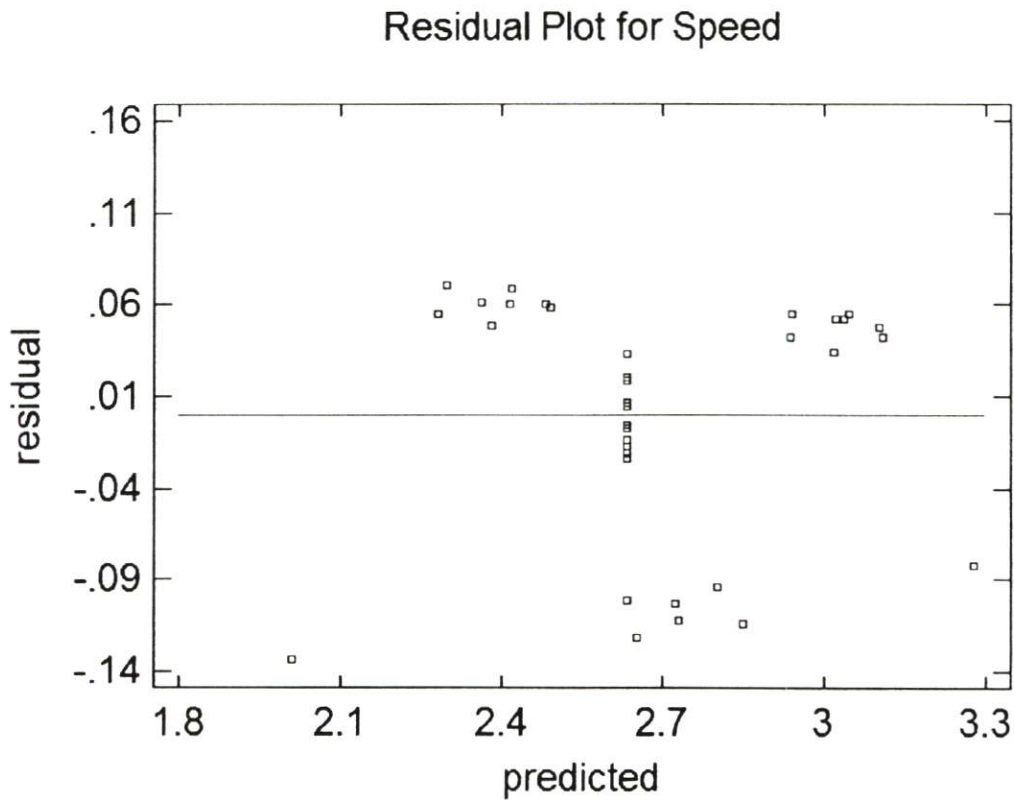
รูปที่ 6.1 Main Effect Plot for Ra แสดงถึงระดับตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์ต่อค่าความหยาบผิว

Main Effects Plot for Speed



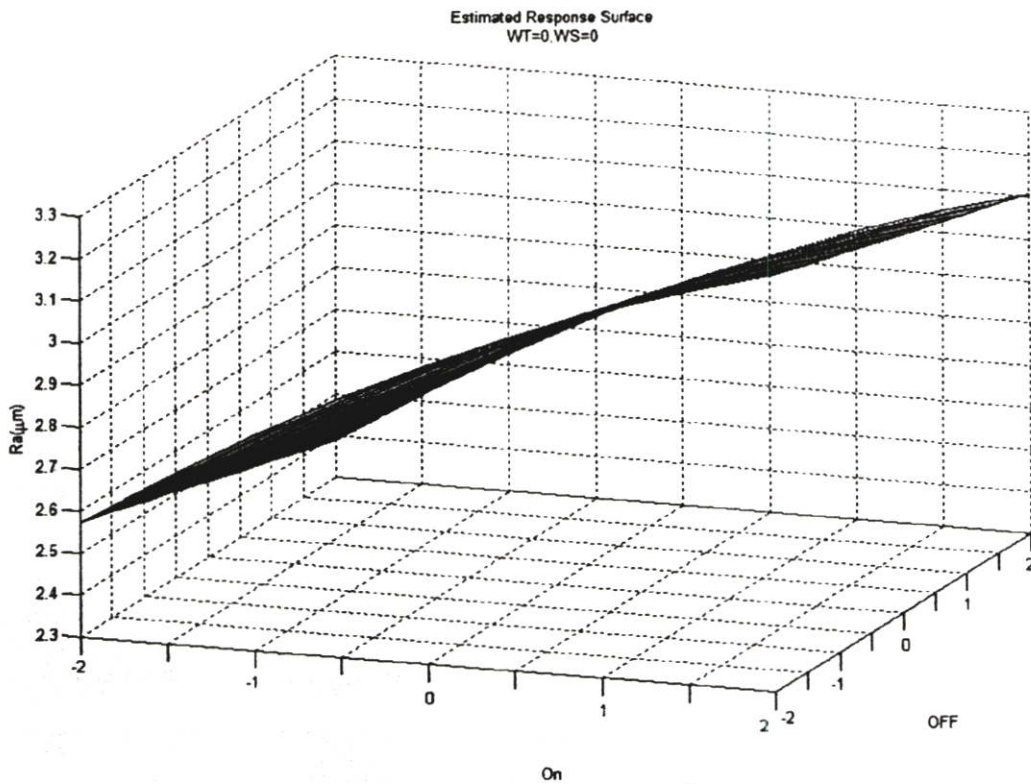
รูปที่ 6.2 Main Effect Plot for Speed แสดงถึงระดับตัวแปรป้อนเข้าที่มีความสัมพันธ์ต่อค่า Cutting Speed





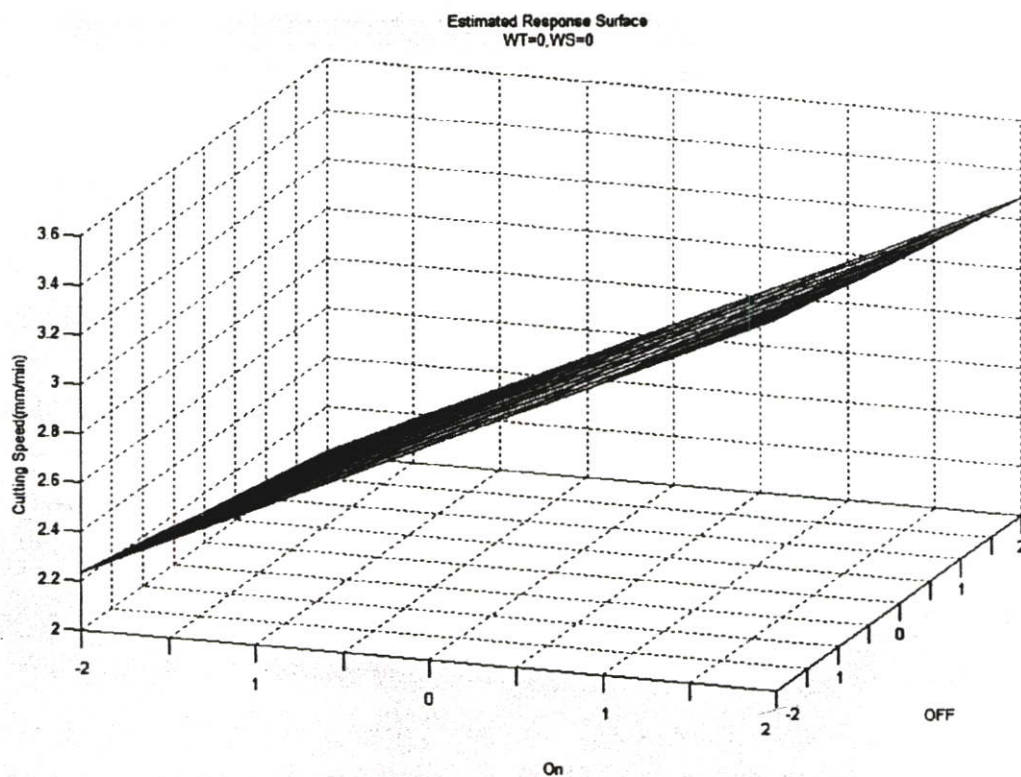
รูปที่ 6.4 การกระจายของส่วนตกค้างเทียบกับค่า Predicted Speed

รูปที่ 6.4 แสดงถึงการกระจายของส่วนตกค้างเทียบกับค่า Predicted Speed จะสังเกตเห็นว่า ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับค่า Predicted Speed ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมตามทฤษฎี



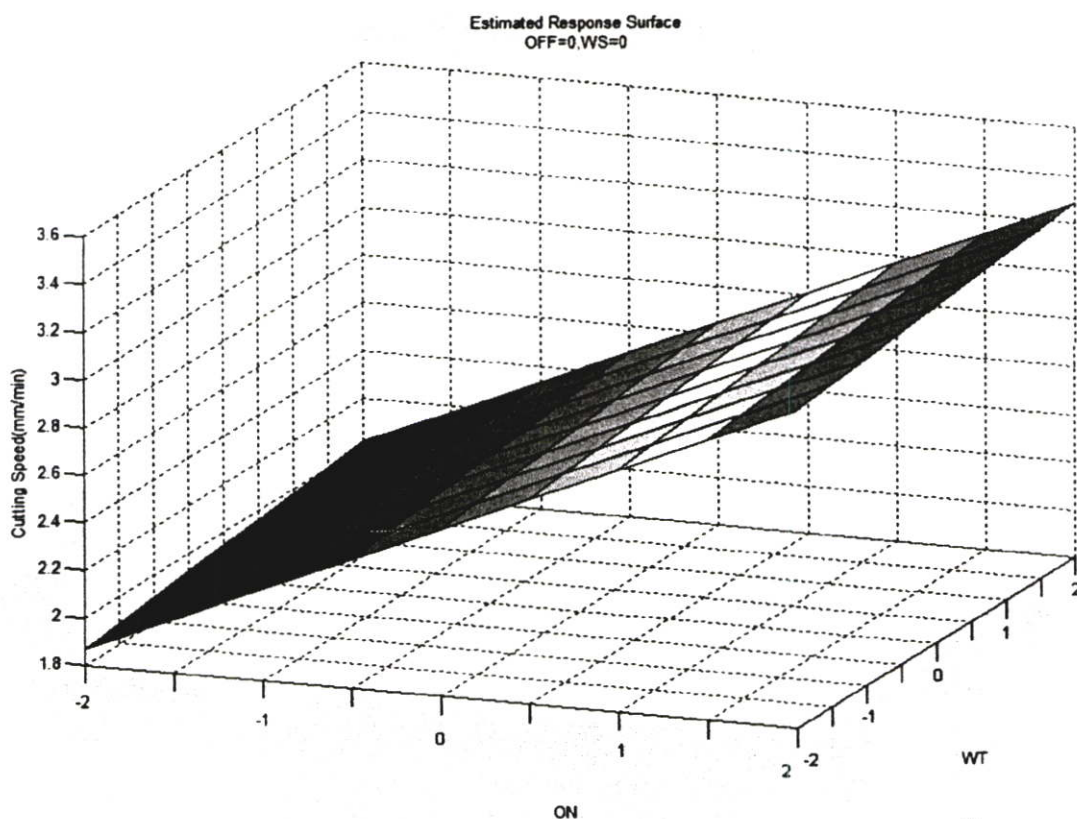
รูปที่ 6.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ OFF ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

รูปที่ 6.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ON และ OFF กับค่าความหยาบผิว (Ra) จากรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่า Ra มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ON เพิ่มขึ้นและ Ra มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ OFF ลดลง จะสังเกตได้ว่า ค่าความหยาบผิวจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า ON มีค่าสูงสุดและค่า OFF มีค่าต่ำสุด



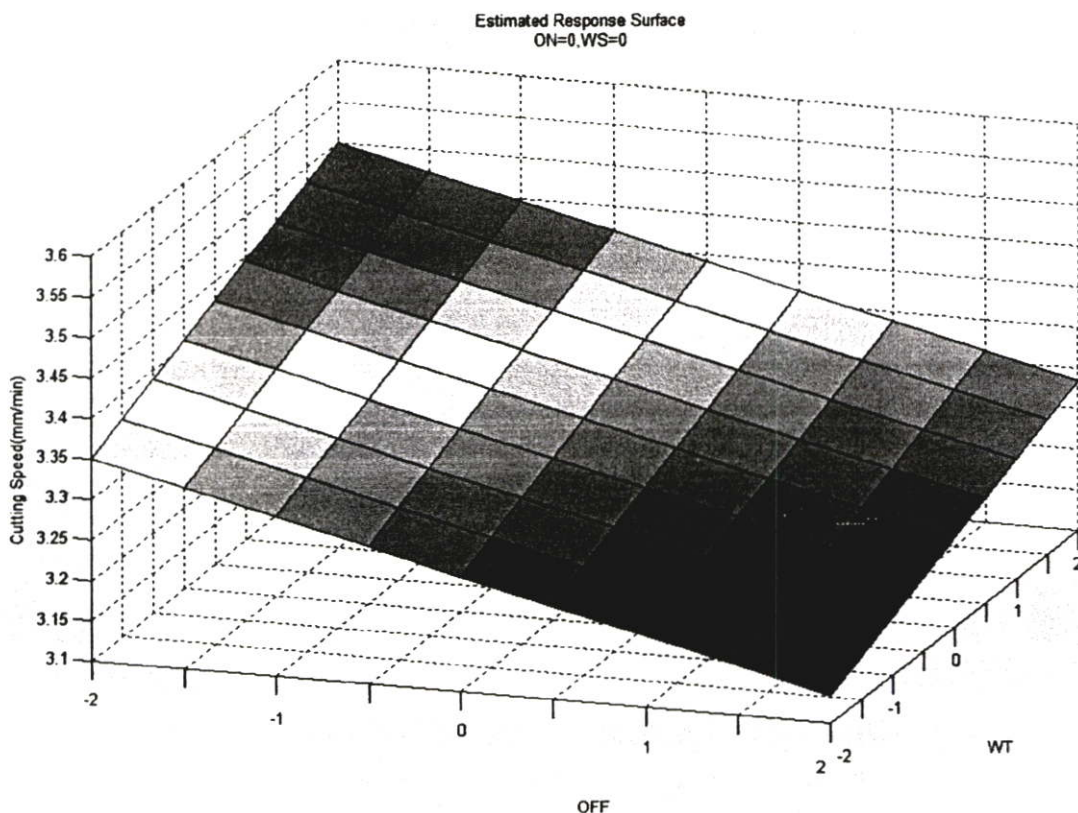
รูปที่ 6.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ OFF ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed)

รูปที่ 6.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ON และ OFF กับค่าความเร็วในการขึ้นรูป จากรูปที่ 6.6 จะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูป มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ON เพิ่มขึ้นและ ค่าความเร็วในการขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ OFF ลดลง จะสังเกตได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูปจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า ON มีค่าสูงสุดและค่า OFF มีค่าต่ำสุด



รูปที่ 6.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร ON และ WT ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป  
(Cutting Speed)

รูปที่ 6.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ON และ WT กับค่าความเร็วในการขึ้นรูป จากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูป มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ ON เพิ่มขึ้นและ ค่าความเร็วในการขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ OFF เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูปจะมีค่ามากที่สุด เมื่อค่า ON มีค่าสูงสุดและค่า WT มีค่าสูงสุด



รูปที่ 6.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปร OFF และ WT ที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป

(Cutting Speed)

รูปที่ 6.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร OFF และ WT กับค่าความเร็วในการขึ้นรูป จากรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูป มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ WT เพิ่มขึ้นและ ค่าความเร็วในการขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ OFF ลดลง จะสังเกตได้ว่า ค่าความเร็วในการขึ้นรูปจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่า WT มีค่าสูงสุดและค่า OFF มีค่าต่ำสุด

#### 6.1.1 การหาสมการทำนายค่าความหยาบผิวและสมการทำนายค่าความเร็วตัด

จากนั้น ทำการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความหยาบผิวกับตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ทั้งสอง (ON และ OFF) และทำการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วในการขึ้นรูปกับตัวแปรที่มีนัยสำคัญทั้งสาม (ON, OFF และ WT) โดยใช้ Analysis of Variance ทำการสร้างแบบจำลองการถดถอยแบบ General Linear Models จากตาราง ผ.ข. 3 จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$Ra = 2.93523 + 0.179696(ON) - 0.0463875(OFF) - 0.019774(ON)^2 \quad (6.1)$$

โดยมี R-Squared = 94.9921 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 94.5226 percent

$$Sp = 2.63356 + 0.316792(ON) - 0.0539(OFF) + 0.0374417(WT) \quad (6.2)$$

โดยมี R-Squared = 92.4179 percent

R-Squared (adjusted for d.f.) = 91.7071 percent

จากค่า R-Squared (adjusted for d.f.) ของสมการ 6.1 และ 6.2 จะเห็นได้ว่าทั้งสมการ 6.1 และ 6.2 มีความแม่นยำในการทำนาย โดยที่  $Ra$  มีหน่วย  $\mu m$  และ  $Sp$  มีหน่วย mm/min โดยทำเป็นสมการไร้หน่วย โดยนำสมการ  $Ra$  หาค่า  $\overline{Ra}$  ( $Ra$  เฉลี่ย) จะได้  $Ra^*$  และนำสมการ  $Sp$  หาค่า  $\overline{Sp}$  ( $Sp$  เฉลี่ย) นำสมการที่ได้ทั้งสองไปถ่วงน้ำหนัก (Weight) เพื่อให้เป็นสมการ Objective function หนึ่งเดียวกันตามรูปแบบสมการที่ 6.3

$$f_{eq}(f_1, f_2) = w_1 f_1(x, y, z) + w_2 f_2(x, y) \quad (6.3)$$

ซึ่ง  $f_1$  คือ สมการ  $Sp^*$ ,  $f_2$  คือ สมการ  $Ra^*$ ,  $w_1$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 1,  $w_2$  คือ ตัวถ่วงน้ำหนักที่ 2,  $x$  คือ ตัวแปร ON,  $y$  คือ ตัวแปร OFF และ  $z$  คือ ตัวแปร WT

จากสมการที่ 6.3 นำมาประยุกต์ร่วมกับสมการที่ 6.1 และสมการที่ 6.2 จะได้เป็นสมการที่ 6.4 ดังนี้

$$f_{obj}(Sp^*, Ra^*) = w_1 Sp^*(ON, OFF, WT) + w_2 Ra^*(ON, OFF) \quad (6.4)$$

หมายเหตุ ค่า  $w_1$  และค่า  $w_2$  จะกำหนดให้มีค่าระหว่าง 1 ถึง 10 ตามความเหมาะสมในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค่า  $Ra_{min}$  หรือ  $Ra_{max}$

### 6.1.2 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมเมื่อค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) และค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ )

จากการเขียน โปรแกรมหาค่าความเหมาะสมสำหรับค่า  $Ra_{min}$  หรือ  $Ra_{max}$  โดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งมีลักษณะดังนี้

#### Program Matlab for Optimize Ra & Cutting Speed

```
clc
```

```
clear all
```

```
close all
```

```

%%%%%%%%%
%%% Input Parameters %%%
%%%%%%%%%

On_l = -2;    % 1-5
Off_l = -2;   % 12-16
Wt_l = -2;    % 4-8

On_u = 2;
Off_u = 2;
Wt_u = 2;

h1 = 1;      % Step Size On
h2 = 1;      % Step Size Off
h3 = 1;      % Step Size Wt

% Weight Factor

w1 = 1;
w2 = 10;

On=On_l:h1:On_u;
Off=Off_l:h2:Off_u;
Wt=Wt_l:h3:Wt_u;

n1=length(On);
n2=length(Off);
n3=length(Wt);

d=1;

%%%%%%%%%
for i=1:n1,
    for j=1:n2,
        for k=1:n3,
            NSp(k)=1/((2.63356+0.316792*On(i)-
                    0.0539*Off(j)+0.0374417*Wt(k))/2.6841);

```

```

Ra(k)=(2.93523+0.179696*On(i)-0.0463875*Off(j)-
    0.019774*On(i)^2)/2.9062;

%%Objective Function
Z(k)= w1*NSp(k)+w2*Ra(k);
Obj(d)=Z(k);
d=d+1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fprintf('\n On= %2.0f, Off = %2.0f, Wt= %2.0f, NSp= %2.6f, Ra= %2.6f, obj.=
    %5.6f... ,On(i),Off(j),Wt(k),NSp(k),Ra(k),Z(k));

end

[Z1(i,j) I(i,j)]=min(Z);
Wtmin(i,j)=Wt(I(i,j));
end

[Z2(i) J(i)]=min(Z1(i,:));
Offmin(i)=Off(J(i));
end

[Zmin,K]= min(Z2);
Onmin=On(K);

fprintf('\nCalculate of Optimum\n');
fprintf(' 1. ON Optimum value(Code) is %2.0f .\n',Onmin);
fprintf(' 2. OFF Optimum value(Code) is %2.0f .\n',Offmin(J(K)));
fprintf(' 3. WT Optimum value(Code) is %2.0f .\n',Wtmin(I(J(K))));
fprintf(' 4. Obj. function is %5.6f .\n',Zmin);

%Find Sp and Ra
NSpmin=1/((2.63356+0.316792*Onmin-
    0.0539*Offmin(J(K))+0.0374417*Wtmin(I(J(K))))/2.6841);
Ramin=(2.93523+0.179696*Onmin-0.0463875*Offmin(J(K))-
    0.019774*Onmin^2)/2.9062;

```

```

fprintf(' 5. NSP* = %2.6f ,Ra* = %2.6f.\n',NSpmin,Ramin);
fprintf('\nResult of Optimum value\n');
%Find Value ON,OFF,WT
OnminV = Onmin+3;
OffminV = Offmin(J(K))+14;
WtminV = Wtmin(I(J(K)))+6;
Spmin = 1/NSpmin;

fprintf(' 1. ON Optimum value is %2.0f .\n',OnminV);
fprintf(' 2. OFF Optimum value is %2.0f .\n',OffminV);
fprintf(' 3. WT Optimum value is %2.0f .\n',WtminV);
fprintf(' 4. SP = %2.6f ,Ra = %2.6f.\n',Spmin*2.6841,Ramin*2.9062);
%Plot Graph
C=length(Obj);
D=1:1:C;
figure(1);
plot(D,Obj);
title('Objective & Index Graph');
xlabel('Index');
ylabel('Obj. Value');
axis([1 C 7 16])

```

### 6.1.3 การหาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมค่าความหยาบผิว

จากโปรแกรมที่เขียนขึ้นเราสามารถหาค่าความหยาบผิวที่น้อยสุด ( $Ra_{min}$ ) และมีตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม โดยเลือกใช้ค่า  $w_1 = 1$  และ  $w_2 = 10$  และหาค่าความหยาบผิวที่มากที่สุด ( $Ra_{max}$ ) และมีตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม โดยเลือกใช้ค่า  $w_1 = 10$  และ  $w_2 = 1$

กรณีต้องการหาค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) จะได้ค่าที่เหมาะสมและกราฟ Objective function ดังรูปที่ 6.9 ดังนี้

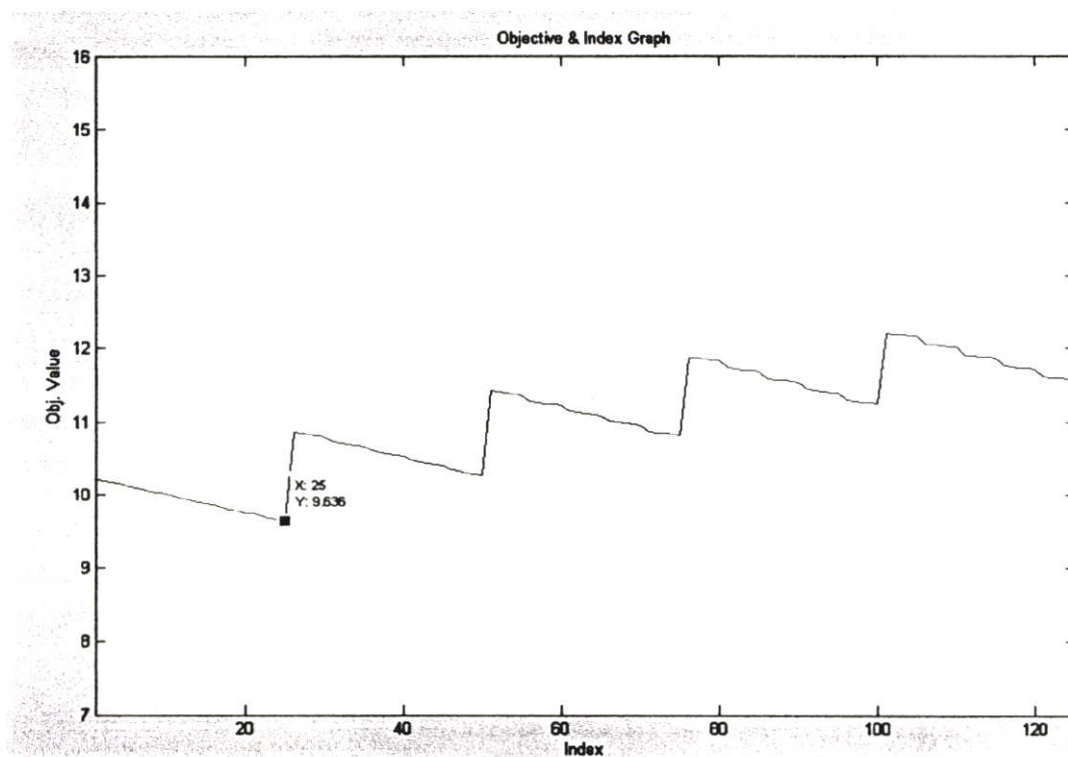
Calculate of Optimum

1. ON Optimum value (Code) is -2

2. OFF Optimum value (Code) is 2
3. WT Optimum value (Code) is 2
4. Obj. function is 9.636381
5. NSP\*= 1.364524, Ra\*= 0.827186

Result of Optimum value

1. ON Optimum value is 1
2. OFF Optimum value is 16
3. WT Optimum value is 8
4. SP = 1.967059, Ra = 2.403967



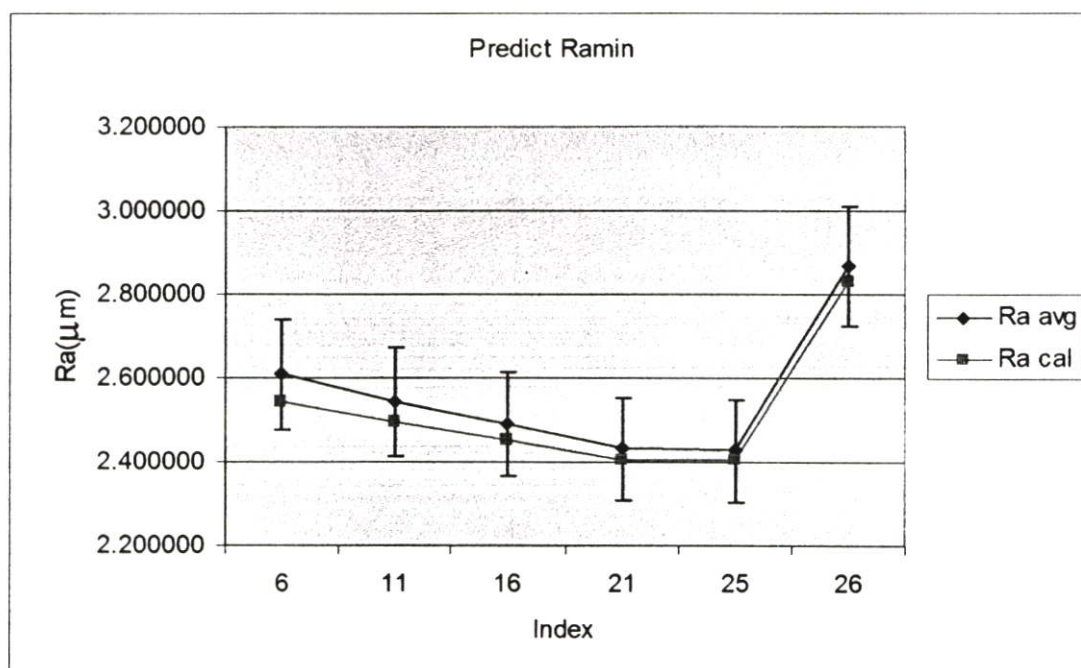
รูปที่ 6.9 ลักษณะกราฟ Objective function เมื่อหาค่า  $Ra_{min}$  ที่เหมาะสม

นำสมการและโปรแกรมที่เขียนขึ้นไปทดสอบความแม่นยำในการทำนาค่า  $Ra_{min}$  โดยใช้ค่า  $Ra_{min}$  และ Ra รอบข้างจุด  $Ra_{min}$  ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า  $Ra_{min}$  และ Ra รอบข้างจุด  $Ra_{min}$  ที่ได้จากการทดลองชุดใหม่ ดังแสดงในตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.10 ส่วนการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณ Cutting Speed กับ Cutting Speed ที่ได้จากการวัดกรณี  $Ra_{min}$  แสดงในตารางที่ 6.4 และรูป 6.11

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ  $Ra_{min}$

Predict Ra Minimum						
Index	ON	OFF	WT	Ra avg ( $\mu\text{m.}$ )	Ra cal ( $\mu\text{m.}$ )	Ra error (%)
6	1	13	4	2.609000	2.543130	2.53
11	1	14	4	2.542000	2.496742	1.78
16	1	15	4	2.490000	2.450355	1.59
21	1	16	4	2.433000	2.403967	1.19
25	1	16	8	2.427000	2.403967	0.95
26	2	12	4	2.865000	2.828535	1.27

หมายเหตุ สัญลักษณ์ \* คือจุดที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมี Cutting Speed มากกว่าที่จุดที่ 21 โดยที่มีค่า Ra เท่ากัน

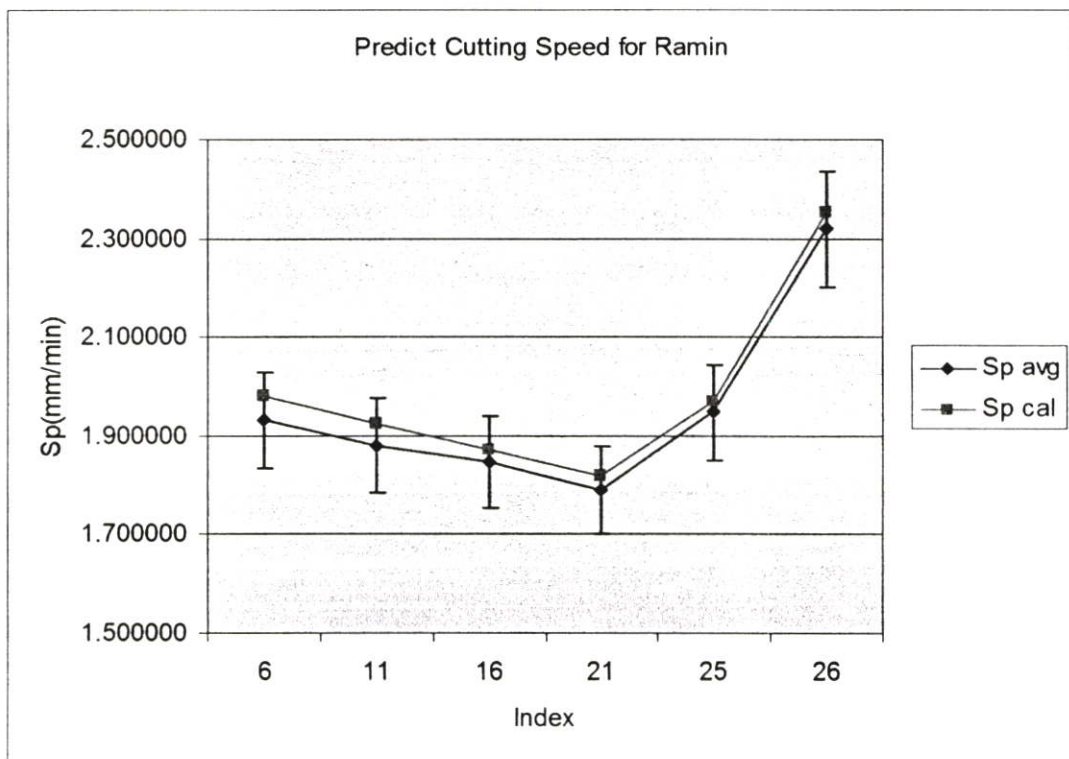


รูปที่ 6.10 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ  $Ra_{min}$  (error  $\leq 5\%$ )

จากรูปที่ 6.10 ข้อมูลที่ 6 ถึง 25 จะเห็นได้ว่ามีค่า Ra ลดลงเนื่องจาก ค่า OFF ที่สูงขึ้น และ ข้อมูลตัวที่ 26 มีค่าสูงสุด เนื่องจากค่า OFF ที่ต่ำ และค่า ON ที่สูงกว่าข้อมูลตัวอื่น

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี  $Ra_{min}$

Predict Cutting Speed for Ra Minimum						
Index	ON	OFF	WT	Sp avg (mm/min)	Sp cal (mm/min)	Sp error (%)
6	1	13	4	1.932000	1.978993	2.43
11	1	14	4	1.880000	1.925093	2.40
16	1	15	4	1.848000	1.871193	1.26
21	1	16	4	1.791000	1.817293	1.47
25	1	16	8	1.947000	1.967059	1.03
26	2	12	4	2.318000	2.349685	1.37



รูปที่ 6.11 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี

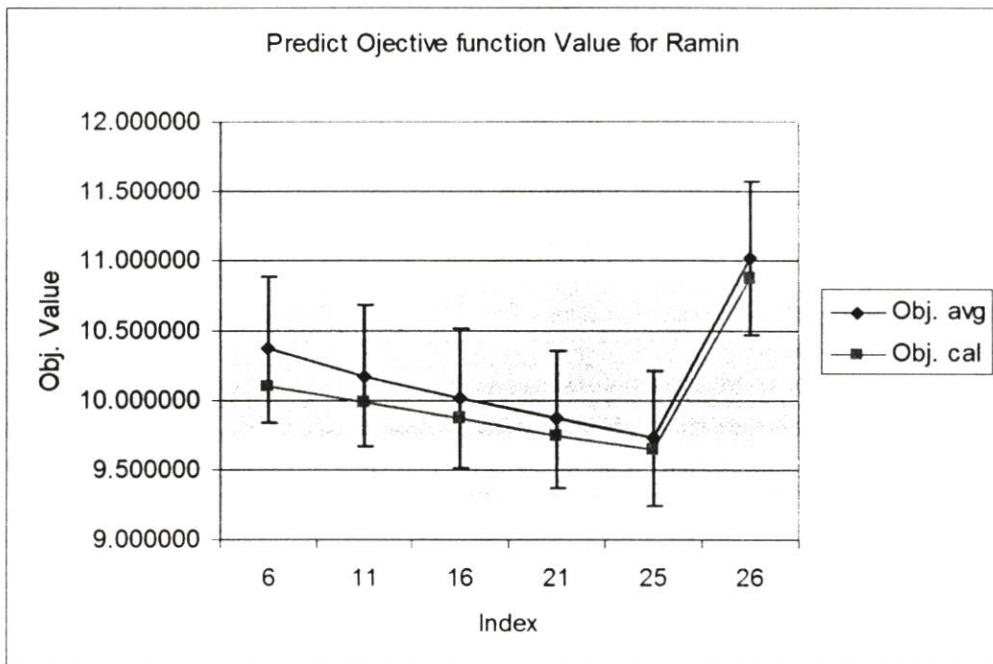
$Ra_{min}$  (error  $\leq 5\%$ )

จากรูปที่ 6.11 ข้อมูลที่ 6 ถึง 21 จะเห็นได้ว่ามีค่า Cutting Speed ลดลงเนื่องจาก ค่า OFF ที่สูงขึ้น ส่วนข้อมูลตัวที่ 25 มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากค่า WT ที่สูง และข้อมูลตัวที่ 26 มีค่าสูงสุดเพราะว่าค่า OFF ที่ต่ำและค่า ON ที่สูงกว่าข้อมูลตัวอื่น

จากนั้นนำข้อมูลที่ี้จากการตารางที่ 6.3 (ค่า Ra avg และ ค่า Ra cal) และตารางที่ 6.4 (ค่า Sp avg และ ค่า Sp cal) มาทำการแปลงเป็นค่า Objective function เพื่อที่จะพล็อตเปรียบเทียบผลจากการคำนวณ Objective function (Obj.cal) กับ Objective function (Obj. avg) ที่ี้จากการวัดกรณี  $Ra_{min}$  แสดงดังตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.12

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ Objective function Value กรณี  $Ra_{min}$

Index	ON	OFF	WT	Obj. avg	Obj. cal	Obj. error (%)
6	1	13	4	10.366646	10.107000	2.504629
11	1	14	4	10.174533	9.985359	1.859289
16	1	15	4	10.020325	9.865905	1.541068
21	1	16	4	9.870420	9.748834	1.231822
25	1	16	8	9.729692	9.636381	0.959033
26	2	12	4	11.016168	10.875085	1.28069



รูปที่ 6.12 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณค่า Objective function กรณี  $Ra_{min}$  (error  $\leq 5\%$ )

กรณีต้องการหาค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ) จะได้ค่าที่เหมาะสมและกราฟ

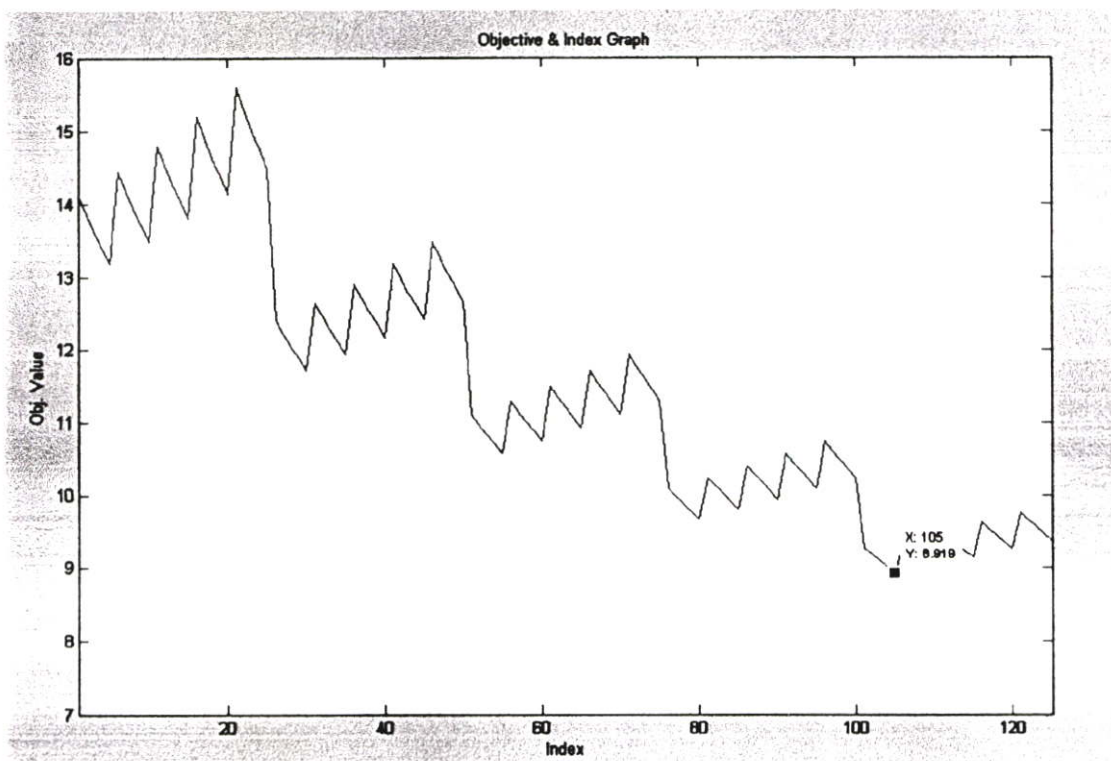
Objective function ดังรูปที่ 6.9 ดังนี้

Calculate of Optimum

1. ON Optimum value (Code) is 2
2. OFF Optimum value (Code) is -2
3. WT Optimum value (Code) is 2
4. Obj. function is 8.918749
5. NSP\*= 0.778039,  $Ra^*$ = 1.138360

Result of Optimum value

1. ON Optimum value is 5
2. OFF Optimum value is 12
3. WT Optimum value is 8
4. SP = 3.449827,  $Ra$  = 3.308301

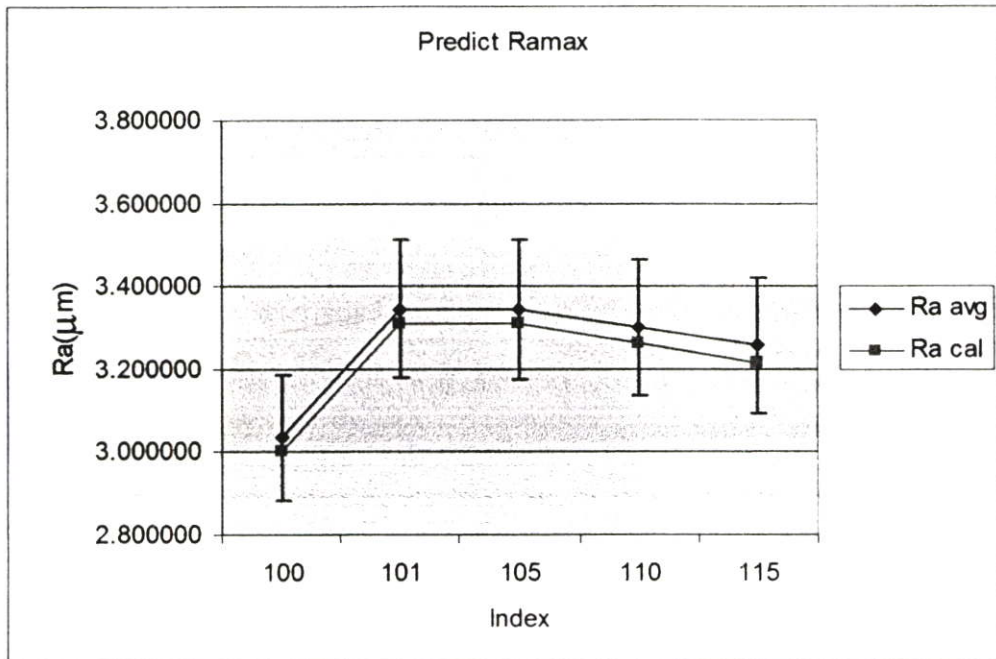


รูปที่ 6.13 ลักษณะกราฟ Objective function เมื่อหาค่า  $Ra_{max}$  ที่เหมาะสม

นำสมการและโปรแกรมที่เขียนขึ้นไปทดสอบความแม่นยำในการทำนายค่า  $Ra_{max}$  โดยใช้ค่า  $Ra_{max}$  และ  $Ra$  รอบข้างจุด  $Ra_{max}$  ที่ได้จากการคำนวณ เทียบกับค่า  $Ra_{max}$  และ  $Ra$  รอบข้างจุด  $Ra_{max}$  ที่ได้จากการทดลองชุดใหม่ แสดงในตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.14 ส่วนการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณ Cutting speed กับ Cutting speed ที่ได้จากการวัดกรณี  $Ra_{max}$  แสดงในตารางที่ 6.7 และรูปที่ 6.15

ตารางที่ 6.6 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ  $Ra_{max}$

Predict Ra Maximum						
Index	ON	OFF	WT	Ra avg( $\mu\text{m}$ )	Ra cal( $\mu\text{m}$ )	Ra error(%)
100	4	16	8	3.034000	3.002377	1.04
101	5	12	4	3.345000	3.308301	1.10
105	5	12	8	3.343000	3.308301	1.04
110	5	13	8	3.300000	3.261913	1.15
115	5	14	8	3.258000	3.215526	1.30

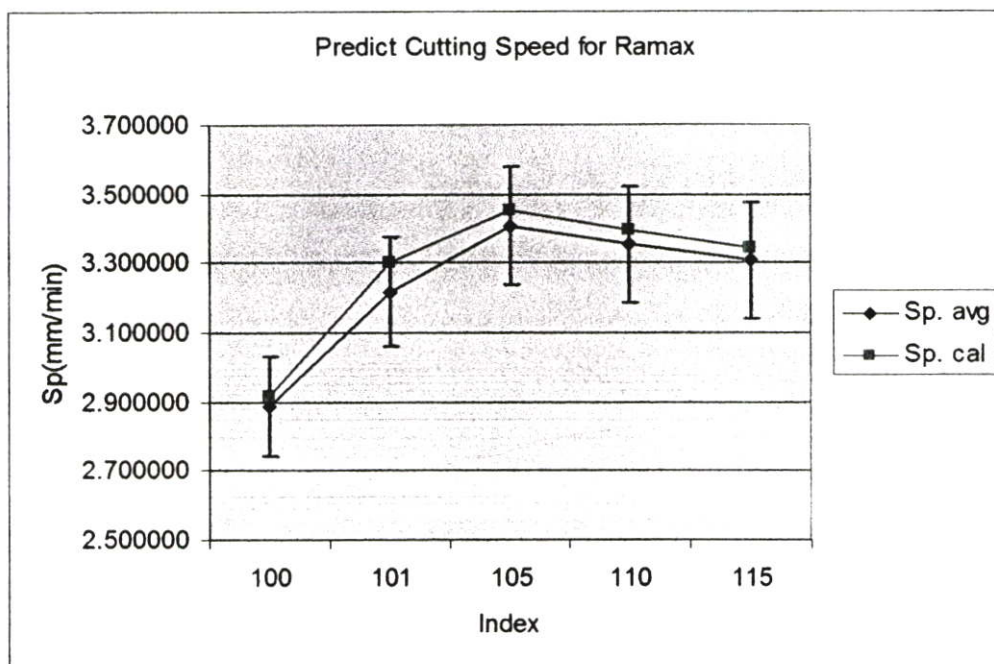


รูปที่ 6.14 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ  $Ra_{max}$  (error  $\leq 5\%$ )

จากรูปที่ 6.14 ข้อมูลตัวที่ 100 มีค่าต่ำสุด เนื่องมาจากค่า ON ที่ต่ำและค่า OFF ที่สูงกว่าข้อมูลตัวอื่น และข้อมูลที่ 101 ถึง 115 จะเห็นได้ว่ามีค่า  $Ra$  ลดลงเนื่องมาจาก ค่า OFF ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 6.7 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี  $Ra_{max}$

Predict Cutting Speed for Ra Maximum						
Index	ON	OFF	WT	Sp avg (mm/min)	Sp cal (mm/min)	Sp error (%)
100	4	16	8	2.888000	2.917435	1.02
101	5	12	4	3.218000	3.300061	2.55
105	5	12	8	3.408000	3.449827	1.23
110	5	13	8	3.353000	3.395927	1.28
115	5	14	8	3.307000	3.342027	1.06



รูปที่ 6.15 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบเกี่ยวกับผลจากการคำนวณ Cutting Speed กรณี

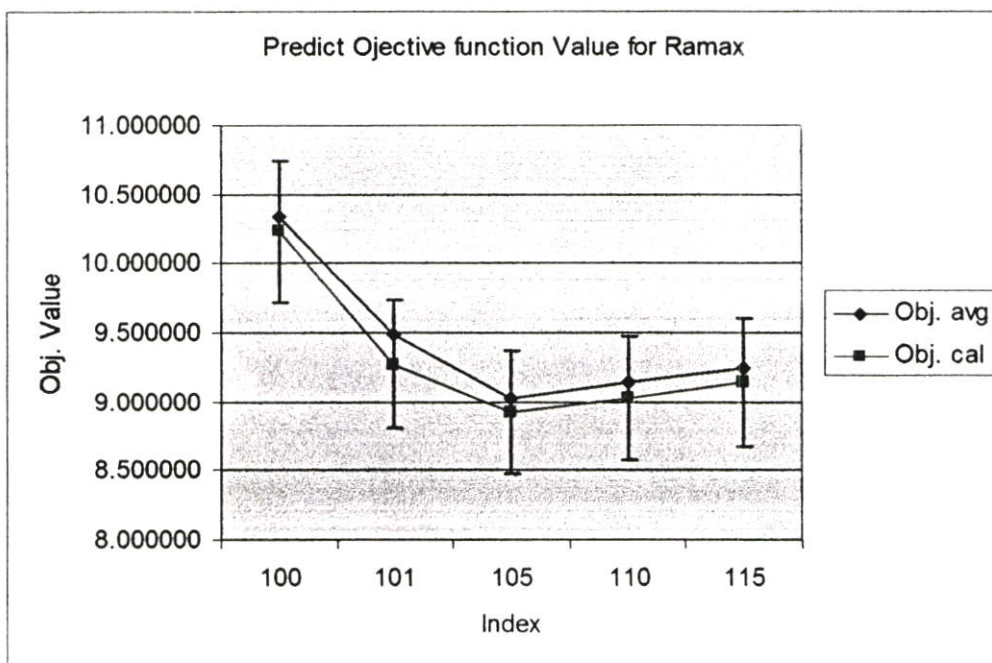
$Ra_{max}$  (error  $\leq 5\%$ )

จากรูปที่ 6.15 ข้อมูลตัวที่ 100 ถึง 105 จะเห็นได้ว่ามีค่า Cutting Speed มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า OFF ที่ลดลง ส่วนข้อมูลที่ 105 ถึง 115 จะเห็นได้ว่ามีค่า Cutting Speed ลดลง เนื่องจากค่า OFF ที่สูงขึ้น

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกจากตารางที่ 6.6 (ค่า Ra avg และ ค่า Ra cal) และตารางที่ 6.7 (ค่า Sp avg และ ค่า Sp cal) มาทำการแปลงเป็นค่า Objective function เพื่อที่จะพล็อตเปรียบเทียบผลจากการคำนวณ Objective function (Obj.cal) กับ Objective function (Obj. avg) ที่ได้ออกจากวัดกรณี  $Ra_{max}$  แสดงดังตารางที่ 6.8 และรูปที่ 6.16

ตารางที่ 6.8 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลจากการคำนวณ Objective function Value กรณี

$Ra_{max}$						
Index	ON	OFF	WT	Obj. avg	Obj. cal	Obj. error (%)
100	4	16	8	10.337945	10.233297	1.012271
101	5	12	4	9.491888	9.271847	2.318201
105	5	12	8	9.026179	8.918749	1.190205
110	5	13	8	9.140573	9.026277	1.250425
115	5	14	8	9.237472	9.137789	1.079116



รูปที่ 6.16 แสดงแนวโน้มผลการทดสอบเปรียบเทียบผลจากการคำนวณค่า Objective function กรณี  $Ra_{max}$  (error  $\leq 5\%$ )

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 7.1 การวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

จากผลการทดลอง เราจะพบว่าค่าของ ON และ OFF มีผลอย่างมากต่อค่า Ra ค่า Ra จะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าของ ON อยู่ในระดับสูงและค่าของ OFF อยู่ในระดับต่ำ อันเนื่องมาจาก เมื่อ ON เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานในการสปาร์คสูงขึ้นและช่วงเวลาในการสปาร์คจะยาวนานขึ้นทำให้บริเวณที่เส้นลวดกับชิ้นงานอาร์คกันมีความร้อนสูงขึ้น เป็นผลให้ผิวชิ้นงานที่ตัดมีการหลอมละลายมากขึ้น และ Ra สูงขึ้น สำหรับตัวแปร OFF เมื่อช่วงเวลาในการหยุดการสปาร์คสั้นลงทำให้บริเวณชิ้นงานเกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวชิ้นงานน้อยลงทำให้ตัวชิ้นงานยังมีความร้อนตกค้างอยู่ ทำให้การสปาร์คครั้งถัดไปเกิดการหลอมละลายมากขึ้น เป็นผลให้ผิวชิ้นงานที่ตัดมี Ra สูงขึ้น หรือ บางทีถ้า OFF มีค่าน้อยเกินไปจนทำให้ฉนวน (น้ำ) ที่กั้นกลางระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานยังไม่คืนสู่สภาพความเป็นฉนวนอย่างเต็มที่ซึ่งจะทำให้เกิดการสปาร์คแบบอาร์ค (Arc Discharge) ซึ่งไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเพราะจะทำให้ชิ้นงานเสียรูป ซึ่งผลที่ได้ข้างต้นนั้นจะเห็นว่าสอดคล้องกับสมการที่ (6.1) และมีค่าความผิดพลาดในการทำนายที่เกิดขึ้น ไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับผลที่วัดจากชิ้นงานจริง ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถคำนวณค่า Ra ได้แม่นยำพอสมควร

#### 7.2 การวิเคราะห์ตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป (Cutting Speed)

จากผลการทดลอง เราจะพบว่าค่าของ ON , OFF และ WT มีผลอย่างมากต่อค่าความเร็วในการขึ้นรูป ค่าความเร็วในการขึ้นรูปจะมีค่ามากที่สุดเมื่อค่าของ ON และ WT อยู่ในระดับสูงและค่าของ OFF อยู่ในระดับต่ำ อันเนื่องมาจาก เมื่อ ON เพิ่มขึ้นทำให้พลังงานในการสปาร์คสูงขึ้นและช่วงเวลาในการสปาร์คจะยาวนานขึ้นทำให้เส้นลวดตัดชิ้นงานได้เร็วขึ้น สำหรับ WT เมื่อมีค่าความตึงของเส้นลวดสูงทำให้ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานในการสปาร์คคงที่ทำให้ เครื่องสปาร์คได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่ต้องผ่อนเพราะกลัวเส้นลวดจะขาด ส่วนตัวแปร OFF เมื่อช่วงเวลาในการหยุดการสปาร์คลดทำให้ความถี่ของช่วงเวลาในการสปาร์คมากขึ้นทำให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้เร็วขึ้นซึ่งผลที่ได้ข้างต้นนั้นจะเห็นว่าสอดคล้องกับสมการที่ (6.2) และมีค่าความผิดพลาดในการทำนายที่เกิดขึ้น ไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับผลที่วัดจากชิ้นงานจริง ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถคำนวณค่า Ra ได้แม่นยำพอสมควร

## 7.3 การวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

### 7.3.1 กรณีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ )

จากผลการทดลอง โดยใช้สมการที่ 6.4 ร่วมกับโปรแกรมที่เขียนขึ้น โดยที่ต้องการค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) จะให้ค่า  $w_1 = 1$  และ  $w_2 = 10$  (ให้ความสำคัญกับค่า  $Ra$  มากกว่าค่า Cutting Speed) จากการคำนวณจะได้จุดที่มีค่า  $Ra$  น้อยที่สุด และมีตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม เพราะค่า ON ที่อยู่ในระดับที่ต่ำจะทำให้พลังงานและระยะเวลาในการสปาร์คลดน้อยลงทำให้มีการสปาร์คหลอมละลายลดลงผิวชิ้นงานจึงมีค่า  $Ra$  ที่น้อย และค่า OFF ที่มากทำให้ช่วงเวลาในการหยุดการสปาร์คมากขึ้นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานมากขึ้นตามทำให้การสปาร์คครั้งต่อไปมีการหลอมละลายที่น้อยลงทำให้มีค่า  $Ra$  ที่น้อย แต่ในขณะเดียวกัน ค่า WT ที่อยู่ในระดับสูงทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานมีความเร็วสูงสุด ในเงื่อนไขที่กำหนดของค่า ON และ OFF ซึ่งผลที่ได้มีค่าความผิดพลาดในการทำนายที่เกิดขึ้น ไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับผลที่วัดจากชิ้นงานจริง ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้และ โปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถคำนวณค่า  $Ra_{min}$  ได้แม่นยำพอสมควร

### 7.3.2 กรณีค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ )

จากผลการทดลอง โดยใช้สมการที่ 6.4 ร่วมกับโปรแกรมที่เขียนขึ้น โดยที่ต้องการค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ) จะให้ค่า  $w_1 = 10$  และ  $w_2 = 1$  (ให้ความสำคัญกับค่า Cutting Speed มากกว่าค่า  $Ra$ ) จากการคำนวณจะได้จุดที่มีค่า  $Ra$  มากที่สุด และมีตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม เพราะค่า ON ที่อยู่ในระดับที่สูงจะทำให้พลังงานและระยะเวลาในการสปาร์คเพิ่มมากขึ้นทำให้มีการสปาร์คหลอมละลายมากขึ้นผิวชิ้นงานจึงมีค่า  $Ra$  ที่มาก และค่า OFF ที่น้อยทำให้ช่วงเวลาในการหยุดการสปาร์คน้อยลงทำให้มีความถี่ในการสปาร์คเพิ่มขึ้นทำให้การขึ้นรูปเร็วขึ้นและการถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานมีค่าน้อยทำให้การสปาร์คครั้งต่อไปมีการหลอมละลายที่มากขึ้นทำให้มีค่า  $Ra$  ที่มาก ในขณะเดียวกัน ค่า WT ที่อยู่ในระดับสูงทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานมีความเร็วสูงสุด ในเงื่อนไขที่กำหนดของค่า ON และ OFF ซึ่งผลที่ได้มีค่าความผิดพลาดในการทำนายที่เกิดขึ้น ไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับผลที่วัดจากชิ้นงานจริง ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้และ โปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถคำนวณค่า  $Ra_{max}$  ได้แม่นยำพอสมควร

## บทที่ 8

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 8.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ด้วยไวร์อีดีเอ็มโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่าตัวแปรป้อนเข้าที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวและความเร็วในการขึ้นรูปโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ ร่วมกับโปรแกรม Statgraphics เพื่อสร้างพื้นผิวผลตอบ สมการค่าความหยาบผิวและสมการความเร็วในการขึ้นรูป ต่อจากนั้นได้ทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Matlab ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งมี 2 กรณีด้วยกันคือ กรณีที่มีค่าความหยาบผิวน้อยสุด และกรณีที่มีค่าความหยาบผิวมากที่สุด สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน DC53 ที่ผ่านการตัดด้วย Wire EDM จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Analysis of Variance สรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองคือ ตัวแปร ON และ OFF
2. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ ค่าความเร็วในการขึ้นรูปของชิ้นงาน DC53 ที่ผ่านการตัดด้วย Wire EDM จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Analysis of Variance สรุปได้ว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองคือ ตัวแปร ON, OFF และ WT
3. สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิว (Ra) และตัวแปรป้อนเข้าทั้งสอง (ON และ OFF) ที่สร้างขึ้นมาโดย Response Surface Methodology มีความแม่นยำในการทำนายพอสมควร (ความผิดพลาดไม่เกิน5%) ในช่วงของการทดลองที่ทำการศึกษา
4. สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วในการขึ้นรูป ชิ้นงานและตัวแปรป้อนเข้าทั้งสาม(ON, OFF และ WT) ที่สร้างขึ้นมาโดย Response Surface Methodology มีความแม่นยำในการทำนายพอสมควร (ความผิดพลาดไม่เกิน5%) ในช่วงของการทดลองที่ทำการศึกษา

5. โปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Matlab ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก Response Surface Methodology โดยเลือกใช้  $w_1 = 1$  และ  $w_2 = 10$  ในการหาจุดที่มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับทางทฤษฎีโดยที่จุดที่มีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ( $Ra_{min}$ ) คือ  $Ra = 2.40 \mu m$ , Cutting Speed = 1.97 mm/min เงื่อนไขตัวแปรป้อนเข้าที่ได้ ON = 1, OFF = 16, WT = 8 และทำการเทียบกับผลการทดลองชุดใหม่ที่ใช้ในการตรวจสอบจะเห็นได้ว่ามีความแม่นยำในการทำนายพอสมควร (ความผิดพลาดไม่เกินไม่เกิน 5%) ในช่วงของการทดลองที่ทำการศึกษา

6. โปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรม Matlab ร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จาก Response Surface Methodology โดยเลือกใช้  $w_1 = 10$  และ  $w_2 = 1$  ในการหาจุดที่มีค่าความหยาบผิวมากที่สุด ( $Ra_{max}$ ) คือ  $Ra = 3.31 \mu m$ , SP = 3.45 mm/min เงื่อนไขตัวแปรป้อนเข้าที่ได้ ON = 5, OFF = 12, WT = 8 ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับทางทฤษฎี และทำการเทียบกับผลการทดลองชุดใหม่ที่ใช้ในการตรวจสอบจะเห็นได้ว่ามีความแม่นยำในการทำนายพอสมควร (ความผิดพลาดไม่เกิน 5%) ในช่วงของการทดลองที่ทำการศึกษา

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาวิธีการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ด้วยไวร์อีดีเอ็มโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ

1. พัฒนาการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ด้วยไวร์อีดีเอ็มโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบในกรณีที่เป็นารตัดละเอียด (Rim cut ค่าความสูงของกระแศ  $\leq 16$ )
2. พิจารณาถึงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อมีค่าความตึงของเส้นลวด (WT) ที่ระดับต่างๆ
3. พิจารณาถึงรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการตัดจริงเทียบกับรูปร่างชิ้นงานที่ได้ ออกแบบว่ามีความคลาดเคลื่อนเพียงใดเมื่อใช้เงื่อนไขที่ได้จากค่าความผิวน้อยที่สุดและมากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Snoyes R. and Van Dijck F. "Plasma channel diameter growth affects stock removal." **Annals of CIRP.**, vol. 21, no. 1, 1972. pp. 39-40
- [2] Pandit S.M. and Rajurkar K.P. "A stochastic approach to thermal modeling applied to electro-discharge machining." **Journal of Heat Transfer.**, vol. 105, 1983. pp. 555-562.
- [3] Pandey P.C. and Jilani S.T. "Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM." **Precision Engineering.**, vol. 8, no. 2, 1986. pp.104-110
- [4] Shankar P., Jain V.K. and Sundarajan T. "Analysis of spark profile during EDM process." **Machining Science and Technology.**, vol. 1, no.2, 1997. pp.195-217
- [5] Puri A.B., Bhattacharyya B. "An analysis and optimization of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM." **Machine Tools & Manufacture.**, vol.43, 2003. pp151-159
- [6] Tarn Y.S., Ma S.C. and Chung L.K. "Determination of optimal cutting parameters in wire electrical discharge machining." **International Journal of Machine Tool & Manufacture.**, vol. 35, no. 12, 1995. pp. 1693-1701
- [7] Narender Singh P., Raghukandan K. and Pai B.C. "Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al-10%SiCp composites" **Materials Processing Technology.**, vol. 155-156, 2004. pp. 1658-1661
- [8] Spedding T.A., Wang Z.Q. "Study on modeling of wire EDM process." **Materials Processing Technology.**, vol. 69, 1997. pp. 18-28
- [9] Yadav V., Jain V.K., and Dixit P. M. "Thermal stresses due to electrical discharge machining." **International Journal of Machine Tool & Manufacture.**, vol.42, 2002. pp. 877-888.
- [10] Das S., Klotz M., and Klocke F. "EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses." **Journal of Materials Processing Technology.**, vol. 142, 2003. pp. 434-451

- [11] Ghanem F., Braham C., and Sidhom H. "Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity." **Journal of Materials Processing Technology.**, vol. 142, 2003. pp. 163-173.
- [12] Singh A. and Ghosh A. "A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining." **International Journal of Machine Tools & Manufacture.**, vol. 39, 1999. pp. 669-682
- [13] ทวี เทศเจริญ. "ความหยาบละเอียดและความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วย WIRE CUT EDM." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537
- [14] Wire-cut EDM A280L. **Machine Condition Table.** Fine Sodick., vol. 3.0
- [15] Fine Sodick Wire-cut EDM A280L. **Instruction Manual and Machine Tool.** Fine Sodick., vol. 1.0E.L
- [16] Fine Sodick Wire-cut EDM . **Fine APT.**, vol. 4.4
- [17] Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply MARK-EX. **Control System.** Fine Sodick., vol. 2.0U
- [18] Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply MARK-EX. **Code Instruction.** Fine Sodick., vol. 1.0
- [19] Gadalla A.M., Tsai W. "Machining of WC-CO Composites." **Material and manufacture Processes.**, vol. 4, no. 3, 1989. pp. 411-423
- [20] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2545

## ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก.**  
**ส่วนผสมเหล็กเครื่องมือ DC 53**

# INSPECTION CERTIFICATE

Messrs: NITTESSU STEEL CO., LTD. Date: DEC., 27, 2004 Packing List No: 12-111  
 Contract No: 17A-7331A Customer No: 4C490120003 Condition: SHIPPED AS IS

Bundle No.	Type of Steel	Heat No.	Quantity		Length ( M )	P'ce	Weight (GGS)	Body Hardness																																																										
			Size ( MM )																																																															
11	DC53	8C795	FLAT 13 X 65		4.600	10	313	217																																																										
22	DC53	8C862	FLAT 13 X 105		4.780	8	425	217																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Items</th> <th colspan="4">Chemical Composition</th> <th colspan="4">Mechanical Properties (Type of Specimen)</th> </tr> <tr> <th>C</th> <th>Si</th> <th>Mn</th> <th>P</th> <th>Yield Strength</th> <th>Tensile Strength</th> <th>Elongation</th> <th>Reduction of Area</th> <th>Impact Value</th> </tr> <tr> <th>Unit</th> <th>%</th> <th>%</th> <th>%</th> <th>%</th> <th>kgf/cm<sup>2</sup></th> <th>kgf/cm<sup>2</sup></th> <th>%</th> <th>%</th> <th>kgf/m<sup>2</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Heat No</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8C795</td> <td>0.6</td> <td>0.23</td> <td>19.4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>8C862</td> <td>0.6</td> <td>0.13</td> <td>19.3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									Items	Chemical Composition				Mechanical Properties (Type of Specimen)				C	Si	Mn	P	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Impact Value	Unit	%	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	%	%	kgf/m <sup>2</sup>	Heat No										8C795	0.6	0.23	19.4							8C862	0.6	0.13	19.3						
Items	Chemical Composition				Mechanical Properties (Type of Specimen)																																																													
	C	Si	Mn	P	Yield Strength	Tensile Strength	Elongation	Reduction of Area	Impact Value																																																									
Unit	%	%	%	%	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	%	%	kgf/m <sup>2</sup>																																																									
Heat No																																																																		
8C795	0.6	0.23	19.4																																																															
8C862	0.6	0.13	19.3																																																															
Remarks:																																																																		

It is hereby certified that the above results are true and correct in every detail.


**Daido Steel Co. Ltd.**  
 Kawasaki Plant. Chief of Quality Assurance Section

รูปที่ ผ.ก. 1 ใบรับรองคุณสมบัติเหล็กกล้า DC 53 ที่ใช้ในการทดลอง

**ภาคผนวก ข.**  
**ข้อมูลจากการทดลอง**

ตารางที่ ผ.ข. 1 ข้อมูลค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในการทดลอง

No.	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra avg
1	2.951	2.741	3.069	2.9200
2	2.930	3.136	2.733	2.9330
3	3.234	2.869	2.656	2.9197
4	3.213	2.837	2.726	2.9253
5	2.949	3.227	2.604	2.9277
6	2.718	2.888	3.267	2.9577
7	2.821	3.136	2.936	2.9643
8	3.164	2.554	3.058	2.9253
9	3.372	2.977	2.400	2.9163
10	2.948	3.034	2.900	2.9607
11	2.835	2.950	2.969	2.9180
12	2.900	3.071	2.893	2.9547
13	3.313	2.648	2.853	2.9380
14	3.066	2.961	2.816	2.9477
15	3.018	2.974	2.900	2.9640
16	2.866	2.788	3.067	2.9070
17	2.747	2.769	3.121	2.8790
18	3.007	3.079	3.141	3.0757
19	2.917	3.203	3.667	3.2623
20	2.613	2.539	2.488	2.5467
21	2.693	2.887	2.597	2.7256
22	2.898	3.282	3.063	3.0810
23	2.544	2.696	2.646	2.6287
24	3.110	3.023	2.845	2.9926
25	2.726	2.916	2.557	2.7340

หมายเหตุ ข้อมูลที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น  $\mu\text{m}$

ตารางที่ ผ.ข. 1 ข้อมูลค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในการทดลอง (ต่อ)

No.	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra avg
26	2.993	3.191	3.098	3.0940
27	2.583	2.666	2.670	2.6397
28	3.158	2.821	3.000	2.9930
29	2.834	2.777	2.541	2.7173
30	3.145	3.065	3.048	3.0860
31	2.709	2.589	2.645	2.6476
32	2.901	3.164	3.000	3.0217
33	2.861	2.681	2.757	2.7663
34	3.217	2.830	3.240	3.0957
35	2.727	2.469	2.724	2.6400
36	3.149	3.123	2.778	3.0167

หมายเหตุ ข้อมูลที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น  $\mu\text{m}$

ตารางที่ ผ.ข. 2 ข้อมูลค่าความเร็วในการขึ้นรูปของชิ้นงานในการทดลอง

No.	Sp @ 10 mm	Sp @ 10 mm	Sp @ 10 mm	Sp avg
1	2.664	2.634	2.702	2.6667
2	2.652	2.634	2.670	2.6520
3	2.670	2.652	2.640	2.6540
4	2.640	2.646	2.628	2.6380
5	2.706	2.568	2.646	2.6400
6	2.646	2.700	2.574	2.6400
7	2.616	2.580	2.664	2.6200
8	2.580	2.652	2.616	2.6160
9	2.658	2.616	2.610	2.6280
10	2.628	2.634	2.574	2.6120
11	2.580	2.628	2.622	2.6100
12	2.598	2.622	2.658	2.6260
13	2.634	2.720	2.772	2.7087
14	2.614	2.526	2.454	2.5313
15	2.658	2.616	2.586	2.6200
16	2.592	2.652	2.610	2.6180
17	2.510	2.616	2.466	2.5307
18	2.670	2.772	2.758	2.7330
19	3.156	3.204	3.222	3.1940
20	1.884	1.914	1.830	1.8760
21	2.484	2.472	2.514	2.4900
22	3.078	3.088	3.096	3.0873
23	2.383	2.346	2.376	2.3680
24	2.976	2.988	2.976	2.9800
25	2.562	2.550	2.538	2.5500

หมายเหตุ ข้อมูลที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น mm/min

ตารางที่ ผ.ข. 2 ข้อมูลค่าความเร็วในการขึ้นรูปของชิ้นงานในการทดลอง (ต่อ)

No.	Sp @ 10 mm	Sp @ 10 mm	Sp @ 10 mm	Sp avg
26	3.132	3.162	3.156	3.1500
27	2.436	2.430	2.430	2.4320
28	3.072	3.078	3.072	3.0730
29	2.470	2.488	2.472	2.4767
30	3.072	3.114	3.120	3.1020
31	2.316	2.346	2.350	2.3373
32	3.006	3.000	2.976	2.9940
33	2.520	2.544	2.567	2.5437
34	3.156	3.144	3.156	3.1520
35	2.418	2.430	2.430	2.4260
36	2.976	3.108	3.074	3.0527

หมายเหตุ ข้อมูลที่ทำการวัดมีหน่วยเป็น mm/min

ตารางที่ ผ.ข. 3 ตัวแปรและรหัสของตัวแปรที่ในการหาสมการ

ON	OFF	WT	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sp(mm/min)
-1	1	-1	2.6287	2.3680
1	1	1	3.0167	3.0524
0	0	0	2.9200	2.6667
0	0	0	2.9330	2.6520
0	0	0	2.9197	2.6540
0	0	2	2.9380	2.7087
0	0	0	2.9253	2.6380
0	0	0	2.9277	2.6400
-1	-1	-1	2.7173	2.4767
0	0	0	2.9640	2.6200
0	0	0	2.9577	2.6400
1	-1	1	3.0957	3.1520
-1	1	-1	2.6476	2.3373
-1	-1	1	2.7340	2.5500
-1	1	1	2.6400	2.4260
1	-1	1	3.0940	3.1500
1	1	1	2.9930	3.0730
-2	0	0	2.5467	1.8760
0	0	0	2.9070	2.6180
0	0	0	2.9643	2.6200
-1	-1	1	2.7663	2.5437
0	2	0	2.8790	2.5307
-1	1	1	2.6397	2.4320
1	-1	-1	3.0810	3.0873
1	-1	-1	3.0860	3.1020
0	0	0	2.9253	2.6160
0	0	0	2.9163	2.6280
1	1	-1	2.9926	2.9800

ตารางที่ ผ.ข. 3 ตัวแปรและรหัสของตัวแปรที่ในการหาสมการ (ต่อ)

ON	OFF	WT	Ra( $\mu\text{m}$ )	Sp(mm/min)
1	1	-1	3.0217	2.9940
-1	-1	-1	2.7256	2.4900
0	0	0	2.9607	2.6120
0	0	-2	2.9477	2.5313
0	0	0	2.9180	2.6100
0	0	0	2.9547	2.6260
0	-2	0	3.0757	2.7330
2	0	0	3.2623	3.1940

ภาคผนวก ค.  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



AMM017	Some Analytical Methods of Plastic Collapse of Circular Steel Tube under Quasi-Static Axial Compression	119
AMM018	A study for ripeness of durian by Fast Fourier Transform (FFT)	125
AMM019	Prediction of Surface Roughness of Wire-EDMed DC53 Tool steel	130
AMM020	Study on the Volumetric Shrinkage of Injection Molded Plastic Product	135
AMM021	Accuracy of the Scaling Law for Experimental Natural Frequencies of Rectangular Thin Plates	140
AMM022	Fracture Behavior and Mechanisms of Epoxy Resin Under Various Loading Rates	145
AMM023	Fatigue Behavior and Mechanism of Carbonitrided AISI 1015 Steel	151
AMM024	Stiffness and Strain Distribution on Fractured Femur with Locking Compression Plate	157
AMM025	Fixtureless Robotic Manufacturing System	163
AMM027	An Application of Reverse Engineering for 3D modeling of the Prototype Racing Car	167
AMM030	Multi-Level Design of an Automotive Part	172
AMM031	Study on the Crashworthiness of Bus Side Frame under Quasi Static Crush	178
AMM033	Effect of the Coating Type on the Flank Wear of the Slot Drills High Speed Steel	183
AMM034	Stress Analysis on the Alveolar Bone in Dental Implant Process: Finite Element Study	189
AMM035	Design of a Uniaxial Creep Testing Machine	194
AMM037	Investigation of Influences of Die Clearance on Blanking Behaviors of Stainless Steel Sheet Using FEM	200
AMM040	Mechanical Properties of Lignite Fly Ash/Natural Rubber Composites: Effects of Filler Size, Loading and Silane Coupling Agent	205
AMM041	Mechanical Properties of Sintered Dual Phase Stainless Steel Prepared from 304L and 410L Powders	209
AMM042	Stress Analysis in Unit Cell of Cellular Structures by Using Finite Element Method	213
AMM043	Study on Tribological Behavior of Thin Film Coating Disk against Steel Ball	217
AMM044	Effects of Experimental Distribution of Powder Size on Cold Compaction	222
AMM045	Modelling of Powders with Internal Pores in Cold Compaction	227
AMM046	A Numerical Investigation of Dynamic Compression Plate Attached on Fracture Human Femur Subjected to Static loading	233
AMM047	A Life Estimation of Dynamic Compression Plate Attached on Fracture Human Femur Subjected to Cyclic Loading	239
AMM048	The effect of Dimensional and Notch Profile to Stress Intensity Factor for Aluminium AA5182 by Finite Element Method	245
AMM049	Design and Development of Safety Mechanism for Rubber Die-Punch Machine	250
AMM050	A Failure Analysis on the Bottom Sheet of Oil Trailer Tank	255

## การทำนายค่าความหยาบผิวที่ได้จากการตัดเหล็กเครื่องมือ DC53 ด้วย Wire-EDM

### Prediction of Surface Roughness of Wire-EDMed DC53 Tool steel

ณรงค์สร ศรีอบเชย<sup>1</sup> ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ<sup>2</sup> ร.ศ.ทวี เทชเจริญ<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Narongsorn Sriobchoey<sup>1</sup> Dr.Kannachai Kanlayasiri<sup>2</sup> Assoc. Prof.Thavee Teschareon<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520

#### บทคัดย่อ

ความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นส่วนเครื่องจักร คุณภาพผิวที่ดีจะปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของชิ้นงาน เช่น ความต้านทานเนื่องมาจากความเค้น การกัดกร่อนและการต่อต้านการสึกหรอของชิ้นงาน ในบทความฉบับนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน DC53 ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย Wire EDM โดยใช้วิธี Analysis of Variance ซึ่งพบว่าในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วย Wire EDM นั้นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิว คือ เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงานและความสูงของกระแส นอกจากนี้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหยาบผิวกับตัวแปรทั้งสองได้ถูกสร้างขึ้น โดยใช้วิธี Multiple Regression ซึ่งสมการที่ได้มีความคลาดเคลื่อนในการทำนายน้อยกว่า 5%

**คำหลัก** ความหยาบผิว, Wire EDM, Analysis of Variance, Multiple Regression

#### Abstract

Surface roughness plays a very important role in the quality of engineering components. A good quality surface improves the fatigue strength, corrosion and

wear resistance of work piece. In this paper, variables affecting the surface roughness of wire EDMed DC53 tool steel were investigated using Analysis of Variance technique. Results showed that ON and IP are significant variables to the surface roughness. In addition, a mathematical model was developed to relate the surface roughness to these variables by Multiple Regression method. The developed model provided prediction error less than 5%.

**Keywords:** Surface roughness, Wire EDM, Analysis of Variance, Multiple Regression

#### 1. บทนำ

จากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ได้มีการใช้วัสดุใหม่ๆมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตและการแปรรูปวัสดุที่มีค่าความแข็ง ซึ่งมีความเหนียวและความทนต่อการกระแทกสูง วัสดุเหล่านี้ยากที่จะขึ้นรูปโดยเครื่องจักรที่ใช้เทคนิคการผลิตแบบดั้งเดิม(Conventional Manufacturing Processes) ดังนั้นกระบวนการผลิตชิ้นงานสมัยใหม่ (Non-traditional Manufacturing Processes) จึงได้รับการประยุกต์ใช้ เช่น Electrochemical Machining, Ultrasonic Machining และ Electric Discharge Machining (EDM)

Wire-EDM ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของ EDM เป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานสมัยใหม่ที่ใช้ไฟฟ้าและความร้อนในการตัดชิ้นงานที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื้อวัสดุจะถูกกำจัดออกโดยการสปาร์กของกระแสไฟฟ้าที่ส่งออกเป็นช่วงๆระหว่างเส้นลวดไฟฟ้า (Wire Electrode) กับชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กตริก (Dielectric Fluid) การใช้กระบวนการ EDM ในทางอุตสาหกรรมได้รับความนิยมมากขึ้น อันเนื่องมาจากกระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและวัสดุที่มีความแข็งสูงได้ดี

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่อง Wire-EDM เป็นระบบที่ซับซ้อนอันเนื่องมาจากหลายๆสาเหตุ เช่น การปล่อยกระแสออกมาในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากๆ ปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนภายในพลาสมา (Plasma Channel) และธรรมชาติของกระบวนการ EDM ที่เป็น Stochastic Process[1-4] ด้วยสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดความยุ่งยากในการทำนายคุณภาพผิวหน้าของชิ้นงานโดยใช้แบบจำลองต่างๆ ดังนั้นเป็นเรื่องที่ไม่แปลกเลยถ้าจะพบแบบจำลองสำหรับค่าความหยาบผิวของการตัดชิ้นส่วนด้วย Wire-EDM ที่เที่ยงตรงและถูกต้องได้น้อยมาก

**2. วัตถุประสงค์**

บทความฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับค่าความหยาบผิว (Surface Roughness, Ra) และการหาค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ตัวแปรที่นำมาพิจารณาได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายผ่านลวด ความถี่ของลวด และระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า วิธี Design of Experiments และ Analysis of Variance ได้นำมาใช้เพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว เมื่อได้ตัวแปรเหล่านั้นมาแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกสร้างขึ้นจากตัวแปรเหล่านั้น โดยวิธี Multiple Regression หลังจากนั้น นำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปทดสอบกับผลการทดลองชุดใหม่ เพื่อที่จะดูความแม่นยำและความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นมา[5-8]

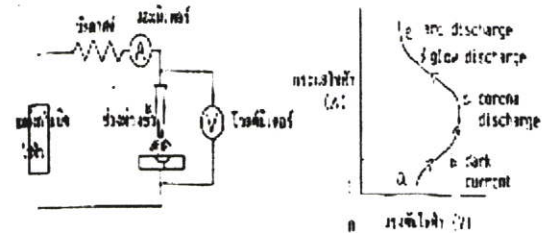
**3. ทฤษฎี**

**3.1 เครื่อง Wire EDM**

เป็น EDM ชนิดหนึ่งที่ใช้เส้นลวดขนาดเล็กเป็นขั้วไฟฟ้าและมีระบบ CNC สำหรับควบคุมตัวชิ้นงานให้เคลื่อนที่ ในลักษณะเช่นเดียวกับการวาดรูป เพื่อตัดเอาส่วนที่เป็นรูปออกไป เครื่องนี้ได้ประยุกต์มาจากเครื่อง EDM ประเภท Die sinking การวาดรูปที่แกน X-Y เคลื่อนที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 2 แกน จึงต้องการอุปกรณ์ระบบ CNC ไว้สำหรับการควบคุม ตัวเส้นลวดของ เครื่อง Wire EDM จะมีการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการสปาร์ก ดังนั้นลวดที่ใช้ไปครั้งหนึ่งแล้วจะไม่นำมาใช้อีก

**3.2 ปรากฏการณ์การสปาร์ก**

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซกั้นกลางอยู่จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง ดังนั้น ปรากฏการณ์เหล่านี้จึงหมายถึง การผิบบังคับทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการผิบบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน



รูปที่ 1 คุณสมบัติพิเศษ แรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก

**ก. สภาพที่กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล (Dark current)**

คือ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (E) ดังเช่น ในวงจรรูปที่ 1 ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาดเล็กมาก ประมาณ  $10^{-8} - 10^{-11}$  A

**ข. การสปาร์กแบบโคโรนา (Corona discharge)**

คือ การเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า บางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) ซึ่งเป็นสภาพการสปาร์กที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

**ค. การสปาร์กแบบโกลด์ว (Glow discharge)**

คือ การที่บริเวณส่วนที่เกิด การสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย สภาพการสปาร์กที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

**ง. การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc discharge)**

คือ หลังจากทีประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์กแบบโกลด์วได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้วการสปาร์กจะเข้าสู่สภาพขั้นตอนสุดท้าย (d-e) ซึ่ง หมายถึง การสปาร์กแบบอาร์ค สภาพ

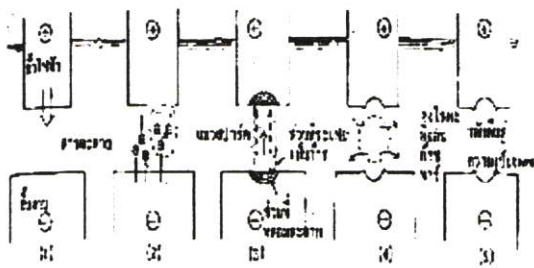
การสปาร์กแบบนี้ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมพลังงานของสภาพการสปาร์ค แบบนี้

**3.3 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM**

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะแข็งเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากซึ่งได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบเทียบวิธีการขึ้นรูปแบบนี้ได้เสมือน "การสปาร์คในช่องว่างแคบๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป" สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำในสารละลายโดยใช้ลวดทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็ง เพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกัน เหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์คแต่ต้องใช้วิธีการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ อาศัยการใช้พลังงานระดับสูง ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาช่วงเวลาสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก สำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

ในการการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ละครั้งของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 สภาพของการสปาร์คแต่ละครั้ง

**ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า**

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า(ประมาณ60-280V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมันเพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้สามารถลดระยะเวลาช่วงขั้วลงได้

**ข. สูญเสียความเป็นฉนวน**

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่ง สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

**ค. สปาร์คหลอมละลาย**

เมื่อเกิดการสูญเสีย ความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มี ความหนาแน่นสูงมากเป็นช่วงเวลาสั้นๆ มีขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมา (3000°C ขึ้นไป)

**ง. เย็นตัว**

ความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการสปาร์ค จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแย่งความร้อนไปก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว กลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ

**จ. กลับสู่ความเป็นฉนวน**

หลังจากที่การสปาร์ค หนึ่งครั้งแล้วจบลงแล้วจะรอจนกว่า สารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกัน การเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ ภายหลังจากกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์ค เช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก ก.

**4. การทดลอง**

**4.1 การเตรียมชิ้นงานในการทดลอง**

วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 (ค่าความแข็ง 217HB) เนื่องจากเหล็กชนิดนี้นิยมใช้กันโดยทั่วไป เช่น ทำแม่พิมพ์ตัดโลหะเย็น ทำลูกรีดสำหรับมันว่ท่ต่าง ๆ ไม่มีค สำหรับตัดกระดาษ ตัดเหล็ก แบบพิมพ์สำหรับทำอิฐบล็อก พิมพ์ขึ้นรูปเกลียว พิมพ์ปั๊มลวดลาย พิมพ์ปั๊มเย็นหัวสกรู พิมพ์รีดโลหะเย็น กัดเตอร์ กัดเฟือง กัดไม้ มีดรูต ฯลฯ ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือDC53 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

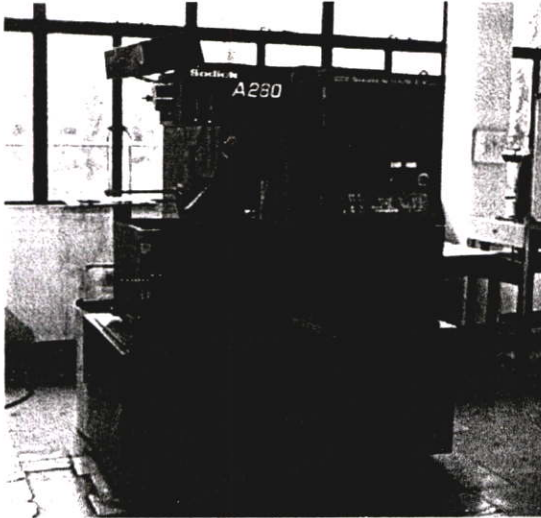
ตารางที่ 1 ส่วนผสมหลักของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53

ส่วนผสม		(wt %)	
C	Cr	Mo	Fe
0.96	8.23	1.94	Balance

ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 คุณสมบัติเทียบเท่ากับเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 สำหรับชิ้นงานที่ใช้มีขนาด (กว้าง x ยาว x หนา) 27 mm x 65 mm x 13mm หลังจาก นั้นทำการเจียรในผิว เพื่อให้ผิวมีความเรียบ

4.2 การตัดชิ้นงาน

ใช้เครื่อง Wire EDM ของ Sodick รุ่น A280 ในการตัดใช้ลวดของ KHSodick รุ่น KHW-250P5-5 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25mm. ทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาด (กว้าง x ยาว x หนา) 27 mm x 5 mm x 13 mm



รูปที่ 3 เครื่อง Wire EDM

การออกแบบการทดลองใช้รูปแบบ Full Factorial Design ( $2^4$ ) เมื่อ k คือจำนวนตัวแปรในการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้มีอยู่ 4 ตัวแปรด้วยกัน

ได้แก่ ON คือ เวลาในการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน

OFF คือ เวลาในการหยุดการสปาร์คของเส้นลวดกับชิ้นงาน

IP คือ ความสูงของกระแส

WT คือ ความตึงของเส้นลวด

ซึ่งเงื่อนไขในการตัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรหลักในการทดลอง

ตัวแปร	ค่าต่ำ	ค่าสูง
ON(msec)	2	5
OFF(msec)	5	15
IP (A.)	16	17
WT(g)	340	740

ในการทดลองนี้มี 4 ตัวแปรที่จะศึกษา ดังนั้นเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมดจึงมี  $2^4$  หรือ 16 เงื่อนไข ซึ่งแต่ละเงื่อนไขจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้

4.3 การวัดค่า Surface Roughness (Ra)

หลังจากที่ได้ตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขทั้งหมดแล้ว นำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่า Surface Roughness (Ra) ตามแนวการตัด โดยใช้เครื่อง Surfometer ของ Precision Device รุ่น PDD-400-bo โดยที่ทำการวัดค่า Ra ที่ตำแหน่งต่างๆ 3 จุดต่อ 1 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยใช้ stroke เท่ากับ 2.54 mm. และ Cut-off length เท่ากับ 0.80 mm. แล้วนำมาทำการเฉลี่ย

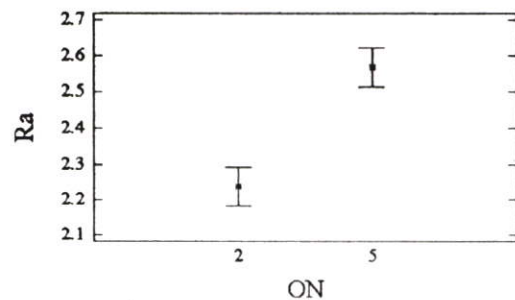
5. ผลการทดลอง

การวิเคราะห์หาตัวแปรในการตัดที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวสามารถทำได้โดยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) ซึ่งผลของการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ANOVA

Source	SUM of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
<b>MAIN EFFECTS</b>					
A:ON	1.32103	1	1.32103	78.97	0
B:OFF	0.0684786	1	0.0684786	4.09	0.516
C:IP	15.4077	1	15.4077	921.11	0
D:WT	0.00212002	1	0.00212002	0.13	0.7242
<b>INTERACTIONS</b>					
AB	0.00832419	1	0.00832419	0.56	0.4608
AC	0.276489	1	0.276489	16.53	0.3
AD	0.0663797	1	0.0663797	3.97	0.56
BC	0.00397852	1	0.00397852	0.24	0.6291
BD	2.85208E-06	1	2.85208E-06	0	0.9673
CD	0.00448802	1	0.00448802	0.27	0.6089
ABC	0.0748552	1	0.0748552	4.46	0.425
ABD	0.0129692	1	0.0129692	0.78	0.3851
ACD	0.128858	1	0.128858	7.7	0.91
BCD	0.00217352	1	0.00217352	0.13	0.7209
ABCD	0.0563756	1	0.0563756	3.37	0.757
RESIDUAL	0.536273	32	0.0167573		
TOTAL	17.9703	47			

Means and 95.0 Percent Confidence Intervals



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่า Ra และ ON

*International Journal of Machine Tool & Manufacture.*  
42:877-888.

[6] Das, S., Klotz, M., and Klocke, F. (2003). *EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses.* *Journal of Materials Processing Technology.* 142:434-451.

[7] Ghanem, F., Braham, C., and Sidhom, H. (2003). *Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity.* *Journal of Materials Processing Technology.* 142:163-173.

[8] Singh, A. and Ghosh, A. (1999). *A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining.* *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 39:669-682

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย ณรงค์สร ศรีอบเชย
วัน เดือน ปีเกิด	15 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	251/235 หมู่บ้านสัมมากร ซอย 54 ถนนรามคำแหง แขวงสะพานสูง เขต สะพานสูง กรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	2543 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์) จากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ บดินทรเดชา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการ

1. ณรงค์สร ศรีอบเชย ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และ ร.ศ.ทวี เทศเจริญ. 2548. “การทำนายค่าความ  
หยาบผิวที่ได้จากการตัดเหล็กเครื่องมือ DC53 ด้วย Wire-EDM.” หน้า 130-134. ใน การ  
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 ภูเก็ต : คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.