

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความหยาบละเอียดและความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วย Wire Cut EDM  
Surface Roughness and Residual Stress of Wire Cut EDM



✓ นายทวี เทศเจริญ  
Mr. THAVEE TESCHAREON

หนังสืออ้างอิง  
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รองศาสตราจารย์อัครเดช สินธุภักดิ์  
ADVISOR  
ASSOCIATE PROFESSOR AKRADECH SINBHUPHAK

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2537  
ISBN 974-621-14-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการเผยแพร่ข้อมูลใดๆถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....21320  
วัน เดือน ปี - 1 ก.ย. 2537

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	ความหยาบละเอียดและความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วย Wire Cut EDM
ชื่อนักศึกษา	นายทวี เทศเจริญ
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อัครเดช สันตุภักดิ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2537

### บทคัดย่อ

หลักการตัดโลหะขึ้นรูปชิ้นงานโดยอาศัยวิธี Wire Cut Electrical Discharge Machine (EDM) เส้นลวดที่ขุดด้วยโคบอลต์จะถูกสปาร์คที่ควบคุม ด้วยกำเนิดไฟฟ้าแบบพัลส์ อุณหภูมิของเส้นลวดประมาณ  $2,500-3,000^{\circ}\text{C}$  ชิ้นงานจะถูกตัดขณะที่ลวดวิ่งผ่านชิ้นงาน ระบบของเครื่องจักรควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ขณะตัดชิ้นงานจะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำหรือน้ำมัน ประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความตึงของเส้นลวด ความเร็วของเส้นลวด ระยะเวลาเปิดปิดของกระแสไฟฟ้า ขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับให้ตัดได้ทั้งโลหะอ่อนและโลหะแข็ง เช่น โลหะผสมคาร์ไบด์ ผลของการตัดชิ้นงานจะได้ขนาดและรูปร่าง ตามความต้องการ ความหยาบของชิ้นงานที่ผิวไม่เกิน  $5\ \mu\text{m}$  ความเค้นที่ตกค้างมีค่าประมาณ  $53\ \text{kgf}/\text{mm}^2$  และความลึกไม่เกิน  $56\ \mu\text{m}$

Thesis title	Surface Roughness and Residual Stress of Wire Cut EDM
Student	Mr. Thavee Teschareon
Thesis advisor	Assoc. Prof. Akraddech Sindhuphak
Level of study	Master of Engineering
Department	Mechanical Engineering
Academic year	1994

### Abstract

The principle of metal Cut using Wire Cut Electrical Discharge Machine is studied. Cobolt coated wire was sparked and controlled by an electric pulse generator at temperature around 2,500-3,000 °C. The work piece was Cut while the wire passing through it. The system was controlled by computer. During the cutting process the piece work was kept cool with water or oil. The efficiency of cutting depends on many factors: wire tension, the speed of wire fed, the magnitude of electric current and on-off period of applied current. The cutting can be applied both to mild and hard metal such as metal carbide.

The piece work could be Cut into desired shape. The surface roughness of the Cut was less than 5 $\mu$ m and the residual stress was about 53 kgf/mm<sup>2</sup> and not deeper than 56 $\mu$ m.

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ข้าพเจ้าต้องใช้ความพยายามเป็นอย่างยิ่งเพราะต้องใช้ความรู้ความสามารถหลายด้านประกอบกัน ต้องขอขอบพระคุณบริษัท Sodick ประเทศไทย ที่ได้มอบเครื่อง CNC Wire Cut EDM ใช้สอนและการนำวิจัยแก่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล JSPS ที่ให้เงินซื้อเครื่องมือตรวจวัดในการทำวิจัยเป็นจำนวนเงินหลายแสนบาท

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ที่มีอุปการะคุณทุกท่านที่ให้คำปรึกษา

Professor Dr. KIYOSHI NISHIMOTO

Professor Dr.MASAKAZU KAGAWA

Professor Dr.TOSHIO IIJIMA

รองศาสตราจารย์อัครเดช สินธุ์ศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 จุดประสงค์และความเป็นมาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 เครื่อง CNC Wire Cut EDM.....	1
1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 หลักการ EDM.....	3
2.1 เครื่อง EDM.....	7
2.2 ปฏิกิริยาการฉีกสปาร์ค.....	11
2.3 การควบคุมเครื่อง EDM.....	31
2.4 การขึ้นรูปในสารละลาย.....	50
2.5 สวตที่ไซตัดหุบด้วยโคบอลต์.....	61
2.6 ภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่อง CNC Wire Cut DEM.....	67
บทที่ 3 การวิเคราะห์ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน.....	72
3.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการตัด.....	73
3.2 เครื่องมือที่ใช้วัดและวิธีการวัด.....	75
3.3 ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนกราฟ.....	76
3.4 ผลการวิเคราะห์.....	115
บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงาน.....	116
4.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการตัด.....	116
4.2 เครื่องมือที่ใช้วัดความเค้นที่ตกค้างและวิธีการวัด.....	117
4.3 วิธีการคำนวณหาค่าความเค้นที่ตกค้าง.....	121
4.4 ผลของการวิเคราะห์.....	162
บทที่ 5 บทสรุป.....	163
5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	163
5.2 แนวทางวิจัยในอนาคต.....	163
เอกสารอ้างอิง.....	164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก. ....	165
ภาคผนวก ข. ....	199
ภาคผนวก ค. ....	209
ประวัติผู้เขียน.....	231



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1 สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้แสดงในแบบ.....	47
ตาราง 2.2 คุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน.....	55
ตาราง 2.3 สรุปคุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน.....	55
ตาราง 2.4 คุณสมบัติที่ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ .....	62
ตาราง 2.5 แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด.....	65
ตาราง 2.6 จีโค้ด (G-Code).....	68
ตาราง 2.7 เอ็มโค้ด (M-Code).....	69
ตาราง 2.8 ทีโค้ด (T-Code).....	69
ตาราง 3.1 ส่วนผสมของเหล็ก SKD-11.....	73
ตาราง 3.2 แสดงความยาวของพื้นผิวในแต่ละชิ้นงาน.....	83-96
ตาราง 3.3 แสดงค่าความลึกเฉลี่ยของผิวชิ้นงานของแต่ละชั้น.....	113
ตาราง 4.1 ส่วนผสมของเหล็ก SKD-11.....	116
ตาราง 4.2 RESIDUAL STRESS CALCULATED FORMULA.....	122

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	ระบบแกนพิกัดตั้งฉาก.....3
รูปที่ 2.2	ระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา.....3
รูปที่ 2.3	ระบบแกนพิกัดของเครื่องกลึง.....4
รูปที่ 2.4	แกนพิกัดของเครื่องกัด.....4
รูปที่ 2.5	เครื่อง EDM.....8
รูปที่ 2.6	เครื่อง Wire Cut EDM.....10
รูปที่ 2.6.1	หลักการตัดขึ้นรูปแบบ Taper.....10
รูปที่ 2.7	เครื่อง Super Drill EDM.....11
รูปที่ 2.8	คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้าของเครื่องสปาร์ค.....12
รูปที่ 2.9	สภาพของสปาร์คแต่ละครั้ง.....14
รูปที่ 2.10	รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM...16
รูปที่ 2.11	รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ค.....20
รูปที่ 2.12	การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คสาขาเรโนโก.....21
รูปที่ 2.13	วงจรของเพาเวอร์ซัพพลายระบบทรานซิสเตอร์.....22
รูปที่ 2.14	คุณสมบัติพิเศษการสปาร์คของวงจรการสปาร์คแบบคอนเดนเซอร์(วงจรสาขาเรโนโก).....23
รูปที่ 2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป.....24
รูปที่ 2.16	วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์.....25
รูปที่ 2.17	วงจรทรานซิสเตอร์ต่อแบบขนาน.....26
รูปที่ 2.18	วงจรการสปาร์คแบบคอนเดนเซอร์และมีทรานซิสเตอร์ควบคุม.....28
รูปที่ 2.19	การควบคุมเครื่อง EDM.....32
รูปที่ 2.20	การควบคุมเครื่อง Wire Cut EDM.....33
รูปที่ 2.21	Semi Closed Feedback.....34
รูปที่ 2.22	Full Cut Feedback.....:35
รูปที่ 2.23	หลักการของคอนเดนเซอร์.....37
รูปที่ 2.24	องค์ประกอบที่กำหนดความจุของคอนเดนเซอร์.....39
รูปที่ 2.25	ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า.....42
รูปที่ 2.26	การสึกหรอของขั้วไฟฟ้า.....44
รูปที่ 2.27	ค่าสูงสุดของความหนา $R_{max}$ .....44
รูปที่ 2.28	ความหมาย $R_z$ .....45
รูปที่ 2.29	ความหนาเฉลี่ย $R_a$ .....46
รูปที่ 2.30	การสั้นของเส้นสวตระหว่างตัวนำ.....48
รูปที่ 2.31	ประเภทของตัวนำเส้นสวด.....49

รูปที่ 2.32	ความแตกต่างของการไหลของสารละลายและช่องห่างระหว่างขั้ว.....	51
รูปที่ 2.33	การขึ้นรูปจากปลายชิ้นงาน.....	51
รูปที่ 2.34	การขึ้นรูปชิ้นงานที่ตรงกลางลงให้เสถียร.....	53
รูปที่ 2.35	การสปาร์คซ้ำ.....	54
รูปที่ 2.36	ความแข็งแรงของชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลง.....	56
รูปที่ 2.37	ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปหยาบของสารละลายในน้ำมัน ความละเอียดของผิว 3.8 $\mu\text{m}$ .....	57
รูปที่ 2.38	ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปละเอียดในสารละลายน้ำมัน ความละเอียดของผิว 1.5 $\mu\text{m}$ .....	57
รูปที่ 2.39	เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ.....	59
รูปที่ 2.40	เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน.....	59
รูปที่ 2.41	เปรียบเทียบการสึกหรอของปลายคมมีดของ DIE (ขึ้นรูปด้วย Wire Cut EDM.).....	60
รูปที่ 2.42	EDM-cd surface texture of WC-Co. (6% 1-3 $\mu\text{m}$ . WC grains) using operating conditions of :1-1.0 A. +-1.4 s. f-0.56 KHz.....	64
รูปที่ 2.43	EDM-cd surface texture of WC-Co. (12% 1-3 $\mu\text{m}$ . WC grains) using operating conditions of :1-1.0 A. +-1.4 s. f-0.56 KHz. ....	66
รูปที่ 3.1	เครื่อง CNC Wire Cut EDM .....	72
รูปที่ 3.2	รูปแบบชิ้นงาน.....	74
รูปที่ 3.3	เครื่องมือวัดความหยาบละเอียดผิวชิ้นงาน.....	75
รูปที่ 3.4	การกำหนดแกน X,Y ของชิ้นงาน.....	75
รูปที่ 3.5	ตำแหน่งจุดต่าง ๆ ที่ทำการวัด.....	76
รูปที่ 3.6	แสดงความหยาบพื้นผิวในแต่ละชิ้นงาน.....	99-112
รูปที่ 4.1	ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อตัด.....	117
รูปที่ 4.2	ลางเลื่อน.....	118
รูปที่ 4.3	ฐานยึดจับชิ้นงาน.....	118
รูปที่ 4.4	เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์.....	119
รูปที่ 4.5	เครื่องวัดความโก่ง (MU-Checker).....	120
รูปที่ 4.6	การ Lay out gauge length.....	121

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 จุดประสงค์ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันโลก ได้มีการพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องกลให้ทันสมัยยิ่งขึ้น ในการพัฒนาได้อาศัยเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มนุษย์ได้พยายาม หาท่างประดิษฐ์คิดค้นขึ้นมา เพื่ออำนวยความสะดวกสบาย ในความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ในสมัยโบราณ การสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ต้องทำด้วยความซากลำบากส่วนมากจะใช้มือ และต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ ต่อมามนุษย์ก็ได้ผลิตเครื่องคอมพิวเตอร์ขึ้นมาใช้เมื่อไม่นานมานี้เอง ตอนแรกเครื่องคอมพิวเตอร์มีขนาดใหญ่มากมีขีดความสามารถมาก มีระบบความจำเป็นเลิศ และยังสามารถนำมาควบคุมเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตได้ดีอีกด้วย ในการควบคุมเครื่องจักรกล สมัยแรกจะใช้ระบบเชิงตัวเลข หรือที่เรียกว่า ระบบ NC (Numerical Control) ต่อมาได้มีการประยุกต์การใช้คอมพิวเตอร์กับโรงงานอุตสาหกรรมใช้ชื่อย่อว่า CIM (Computer Intergrated Manufacturing) โดยใช้คอมพิวเตอร์มาควบคุม และแปลงสัญญาณไฟฟ้ามาทำให้เครื่องจักร เคลื่อนที่ได้ตามความต้องการ ซึ่งระบบนี้เรียกว่า Computerized Numerical Control หรือ CNC

ตัวอย่างของเครื่องจักรกลที่ควบคุมด้วย CNC เช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องเจาะคว้าน เครื่องเชื่อม เครื่องเจียรนัย เครื่อง EDM และเครื่อง Wire Cut EDM (Electical Discharge Machine) เมื่อนำ CNC มาควบคุมเครื่องจักรกลเหล่านี้แล้วจะทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีขนาดเที่ยงตรงสูง ผิวของชิ้นงานมีความละเอียดมาก ทำการผลิตได้รวดเร็ว ข้อจำกัดและความผิดพลาดน้อย งานที่สลับซับซ้อนก็สามารถทำได้ จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ

#### 1.2 เครื่อง CNC Wire Cut EDM

ในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการ Machine คือการตะไบ กลึง ไส เจียรนัย ตัดเจาะ ชิ้นงานอาจจะเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่าถ้าชิ้นงานมีความแข็งมาก(เกิน 35 HRC) การ Machineก็จะกระทำด้วยความซากลำบาก หรือ บางครั้งอาจจะกระทำไม่ได้เลย ถ้าจะทำจริง ๆ ก็ต้องใช้เครื่องมือพิเศษต้องเสียเวลาในการ Machine มาก เมื่อประมาณ 20 ปีมานี้เองมีผู้คิดค้นเครื่อง CNC Wire Cut EDM มาใช้ตัดเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน โดยอาศัยหลักการเส้นลวดวิ่งผ่านชิ้นงาน และปล่อยกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เกิด การสปาร์ค กระแสไฟฟ้าจะถูกควบคุมด้วยระบบ Pulse อุณหภูมิของเส้นลวดมีความร้อนประมาณ 2,500-3,000° C เมื่อชิ้นงานถูกป้อนผ่านเส้นลวดที่ร้อน ชิ้นงานก็ถูกตัดขาด ในการตัดชิ้นงานอาจจะถูกตัดในอากาศ หรือตัดด้วยการหล่อเย็นในน้ำ หรือในน้ำมัน โดยปกติชิ้นงานจะเป็นขั้วบวกส่วนเส้นลวดจะเป็นขั้วลบ ฉะนั้นงานที่จะนำมาตัดด้วย Wire Cut EDM จึงต้องเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าแต่ขั้วติดของ Wire Cut EDM สามารถตัดได้ทั้งวัสดุอ่อนและวัสดุแข็ง ซึ่งเหล็กทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือ (Tool Steel) ที่ผ่านการชุบแข็ง หรือเหล็กกล้าที่ผสมคาร์ไบด์ก็สามารถทำการตัดได้เป็นอย่างดี ดังนั้น Wire Cut EDM จึงเหมาะสำหรับทำเครื่องมือ Punch และ Dies

ในการท้าวิจัยได้พยายามศึกษาผลกระทบของ Wire Cut EDM ที่ให้ค่าความร้อนสูงซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) และ ความเค้นที่ตกค้าง (Residual Stress) ของผิวชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็ก ทำเครื่องมือ SKD11 ถ้าผิวของชิ้นงานหยาบ มากเกินไปก็จะมีผล ทำให้อายุของเครื่องมือต่ำลง หรือถ้าเกิดความเค้นตกค้างที่ผิวชิ้นงานมากเกินไปก็อาจจะทำให้ผิวชิ้นงานอาจจะเกิดการแตกร้าวขึ้นได้และก็มีผลทำให้เครื่องมือที่มีอายุการใช้งานสั้นลงได้เช่นกัน ซึ่งการปรับปรุงอาจจะกระทำได้โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่อง CNC Wire Cut EDM เช่น ปริมาณของกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการเปิดปิดกระแสไฟฟ้า (ON-OFF) ความตึงของเส้นลวด (Wire Tension) เป็นต้น

### 1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

สำหรับรายละเอียดในการค้นคว้าวิจัยจะได้นำเสนอตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

#### บทที่ 2 หลักการ EDM

##### 2.1 เครื่อง EDM

##### 2.2 ปรัชญาการดำเนินการสปาร์ค

##### 2.3 การควบคุมเครื่อง Wire Cut EDM

##### 2.4 การขึ้นรูปในสารละลาย

##### 2.5 ลวดที่ใช้ตัดชุบด้วยโคบอลต์

##### 2.6 ภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่อง CNC Wire Cut EDM

#### บทที่ 3 การวิเคราะห์ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

##### 3.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการตัด

##### 3.2 เครื่องมือที่ใช้วัดและวิธีการวัด

##### 3.3 ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนกราฟความหยาบละเอียด

##### 3.4 ผลการวิเคราะห์

#### บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงาน

##### 4.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการตัด

##### 4.2 เครื่องมือที่ใช้วัดความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงาน

##### 4.3 วิธีการคำนวณหาค่าความเค้นที่ตกค้าง

##### 4.4 ผลของการวิเคราะห์

#### บทที่ 5 บทสรุป

##### 5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

##### 5.2 แนวทางวิจัยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### หลักการ EDM

#### การกำหนดแกนพิกัดมาตรฐาน (Normal Coordinate System)

การติดตั้งชิ้นงานตามระนาบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา (Right-Hand Rectangular Coordinate System) โดยขนานกับการเคลื่อนที่เส้นตาราง (ซ้าย-ขวา, หน้า-หลัง, ขึ้น-ลง) ของเครื่องมือกลดูได้จากรูป 2.1 และรูป 2.2 ทิศทางบวกของแกน Z

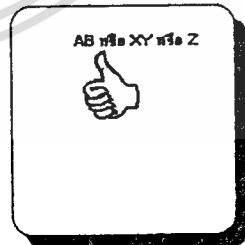
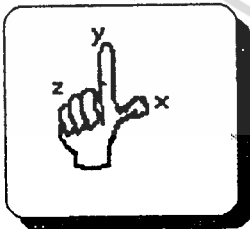
ชิ้นงานอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองเครื่องมือตัดจากแกนหลักเป็นทิศทางบวก (+) ดูได้จากรูป 2.3 เครื่องมือตัดอยู่ในแกนหมุนให้ถือการมองชิ้นงานจากแกนหลักเป็นทิศทางบวก (+) ดูได้จากรูป 2.4 แกนหมุนและแกนเสริม

แกนหมุนเป็นแกนที่หมุนและขนานกับแกนพิกัด ให้ถือทิศทางของการหมุนของเกลียวมือขวาเป็นทิศทางบวก (+)

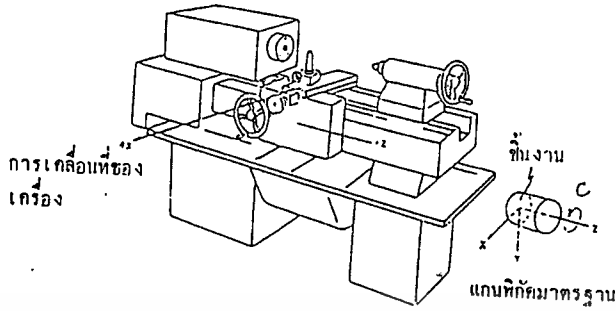
แกนเสริมเป็นแกนที่ช่วยให้การเคลื่อนที่อื่น ๆ นอกเหนือจากแกนพิกัดและแกนหมุน



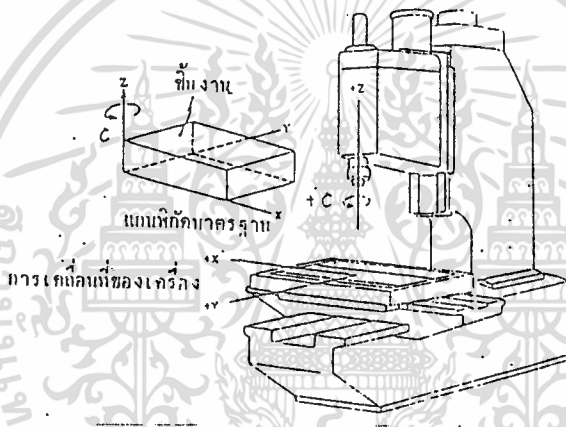
รูปที่ 2.1 ระบบแกนพิกัดตั้งฉาก



รูปที่ 2.2 ระบบแกนพิกัดตั้งฉากมือขวา



รูปที่ 2.3 แกนพิกัดของเครื่องกลึง



รูปที่ 2.4 แกนพิกัดของเครื่องกัด

Wire Cut EDM จะใช้ระบบการควบคุมเชิงตัวเลข โดยคอมพิวเตอร์ระดับต่ำสุด ซึ่งจะต้องโปรแกรมควบคุมทั้งสองแกน คือแกน X และแกน Y โดยในแนวรวมทางซ้ายไปขวา เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานในอยู่ด้านหน้าของแกน Y จะกำหนดการเคลื่อนที่ ในแนวราบจากด้านหน้าไปด้านหลัง แกน Z จะเป็นระยะทางเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งสามารถปรับระยะหัวตัดที่ล้อมเส้นลวดให้สูงขึ้น หรือต่ำลง

เมื่อไม่นานมานี้ บริษัท AGIE USA Ltd.; Addison, IL ได้มีเอกสารเผยแพร่ Wire Cut EDMอายุการใช้งาน 5,000 ชั่วโมง ในรายงานของ AGIE ชี้ให้เห็นว่าขบวนการ EDM จะทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสูงจากขบวนการ EDM ซึ่งส่งผลกระทบต่อชิ้นงาน เศษวัสดุจะถูกนำออกจากชิ้นงานโดยการควบคุมการ Electrical spark ซึ่งเกิดจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของเครื่องจักร และปล่อยความร้อนออกจากเส้นลวดตัวนำสู่ชิ้นงาน ชิ้นงานทำจากวัสดุแข็งและสามารถนำไฟฟ้าได้มี จะไม่มีรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เส้นลวด) และจะไม่มีแรงที่กระทำระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานจะถูกบังคับให้ห่างกันโดยประมาณ โดยการควบคุมของเครื่องจักร ช่องว่างนี้จะมีของเหลวกั้นอยู่เพื่อเป็นฉนวน ของเหลวที่กั้นนี้มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากบริเวณที่เกิดการสปาร์ค และจะช่วยกำจัดเศษวัสดุที่ตัดออกจากผิวชิ้นงาน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร้นำไปใช้

เมื่อความต่างศักย์ DC จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจ่าย มาครั้งแรกจะไม่มีกระแสไฟฟ้า ไหล ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน เพราะเป็น ฉนวนระหว่างผิวชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อ ความเข้มของสนาม ไฟฟ้าทำให้ฉนวนแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ ไปยังประจุตรงข้ามกับตัวมัน จะเกิด กระแสไหลทำให้เกิดความร้อน และแรงดันมหาศาล ในที่สุดส่วนของวัสดุชิ้นงานจะถูกหลอม และทำให้ เป็นไอ ทิ้งไว้เพียง Crater บนผิวชิ้นงานความร้อนกับแรงดันจะหมดไป การศึกษาแสดงให้เห็นว่ามันไม่ ง่ายนัก ที่กระแสไฟฟ้ามาตัดชิ้นงานออกจากกัน จะต้องมีการควบคุมการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าให้เป็น จังหวะ จึงจะ ทำให้ขบวนการ EDM ทำงานได้ผลดี

ช่วงแรกจะเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะเมื่อนานขึ้นความร้อนไม่ สามารถทำให้วัสดุ ระเหยกลายเป็นไอได้ดี ทั้งนี้เพราะสาเหตุจากการเกิด Crater และวัสดุที่หลอมเหลว AGIE ได้อธิบาย ถึงข้อดีของ EDM ว่ามีความแม่นยำสูง มันสามารถตัดได้ละเอียดมาก โดยใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร สามารถตัดวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ทุกชนิดไม่ว่าเครื่องมือเหล็กชุบแข็ง Tungsten carbide วัสดุงานรีดร้อน ภายนอกเป็นเซรามิก CBN (Cubic Boron Nitride) และ PCD (Poly Crystalline Diamond) สามารถใช้ผลิตเครื่องใช้ Punch และ Dies เบ้าหลอมและอะไหล่ที่ต้องการ ความละเอียดสูงทั้งในระบบ 3 มิติ เช่น ทำแบบพิมพ์อัดของเหลว ใบพัด เครื่องจักรไอน้ำ เฟืองภายนอกและเฟืองภายใน และแบบพิมพ์ที่ซับซ้อนได้

EDM ยังสามารถทำงานได้เร็วโดยใช้การกระทำเพียง 2-3 อย่าง แต่ก็มี เครื่องจักรหลาย แบบที่สามารถตัดวัสดุได้เร็วกว่า EDM ซึ่ง EDM จะตัดได้ช้ากว่าการเจาะ เช่น การทำเกลียว และการ ใช้เทคนิคใหม่ ๆ เช่น การใช้ Laser ในการตัดแต่เครื่อง EDM สามารถกำจัดชิ้นตอนต่าง ๆ ได้ โดย การใช้เพียงเครื่องเดียว และทำงานต่อเนื่องกัน

น้ำเป็นฉนวนจะแตกออกเป็นละออง และเป็นฉนวนที่ใช้ในการตัดด้วย EDM มีหลาย ๆ สาเหตุ ที่ต้องใช้น้ำ คือ มันสามารถตัดวัสดุได้รวดเร็ว สามารถทำให้เครื่อง EDM เย็นลงได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งการขาด แรงดันไฟฟ้า ดังนั้น ประกายไฟแคบ ๆ ที่ใช้ตัดวัสดุในระบบ EDM จึงต้องการฉนวนที่มีความหนืดต่ำ เพื่อที่จะสามารถทำการชะล้างได้เพียงพอ (ชะล้างเศษวัสดุเล็ก ๆ ที่เกิดจากการตัด) น้ำที่ แตกออกเป็นละอองจึงมีความจำเป็นสามารถส่งผ่านความร้อนจากบริเวณที่ทำการตัดได้ง่ายกว่าน้ำมัน ซึ่งส่งผลให้ผนังผิวหน้าวัสดุเย็นลง ผู้ใช้เครื่องตัดไฟฟ้า EDM จะต้องใช้เวลาในการตัดกับเครื่องนาน มาก อาจจะเป็นวัน เป็นสัปดาห์ หรือมากกว่านั้น การใช้วิธีลดประจุไฟฟ้าของน้ำ เพื่อป้องกันการไหม้ ที่เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ การทำฉนวนไฟฟ้าโดยใช้การลดประจุไฟฟ้าของน้ำ จะทำการนำน้ำ ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จะทำการโดยการกรองน้ำที่ใช้แล้วผ่านกระดาษกรองที่มีช่องขนาด 5 ไมครอน หรืออาจจะใช้ Filter ซึ่งสามารถกรองสารที่มีขนาดเล็ก ๆ น้ำที่ผ่านกระดาษกรองแล้วจะถูกทำ การปรับพิภคความต้านทาน (Resistivity) โดยผ่านกระบวนการขังประจุ เพื่อลดประจุไฟฟ้าของน้ำ

การป้อนข้อมูลระบบปุ่มเดียว (One touch programming) CNC Wire Cut EDM ได้ทำให้ เกิดการพลิกโฉมหน้าทางอุตสาหกรรมครั้งใหญ่ โดยวิธีการตัดที่รวดเร็ว เที่ยงตรง และสามารถตัด วัสดุที่มีความแข็งให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนได้อย่างดี อย่างไรก็ตามเครื่อง CNC Wire Cut EDM ก็ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ควบคุมซึ่งต้องมีความรู้ความชำนาญทางด้านโปรแกรม คอมพิวเตอร์ ซึ่งป้อนข้อมูล และรหัสโดยใช้ KEYBOARD Wire Cut EDM รุ่น DS-2 ของ

Hansvedt ประกอบด้วย CNC ซึ่งผู้ควบคุมสามารถทำความเข้าใจและใช้งานได้ โดยจอภาพจะเขียนบรรยายด้วยภาษาอังกฤษและระบบ Software ภายในจะแสดงตัวเลือกสำหรับการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ให้ผู้ใช้เลือกใช้งานได้อย่างสะดวก ข้อแตกต่างจะเห็นได้ชัดระหว่าง Wire Cut EDM รุ่น DD-2 กับ CNC รุ่นอื่นคือไม่ใช้ KEYBOARD จะใช้คอมพิวเตอร์ เพียงแต่กดปุ่ม (A single knob) ก็สามารถควบคุมการทำงานได้ ซึ่งแต่ก่อนต้องอาศัยการป้อนโปรแกรมด้วยมือให้เครื่องทำการตัดชิ้นงานส่วนใน ทิศทางแกน x-y ทั้งหมด การควบคุมแบบปุ่มเดียว (One -knob) ของ Hansvedt มี หลักการเคลื่อนที่พื้นฐานอยู่ 5 อย่างคือ การหมุนตามเข็มนาฬิกา การหมุนทวนเข็มนาฬิกา การอยู่กับที่ การกดและหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา การกดและหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา การใช้การเคลื่อนที่ทั้ง 5 แบบนี้ผู้ใช้ เครื่องจะทำการเลื่อนเคอร์เซอร์เพื่อเลือกเอาตัวเลือกในรายการ หรือใช้ตัวอักษร และตัวแสดงหรือชุดของชิ้นงานก็ได้

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 ซึ่งวิธีการหมุนและการกดปุ่มเพื่อเลือกตั้งเลือกบนหน้าจอจะต้องใช้อยู่ตลอดในการทำงานทั้งหมด

การเขียนโปรแกรมในเครื่องรุ่น DS-2 ง่ายมากคำสั่งบนหน้าจอจะบอกให้ทราบว่าจะต้องทำอะไร เช่น ให้ชื่อโปรแกรม เลือกหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตร ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างที่จะตัด แล้วการโปรแกรมโดยใช้เลขบรรทัด (Line Number) ก็จะถูกกำหนดโดย Software ของเครื่องโดยอัตโนมัติ รหัสตัวเลือกของการเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรง ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ทิศทางตามเข็มนาฬิกา การหยุดชั่วคราว (Pause) หรือการเลิกทำงาน (Stop) จะถูกเลือกโดยการกดปุ่มให้เครื่องคอมพิวเตอร์ทำงาน หลังจากที่มีการเลือกการใส่ขนาด ปุ่มสำหรับเลื่อน cursor จะกลายเป็นปุ่มพิมพ์ตัวเลขสำหรับใส่ค่าของจุด Coordinate X-Y ทันทีที่มีการใส่ค่าจุดหนึ่งเสร็จ cursor ก็จะไปยังตำแหน่งถัดไปหน้าจอโดยอัตโนมัติ เมื่อป้อนโปรแกรมเข้าไปแบบที่ถูกตัดก็จะถูกทำการขยับเพื่อปรับขนาดเป็นการปรับมาตราส่วน (Rescale)

ในหน่วยการตั้งค่าต่าง ๆ ปุ่มใส่ค่าของคอมพิวเตอร์ กลายเป็น อุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของแกน X และแกน Y เป็นการลดต่ำและหมุนของปุ่ม การคลายปุ่มจะ สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวโดยการเพิ่มขึ้นทีละ 0.0025 มิลลิเมตร ความเร็วสูงสุดของการหมุนจะเกิดขึ้นค่าปุ่มหมุน หมุนเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของโต๊ะงาน และจะหยุดเมื่อปุ่มถูกปล่อย (ด้วยแรงของสปริง)

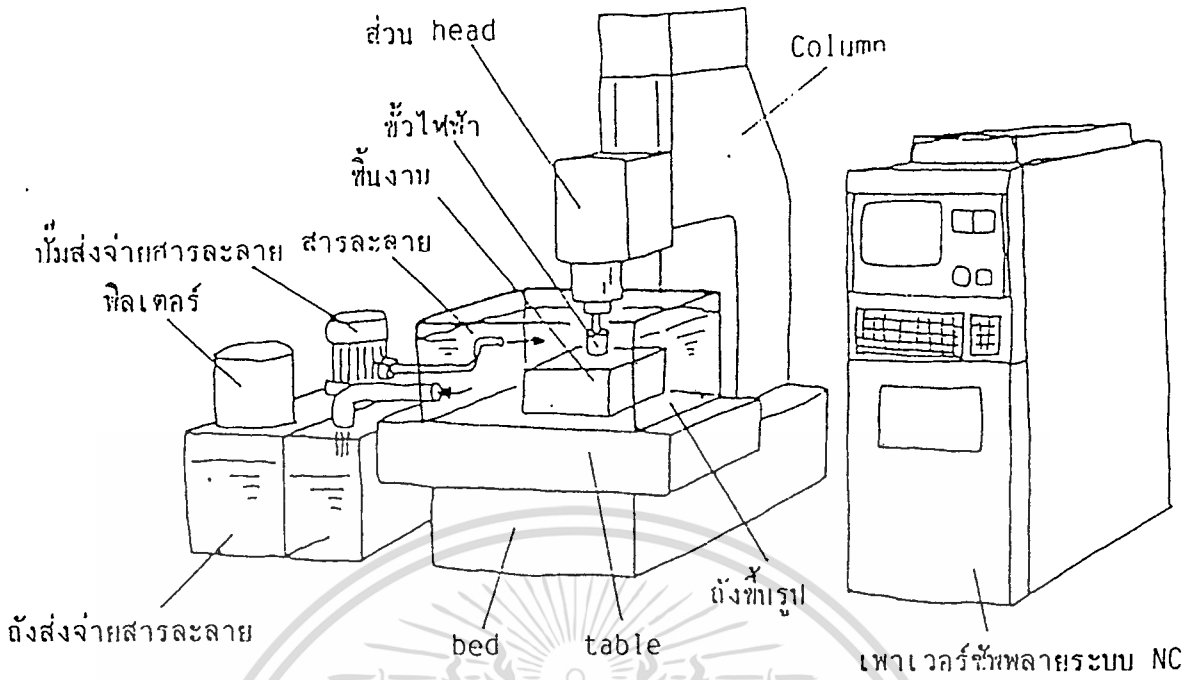
ตัวจ่ายพลังงานจะถูกตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้า หรือปรับโดยปุ่มรับข้อมูลของ คอมพิวเตอร์ เมื่อเครื่องจักรถูกตัด โดยสิ่งนี้จะทำให้สามารถปรับค่าความละเอียดของการตัดสูงสุด ถึงแม้ว่า DS-2 จะแทนที่เครื่องมือ เครื่องจักรในลักษณะเป็น "สิ่งแวดล้อมของคอมพิวเตอร์" ที่แรกการทำงานของ CNC ไม่สามารถบังคับโดยแป้นพิมพ์ได้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

## 2.1 ชนิดของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่อง EDM และเครื่อง Wire Cut EDM แต่ทั้งสองประเภทมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกัน คือ การจัดวางขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานในสารละลาย และให้แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว เพื่อให้เกิดการสปาร์คขึ้น โดยมีจังหวะเกิดและหยุดการสปาร์คสลับกันไป

### 2.1.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM ประเภทนี้เป็น เครื่องที่ใช้ในงานขึ้นรูป ประเภท Die sinking รูปที่ 2.5 โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้กันเป็นหลักจะเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแม่แบบ วิธีขึ้นรูปเช่นนี้รูปทรงของรูปที่ถูกขึ้นรูปแบบชิ้นงานจะมีลักษณะพลิกกลับตรงข้ามกับรูปทรงของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 เครื่อง EDM

ตัวอย่างการขึ้นรูปที่ใช้กันมากคือ การขึ้นรูปแบบแม่พิมพ์สำหรับงานพลาสติก นอกจากนี้แล้ว ถ้าติดตั้งแกนควบคุมการหมุนที่แกนหลัก (แกนตั้ง) ก็ทำให้สามารถใช้ในงานแบ่งมุม หรืองานการขึ้นรูปประเภทตัดเกลียวโดยการควบคุม 2 แกนในเวลาเดียวกันได้ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ ของระบบ CNC ให้ทำงานอย่างเต็มความสามารถในการขึ้นรูปตามเส้นขอบโดยการควบคุมแกน X-Y-Z พร้อมกันนั้นทำให้สามารถที่จะขึ้นรูปที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ด้วย

### 2.1.2 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM มีโครงสร้างประกอบที่คล้ายกับ Mill machine มากคือ บนฐานที่เรียกว่า Bed จะมีองค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แท่น (Table) และเสาตั้ง (Column) ประกอบติดอยู่เสาค้านี้จะทำหน้าที่ประคองส่วนบน (Head) ซึ่งมีหัวไฟฟ้าประกอบติดอยู่ ถ้าฐานดังกล่าวนี้ไม่มั่นคงแน่นอนหนาเพียงพอ ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะขาดความละเอียดไปด้วย ถ้า Head ไม่มั่นคงพอเครื่องก็ไม่สามารถทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

ส่วนที่เป็นส่วนประกอบการเคลื่อนที่ การที่จะทำการขึ้นรูปงานที่มีรูปทรง 3 มิติได้นั้น อย่างน้อยก็จำเป็นที่จะต้องมีส่วนประกอบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ สำหรับเครื่อง EDM นั้นโดยทั่วไปแผ่นซึ่งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ X-Y และมี Head เคลื่อนที่บนเสาค้ำในแนวแกน Z ซึ่งตั้งฉากกับผิวระนาบ X-Y

วิธีการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีหลายอย่าง แต่ในปัจจุบันจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ระบบ CNC ดังนั้นส่วนมากจึงใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า อนึ่งสมรรถนะขององค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งรวมถึงตัวนำ (Guide) ด้วยนั้นจะเป็นปัจจัยในการกำหนดระดับความละเอียดของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงขั้นรูปสำหรับบรรจุสารละลาย ลักษณะจำเพาะอย่างหนึ่งของเครื่อง EDM คือ ใช้สารละลาย(การขึ้นรูปในของเหลว) ที่จะให้ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีความต้านทานของฉนวนสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการขึ้นรูปเพิ่มที่จะเก็บสารละลายนี้ไว้ ถึงขั้นรูปดังกล่าวนี้จะมีหน้าที่ทำหน้าที่ ปรับระดับผิว ของสารละลาย เพื่อที่จะปรับตั้งระดับความสูงของชิ้นงาน

ถึงส่งถ่ายสารละลาย เป็นถึงสำรองเพื่อคอยส่งจ่ายสารละลายไปยังถึงขั้นรูป ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ป้อนส่งจ่าย, ฟิลเตอร์สำหรับกรองเศษผงโลหะ ในกรณีที่จำเป็นอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบบหล่อเย็นสารละลาย เพื่อป้องกันมิให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป บางเครื่องอาจจะมีอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น ATC (อุปกรณ์ระบบเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ) อุปกรณ์แกน C เครื่องมือช่วยเหลือการติดตั้งขั้วไฟฟ้า

### 2.1.3 เครื่อง Wire Cut EDM

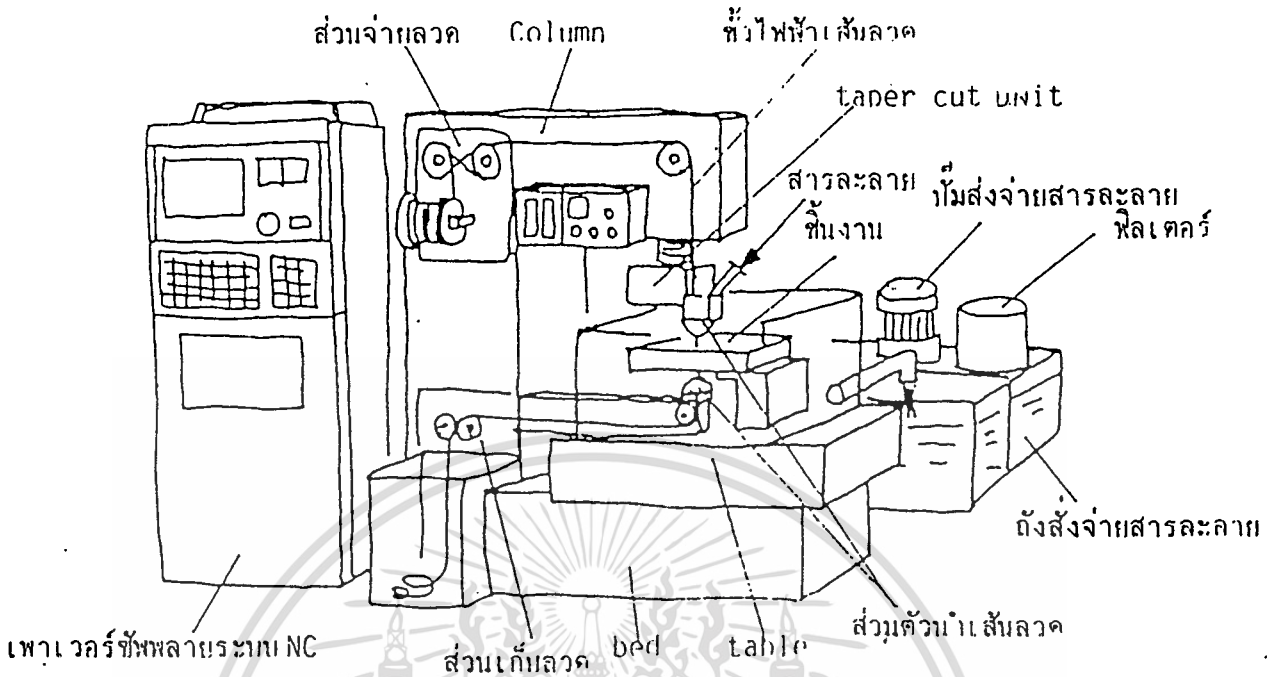
เป็นเครื่อง EDM ประเภทที่ต้องใช้เส้นลวดขนาดเล็กเป็นขั้วไฟฟ้า มีระบบ CNC สำหรับควบคุมตัวชิ้นงานให้เคลื่อนที่ ในลักษณะเช่นเดียวกับการวาดรูป เพื่อตัดเอาส่วนที่เป็นรูปออกไป เครื่องนี้ได้ประยุกต์มาจากเครื่อง EDM ประเภท Diesinking การวาดรูปที่แกน X-Y เคลื่อนที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 2 แกน จึงต้องมีอุปกรณ์ระบบ CNC ไว้สำหรับการควบคุม ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าถ้าไม่มีการพัฒนาอุปกรณ์ระบบ CNC ขึ้นมาเครื่อง Wire Cut EDM ก็ไม่สามารถกำเนิดขึ้นมาได้

เครื่อง Wire Cut EDM ดูรูป 2.6 ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่นการขึ้นรูปพื้นเฟือง นอกจากนี้แล้วการใช้อุปกรณ์ระบบ CNC ควบคุมการเรียงของลวดก็สามารถใช้ในงานขึ้นรูปประเภทเอียง (Taper)หรืองานขึ้นรูปที่มีรูปทรงบนล่างต่างกันได้อีกด้วย ดูรูป 2.6.1

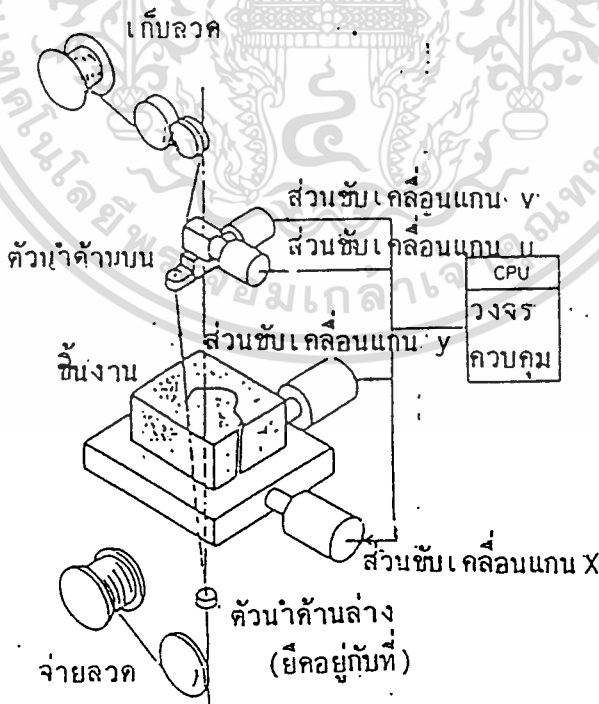
ตัวเส้นลวดเองจะมีการสึกหรอ อันเนื่องมาจากการสปาร์ค ดังนั้นลวดที่ใช้งานไปครั้งหนึ่งแล้วจะถูกทิ้งไปเลย

โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง Wire Cut EDM นั้นเกือบจะเหมือนกันกับเครื่อง EDM ประเภท Diesinking แต่เนื่องจากว่า ใช้ลวดเป็นขั้วไฟฟ้าจึงต้องมี อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมประกอบ ติดอยู่ที่เสาด้วย

- ส่วนที่ป้อนลวด ทำหน้าที่ส่งป้อนลวดออกมาและควบคุมแรงดึงของเส้นลวด
- ส่วนที่ม้วนเก็บลวด ทำหน้าที่ม้วนเก็บรวบรวมลวดที่ใช้งานแล้วและควบคุมความเร็วของเส้นลวด
- ส่วนที่เป็นตัวนำลวด ทำหน้าที่ประคองรักษาเส้นลวดเป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับพัลส์การสปาร์ค การไหลของสารละลาย
- Taber Cut unit อุปกรณ์การเสริมสำหรับการขึ้นรูปประเภทชิ้นงานเอียง (Taper)
- AWT (Automatic Wire Threader) อุปกรณ์การต่อลวดแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.6 เครื่อง Wire Cut EDM

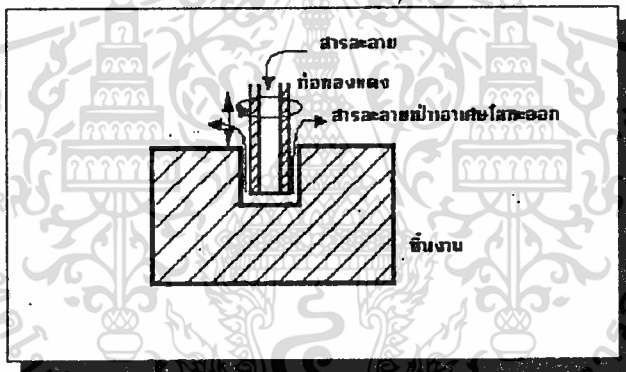


รูปที่ 2.6.1 หลักการตัดชิ้นรูปแบบ Taper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 เครื่องเจาะรู Super Drill EDM

เมื่อไม่กี่ปีมานี้เอง ได้มีการพัฒนาเครื่อง EDM สำหรับเจาะรูขนาดเล็กเรียกว่า Super Drill EDM หลักการทำงาน มีอยู่ว่า เครื่องนี้มีไว้สำหรับเจาะรูขนาดเล็กมี เส้นผ่าน ศูนย์กลางไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เพื่อที่จะเอาไว้อัด Wire Cut และตัดเป็นรูปทรงต่าง ๆ ตามที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้ว เหล็กทำเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็งแล้วหรือ Tungsten Carbide จะใช้ดอกสว่านเจาะรูไม่ได้(เจาะไม่เข้า) จึงต้องอาศัยหลักการสปาร์คของท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 0.8 มิลลิเมตร ท่อทองแดงจะหมุนและค้อย ๆ เลื่อนต่ำลงทีละน้อย และที่ท่อทองแดงกระแสไฟฟ้าเป็นขั้วลบ ชิ้นงานจะเป็นขั้วบวก สารละลายจะถูกฉีดผ่านรูของท่อทองแดง เมื่อท่อทองแดงเกิดการสปาร์ค แล้ว สารละลายจะเป่าเอาเศษโลหะ ที่เกิดการสปาร์คออกจากรูที่ทำการเจาะ ระบบเครื่องทั้งหมดจะถูกควบคุม ด้วยระบบ CNC ที่มีโปรแกรมควบคุมการเจาะ ฉะนั้นเครื่อง Wire Cut EDM สมัยใหม่ทั่วไปจะมีเครื่อง Super Drill EDM ติดตั้งมาด้วย ดูรูป 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่อง Super Drill EDM

## 2.2 ปรากฏการณ์การสปาร์ค

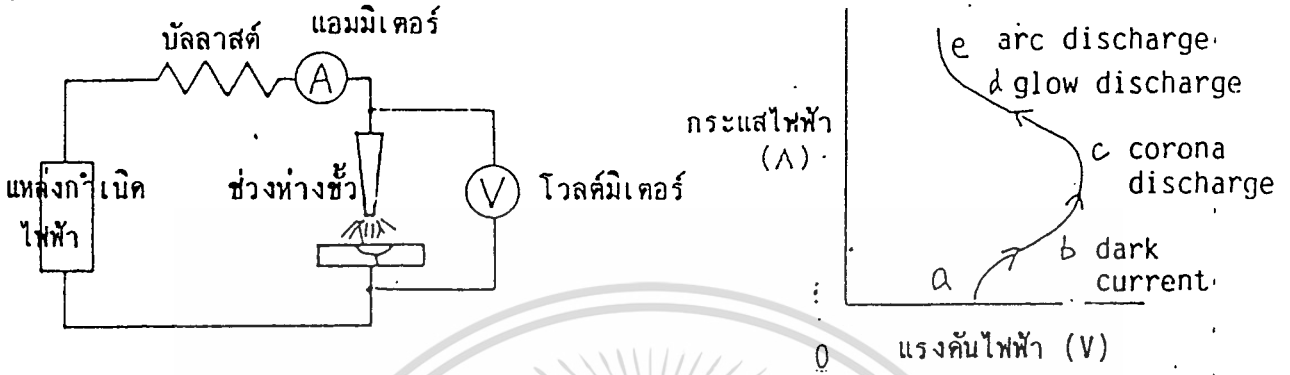
ปรากฏการณ์การสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มี ใส แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซกั้นกลางอยู่จน ทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้า ไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ จึงหมายถึง การผิบบังคับ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุตัว กลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการผิบบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้ เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน

สำหรับปรากฏการณ์การสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั่น คือ "ฟ้าผ่า"นอก จากนั้นแล้ว เวลาที่ถอดเสื้อสเวตเตอร์ในช่วงฤดูหนาว ซึ่งอากาศแห้งนั้นก็มักจะเกิด การสปาร์คที่มี เสียงดังเกิดขึ้นด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้นและ นำมาประยุกต์ใช้งานนั้นได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปรากฏการณ์การสปาร์คในสุญญากาศ และนำหลักการดังกล่าวนี้ มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้นได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วย วิธสปาร์ค (เครื่อง EDM)



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ค

รูป 2.8 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษ แรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์ค ระดับพื้นฐานที่สุดอันหนึ่ง โดยการสร้างวงจรสปาร์คแบบง่าย ๆ ดังในรูป และทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นในอากาศ

ก. สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (E) ดังเช่น ในวงจรรูปนี้ให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าไหลขนาดเล็กมากประมาณ  $10^{-8} - 10^{-11}$  A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกกันว่า สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

ข. การสปาร์คแบบโคโรนา (corona discharge)

และถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า บางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) เราเรียกสภาพเช่นนี้ว่า การสปาร์คแบบโคโรนา (สภาพ C) ซึ่งเป็นสภาพการสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

ค. การสปาร์คแบบโกลว (glow discharge)

บริเวณส่วนที่เกิด การสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามียขนาดใหญ่มากขึ้นอย่างรวดเร็วด้วย สภาพการสปาร์คที่เกิดขึ้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้เรียกกันว่า การสปาร์คแบบโกลว หลอดนีออนต่าง ๆ ที่ใช้ ตกแต่งในยามค่ำคืนก็อาศัยหลักการของการสปาร์คแบบนี้

### ง. การสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์คแบบ โกลวได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่สภาพขั้นตอนสุดท้าย (dying) ซึ่ง หมายถึง การสปาร์คแบบอาร์ค สภาพการสปาร์คเช่นนี้ จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็น สภาพที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมพลังงาน ก่อนที่จะเข้าสู่ สภาพการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปนั้นเป็นสภาพการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่ สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current) จนถึงสภาพของการสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ภายใน ช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะมีช่วงเวลาสั้นมาราว  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  วินาทีและยิ่งไปกว่านั้น ความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าถึง  $10^{14}$ - $10^{19}$  A/cm<sup>2</sup> ดังนั้นเราจึงทราบกันว่า การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะปลดปล่อยพลังงานที่มีระดับสูงมากออกมาภายในช่วงเวลาสั้นมาก

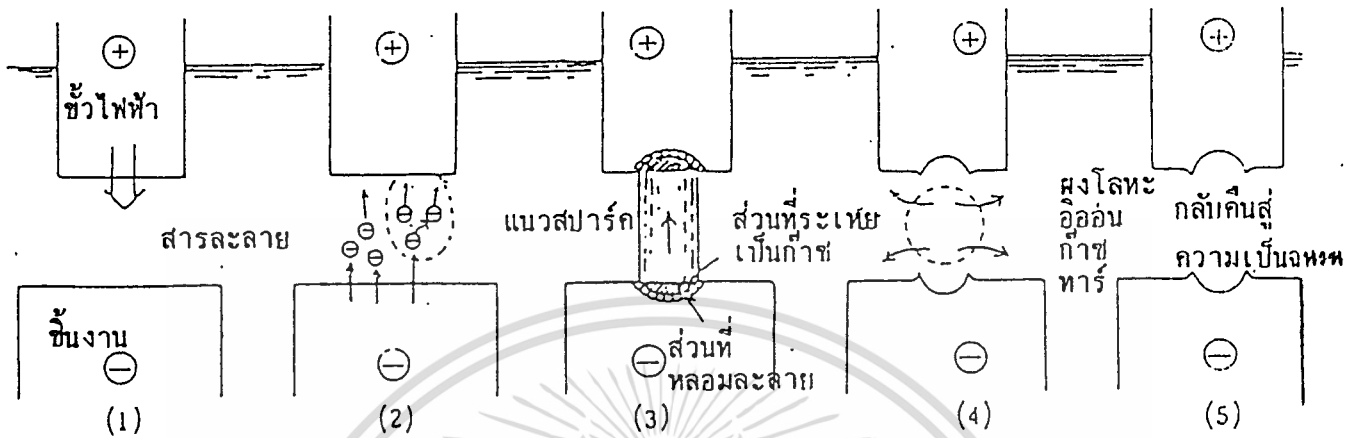
#### 2.2.1 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M.

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการ ประชุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และ เราสามารถที่จะเปรียบเทียบ วิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือน "การสปาร์คในช่องว่างแคบ ๆ ระหว่างขั้ว ไฟฟ้า กับวัตถุที่จะขึ้นรูป" สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำขึ้นในสารละลาย โดยใช้ทองแดง , กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้น จะไม่เกี่ยวกับความแข็ง เพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟ ฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. นั้น จะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหล อย่างต่อเนื่องกัน เหมือน กับการเชื่อมแบบอาร์คแต่ต้องใช่วิธีการเปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะเพื่อป้องกันมิให้ความร้อน จากการสปาร์คหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้ อาศัยการใช้พลังงานระดับสูง ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้น มาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก สำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็น ประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจริงนั้นจะใช้ระบบ NC (numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลาย แส่นครั้งใน 1วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 สภาพของสปาร์กแต่ละครั้ง

ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า(ประมาณ 60-280 V ) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้น โดยปกติจะใช้น้ำมัน เพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง ก็จะสามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องว่างการสปาร์ก) ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้เข้าใกล้เรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (หลาย  $\mu\text{m}$ -หลายสิบล  $\mu\text{m}$ ) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

ค..สปาร์คหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสีย ความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเลคตรอนซึ่งเป็นประจุลบ จะเริ่มไหลเป็นจำนวนมา่กอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือ การสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้า การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มี ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ ในการขึ้นรูปงานจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมี ขนาดตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์จนถึงหลายร้อยแอมแปร์พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมา (3,000 °C ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

#### ง.เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลาย รอบข้างดูดแย่งความร้อนไปก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ

#### จ.กลับสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์ค หนึ่งครั้ง แล้วจบลงแล้ว จะรองจนกว่า สารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกัน การเกิดสปาร์คแบบ ผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ หรือ สปาร์ค เฉพาะเป็นบางจุด อันเนื่องมาจาก การสะสมหรือทับถมจับตัวกัน ของไอออนที่ตกค้าง อยู่ระหว่างขั้วหรือ เศษผงที่เกิดจากสปาร์ค ภายหลังที่กลับคืนสู่ ความเป็นฉนวนแล้ว ก็จะทำให้การสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก ก.

การสปาร์คซ้ำ : คือ การสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณี ที่ สภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจจะมีการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะ ของพัลส์ของการสปาร์ค ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจากว่า การสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏ การที่นอกเหนือการควบคุม จนไม่อาจถือว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

#### ข้อควรคิด :

เวลาที่เกิดการหลอมละลายในช่วง ค.ทั้ง ๆ ที่ชิ้นงานหลอมละลาย แต่ทำไมขั้วไฟฟ้าจึงไม่หลอมละลาย

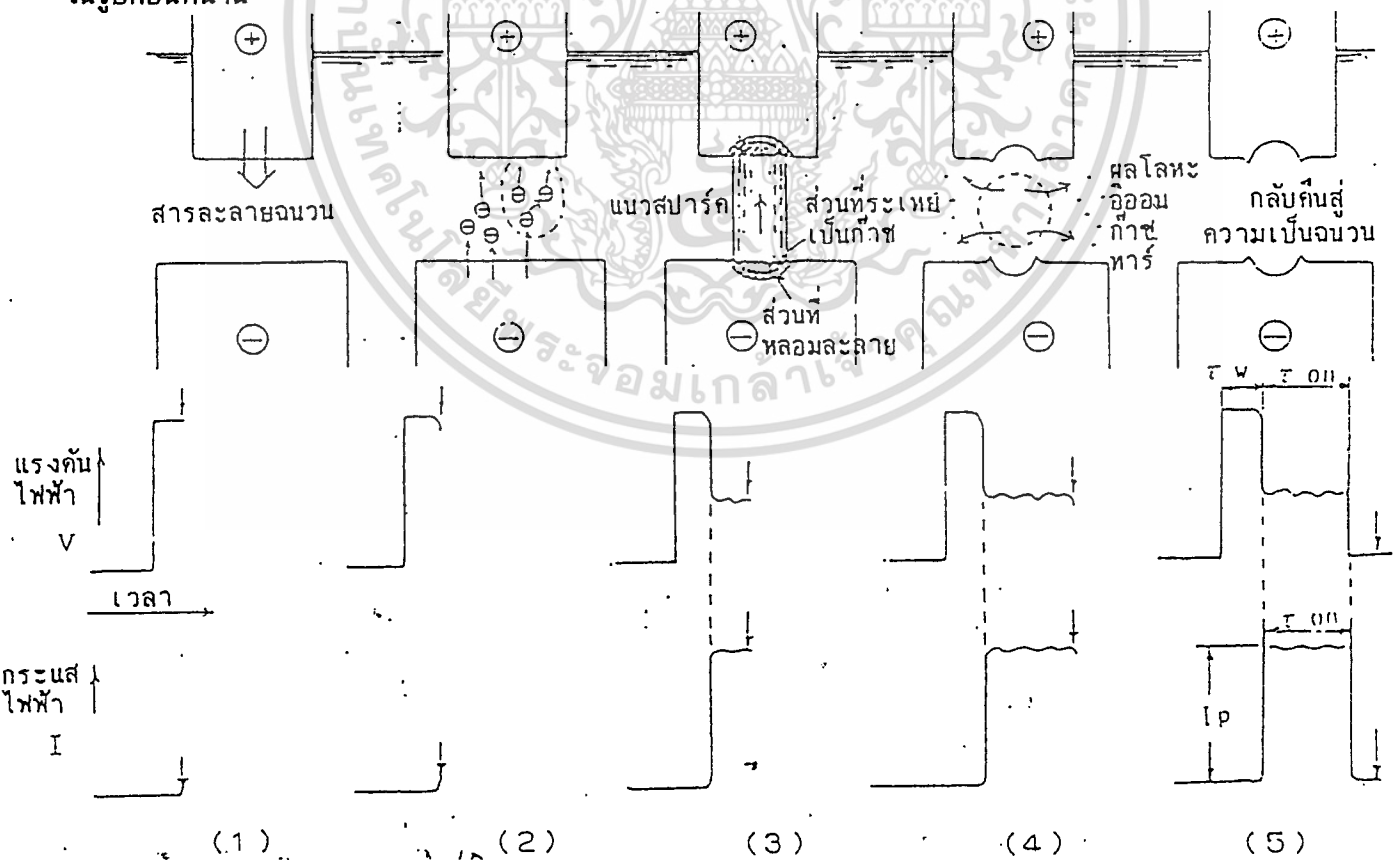
ในฐานะของธาตุเหล็ก (Fe) มีจุดหลอมเหลว 1,539°C ทองแดงมีจุดหลอมเหลว 1,083 °C แต่ในความเป็นจริงแล้ว วัสดุประเภทเหล็กกล้า จะมีคาร์บอนผสมอยู่ จึงทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วน ขั้วไฟฟ้านั้นทำมาจากทองแดงผสมจึงทำให้จุดหลอมเหลวยังต่ำลงไปอีกแต่อย่างไรก็ตามขั้วไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ ทองแดงจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ดังนั้นถ้าลองคิดตามธรรมดาแล้ว เมื่อได้รับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนสูงจากการสปาร์คแล้ว ขั้วไฟฟ้าก็ควรหลอมละลายก่อน ซึ่งหมายถึงว่า การสึกหรอจะรุนแรงกว่า

ถ้าลองสังเกตขั้วไฟฟ้า หลังจากที่ใช้ในงานขึ้นรูปเสร็จสิ้นลงแล้ว จะทราบได้ว่า บริเวณที่เกิดการสปาร์คจะมีเขม่าจับเป็นสีดำเขม่าเหล่านี้เกิดขึ้นโดยคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบอยู่ในสารละลายประเภทน้ำมันถูกความร้อนสูงจนสลายแยกตัวออกมาเกาะติดอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเป็นธาตุที่มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำมาก คือ 0.057 cal/cm.sec การที่คาร์บอนเกาะติดบนผิวของขั้วไฟฟ้าจะทำให้เกิดขวาง การนำความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นจากการสปาร์ค ดังนั้น เราจึงสามารถกล่าวได้ว่า คาร์บอนเหล่านี้จะทำให้หน้าที่คุ้มครองผิวของขั้วไฟฟ้าจากความร้อนสูง สิ่งทีกล่าวมานี้ก็อาจนับได้ว่าเป็นเรื่องที่แปลกมากเกี่ยวกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

### 2.2.2 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ในที่นี้เราจะมาดูกันว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเช่นไร รูปที่ 2.10 ต่อไปนี้จะนำรูปร่างคลื่นของพัลส์ในการสปาร์ค (รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้า)มาประกอบรวมอยู่ในรูปก่อนหน้า



รูปที่ 2.10 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก. ใส่แรงดันไฟฟ้า

ก่อนอื่นจะมีการใส่แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว ซึ่ง แรงดันไฟฟ้านี้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าไร้โหลด (no-load voltage) (ประมาณ 60-80 V) ในสภาพเช่นนี้ ขั้วยังคงรักษาความเป็นฉนวนได้อยู่ จึงไม่มีกระแสไหล

## ข. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงาน (ทำให้ระยะระหว่างขั้วแคบลง) จนถึงระยะหนึ่งจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเริ่มไหล กล่าวคือ เริ่มมีกระแสไหล

## ค. สปาร์ค, หลอมละลาย

เมื่อการสปาร์คเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้ว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง  $E = I \cdot R$  ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกกันว่า แรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (discharge voltage)

## ง. เย็นตัว

ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลในระดับค่า ๆ หนึ่ง แต่ทว่าพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา แรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

## จ. กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

เมื่อการสปาร์คเสร็จสิ้นลง ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จะกลับกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวาดรูปร่างของคลื่นในการสปาร์คได้ดังรูปดังกล่าวนี้

### 3-3-2 พารามิเตอร์ที่สำคัญ

- " เวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$  " = เวลาที่กระแสการสปาร์คไหล

- " เวลาหยุดการสปาร์ค  $\tau_{off}$  " = เวลาตั้งแต่สปาร์คเสร็จจนถึงใส่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอีกครั้งถัดไป

- " ค่ากระแส peak  $I_p$  " = ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า

- เวลาจนถึงเริ่มเกิดการสปาร์ค (เวลาที่มีแรงดันไฟฟ้าไร้ไหลอยู่) เรียกว่า "เวลารอการสปาร์ค" แทนด้วย " $\tau_w$ " ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะระหว่างขั้ว แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานของ ฉนวน สารละลายในตอนนั้น

$I_p$  ,  $\tau_{on}$  ,  $\tau_{off}$  , แรงดันไฟฟ้าไร้ไหล (V) เป็นพารามิเตอร์ ที่ผู้ปฏิบัติงานจะกำหนด ตั้งขึ้นตามแต่สถานะในการขึ้นรูป ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมากในการกำหนดระดับของพลังงานการสปาร์คเมื่อเปรียบเทียบกับในหมู่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ซึ่งมีจำนวนมาก

ขอบเขตของการกำหนดตั้งค่าต่าง ๆ เกี่ยวกับเพาเวอร์ซัพพลาย NC สำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง E.D.M. ที่บริษัทโซดิกส์ไออยู่ ( MARK 10) มีดังต่อไปนี้คือ

$$\tau_{on} = 1-2500 \mu\text{sec (EDM)} , 0.5-5 \mu\text{sec (wire cut)}$$

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

$$I_p = \text{ประมาณ } 0.1-50 \text{ A} , \text{แรงดันไร้ไหล} = \text{ประมาณ } 60-120 \text{ V}$$

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

$$1 \mu\text{sec} = 1/1,000,000 \text{ sec}$$

ต่อไปจะกล่าวถึงเงื่อนไขของการขึ้นรูปที่ใช้ในงานปฏิบัติจริง (โปรดดูรูป 2.11 ประกอบ)

C170 เป็นเงื่อนไขหนึ่ง ในการขึ้นรูปของการขึ้น รูปหยาบ (roughing) C300 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในเงื่อนไขของการขึ้นรูปละเอียด (finishing)เงื่อนไขทั้งสองนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าไร้ไหลเท่ากัน แต่การขึ้นรูปหยาบจะใช้ ที่ยาว 350  $\mu\text{sec}$  ในขณะที่การขึ้นรูปละเอียด ใช้เพียง 12  $\mu\text{sec}$  ซึ่งสั้นกว่า ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกระแสในการขึ้นรูปหยาบคือ 14 A และสำหรับการขึ้นรูปละเอียด คือ 1 A

พลังงานการสปาร์คที่ช่วยในการขึ้นรูปนั้น มีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดกระแส  $I_p$  กับเวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$  จากตัวอย่างที่ยกมานี้ พลังงานของการขึ้นรูปละเอียด จะมีค่าเพียง 1/400 ของการขึ้นรูปหยาบ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสในการขึ้นรูป  $I_p$  และเวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$ จะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

เวลาหยุดการสปาร์ค  $\tau_{off}$  จะเป็นเวลาสำหรับรอให้สารละลายกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน ซึ่งถ้าเวลานี้สั้นเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าไร้ไหลสำหรับการสปาร์คครั้งถัดไปถูกอัดเข้ามา ในขณะที่ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังไม่คืนสู่สภาพเดิม ซึ่ง หมายความว่า ได้เริ่มการสปาร์คต่อเนื่องไป โดยไม่มีเวลารอคการสปาร์ค  $\tau_w$  การสปาร์ค เช่นนี้ เรียกกันว่า การสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการขึ้นรูป

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดตั้ง  $\tau_{on}$  ให้ยาวจนเกินไป จำนวนของพัลส์ การสปาร์คต่อรอบเวลาจะลดลง ซึ่งก็คือ พลังงานการสปาร์คจะน้อยลง ทำให้ปริมาณที่ถูกตัดออกไปในการขึ้นรูป หรือความเร็ว การขึ้นรูปลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปต่ำลงด้วย ดังนั้น จึงมีความเป็นที่จะต้องกำหนด ช่วงเวลาดังกล่าวนี้ให้เหมาะสมพอดี

ค่ากระแสในการขึ้นรูป  $I_p$  และเวลาการสปาร์ค  $\tau_{on}$  เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค ส่วน  $\tau_{on}$  นี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการ "ควบคุม" พลังงานการสปาร์ค

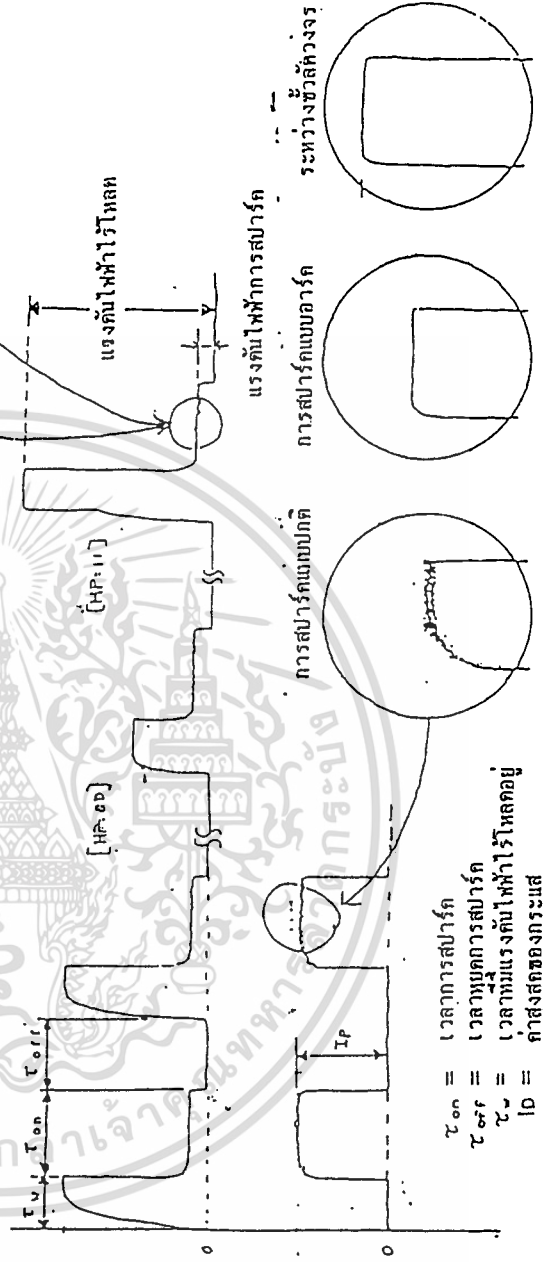
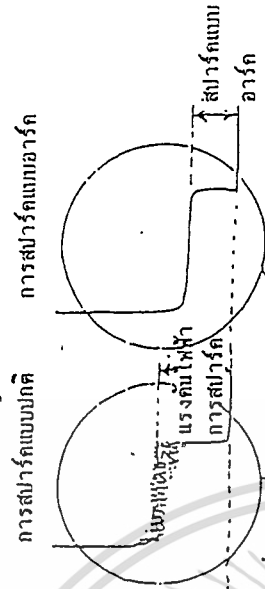
ในบางกรณี ถึงแม้ว่าสภาพการสปาร์ค ในการขึ้นรูปภายใต้ เงื่อนไขหนึ่งจะดำเนินผ่าน มาด้วยดีก็ตาม ถ้าหากว่า การขึ้นรูปได้ถูกดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่ไม่สามารถขจัดเศษผงที่เกิดจาก การสปาร์ค หรือสิ่งเจือปนอื่น ซึ่งสลายตัวแยกออกมาจากสารละลาย โดยความร้อนออกจากระหว่าง ขั้วได้หมด ซึ่งทำให้เกิดการสปาร์คซ้ำ อันเป็นการลดประสิทธิภาพ การขึ้นรูปให้ต่ำลง หรืออาจจะ เปลี่ยนสภาพการสปาร์คไปเป็นแบบอาร์ค ซึ่งทำให้การขึ้นรูป ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ในกรณีเช่น นี้ จะต้องยืดเวลา  $\tau_{on}$  ให้ยาวขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้มีเวลาพอ ที่ระหว่างขั้วจะกลับคืนสู่สภาพปกติ

การคอยสังเกตรูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว จะทำให้สามารถทราบถึง สภาพดังกล่าว ได้ และหัวข้อปัญหาที่สำคัญ สำหรับเครื่อง E.D.M. ในปัจจุบันนี้คือ การควบคุมการขึ้นรูปให้มีเสถียร ภาพโดยการใช้อุปกรณ์ระบบ NC เพื่อควบคุมพัลส์การสปาร์ค ดังนั้น บริษัทที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ จึงกำลัง พยายามเต็มที่ในการพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ขึ้นมา

ตัวอย่างเงื่อนไขการชดเชยรูปในงามจริง

เงื่อนไขการชดเชยรูป	$\tau_{on}$	$I_D$	V	HP	HA	เวลาการสปาร์ก	เวลาหยุดการสปาร์ก	แรงดันไฟฟ้า	กระแส	
C170	19	10	1	11	1	350 $\mu$ sec	80 $\mu$ sec	90V	75V	14A
C300	5	4	1	52	3	12 $\mu$ sec	24 $\mu$ sec	90V	65V	1A

C17C เป็นเงื่อนไขชดเชยรูปในงามและเป็นเงื่อนไขชดเชยรูปในงาม  
 C300 เป็นเงื่อนไขชดเชยรูปในงามและเป็นเงื่อนไขชดเชยรูปในงาม



รูปที่ 2.11 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3. วงจรสปาร์ค

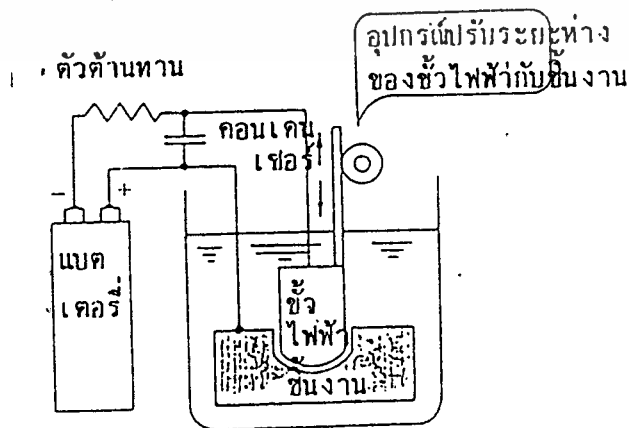
สำหรับงานวิจัยทางกายภาพ เกี่ยวกับ ปรากฏการณ์การสปาร์ค นั้น ได้มีผลงานหลายอย่างที่ ถูกประกาศแนะนำออกมา ตั้งแต่สมัยนานมาแล้ว โดยนักวิจัยจำนวนมากเช่น J.J.Thomson, Townsend, L.H.Paschen ฯลฯ แต่อย่างไร ก็ตามทฤษฎี ที่แน่ชัดก็ยังไม่ได้ถูกตั้งขึ้นมา แม้ แต่จนถึงปัจจุบันนี้ สาเหตุที่การหาทฤษฎี เพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์การสปาร์คให้ถูกต้องแน่ชัด ยัง เป็นปัญหาที่ยากอยู่นั้น เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้มี องค์ประกอบที่ไม่แน่ชัดมากเกินไปนั่นเอง (ปรากฏการณ์สปาร์ค ยังคงเป็นสิ่งที่เราไม่สามารถเข้าใจได้อย่างแจ่มชัด แม้ในปัจจุบัน ดังนั้น การสร้าง เรื่อง E.D.M. ซึ่งประยุกต์ ใช้ปรากฏการณ์ที่ไม่ค่อยเข้าใจนี้ จึงเป็นงานที่ยากมาก)

อุปกรณ์ที่เป็นต้นแบบของเครื่อง E.D.M. ในปัจจุบัน ได้มาจากการวิจัยของ ลาสซาเรโนโก้ (Lazarenko) ชาวรัสเซีย ในปี 1943

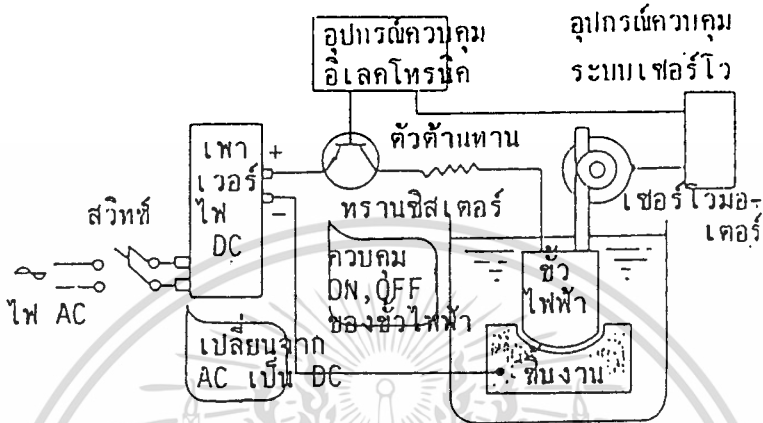
วงจรลาสซาเรโนโก้นั้น ใช้ตัวต้านทาน (R) และคอนเดนเซอร์ (C) มาประกอบรวมกันเพื่อควบคุม ON/OFF ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีชื่อเรียกกันว่า วงจร RC (หรือ วงจรลาสซาเรโนโก้) วงจรนี้ใช้ทองแดงเป็น ขั้วไฟฟ้า และใช้ในการขึ้นรูปวัสดุประเภทเหล็กกล้า

ในสมัยการขึ้นรูปด้วยวงจรมีได้ถูกตั้งความหวังไว้ว่าจะเป็นวิธีการที่ดีเลิศสำหรับการขึ้นรูปโลหะ ประเภทแข็ง แต่วิธีนี้ยังมีจุดบกพร่องหลายจุดจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแขนงพิเศษบางส่วนเท่านั้น โดย ที่ไม่สามารถนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมได้

จุดบกพร่องของวิธีนี้ได้แก่ เราไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขของสปาร์ค (พลังงาน) โดยอิสระได้ และความเร็วในการขึ้นรูปก็ช้ามาก รวมทั้งการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเป็นไปอย่างรุนแรง ดังนั้น วิธีนี้จึงไม่ สามารถที่จะขึ้นรูปโลหะด้วยความละเอียดที่ดีโดยอิสระได้ในสมัยนั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.12 การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คของลาสซาเรโนโก้ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



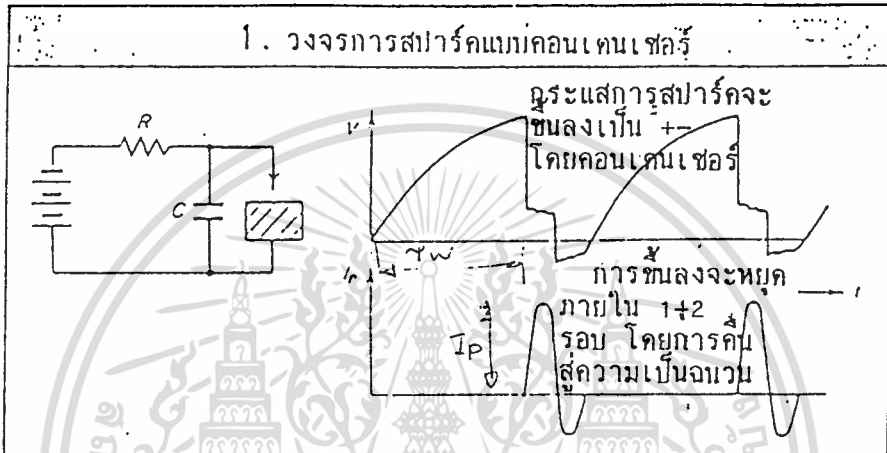
รูปที่ 2.13 วงจรของเพาเวอร์ซัพพลายระบบทรานซิสเตอร์

วงจรลาซาเรโนก็ ประกอบด้วยคอนเดนเซอร์และตัวต้านทาน และเป็นวงจรที่ทำให้เกิดการสปาร์ค ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในคอนเดนเซอร์ เพียงชั่วระยะหนึ่ง เมื่อระหว่างขั้วได้ระยะที่จะทำให้เกิด สนามไฟฟ้าขนาดที่เหมาะสมระดับหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของ คอนเดนเซอร์ด้วยนั้น การสปาร์คก็จะเริ่มขึ้น โดยที่ประจุไฟฟ้าที่สะสม อยู่ในคอนเดนเซอร์จะถูกปลดปล่อยออกมา และเกิดปรากฏการสปาร์คขึ้นที่ระหว่างขั้ว เมื่อการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าจบสิ้นลง แบตเตอรี่ก็จะทำหน้าที่ชาร์ตประจุไฟฟ้าเข้าไปในคอนเดนเซอร์อีกครั้งหนึ่ง

ความเร็วในการชาร์ตประจุเข้าสู่คอนเดนเซอร์นี้ จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน (R) และค่าความจุของคอนเดนเซอร์ (C) เนื่องจากว่าการเลือกค่าทั้งสองนี้ ซึ่งจะนำมาใช้งานในวงจรนี้ได้ นั้น มีขอบเขตจำกัด จึงมีจุดบกพร่องที่ว่าไม่สามารถควบคุมพลังงานอย่างอิสระได้

คราวนี้เราจะลองมาพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วในการขึ้นรูป ความเร็วในการขึ้นรูปนี้จะมีอิทธิพลสำคัญมากในการคำนึงถึงประสิทธิภาพการผลิต และการลดต้นทุนการผลิต ความเร็วในการขึ้นรูปหมายถึง ปริมาณที่สามารถขจัดออกไปได้ (ปริมาณการขึ้นรูป) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในกรณีของการขึ้นรูปประเภทตัดได้นั้น ถ้าทำให้ปริมาณการตัดลดลงในชิ้นงาน ปริมาณการป้อนส่ง ของมีดตัดมากขึ้น ความเร็วในการขึ้นรูปก็จะสูงขึ้นด้วย ส่วนในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธี การสปาร์คนั้น ถ้าพลังงานการสปาร์ค ที่ระหว่างขั้วมีระดับสูงขึ้น ปริมาณของโลหะที่จะหลอมละลายก็ควรที่จะมากขึ้น ซึ่งหมายความว่า ความเร็วในการขึ้นรูปก็ควรที่จะสูงขึ้นไปด้วยแต่ในความเป็นจริงแล้ว จะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่านี้เล็กน้อยที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 คุณสมบัติพิเศษการสปาร์กของวงจรสปาร์กแบบคอนเดนเซอร์ (วงจรลาซาเรนโก้)

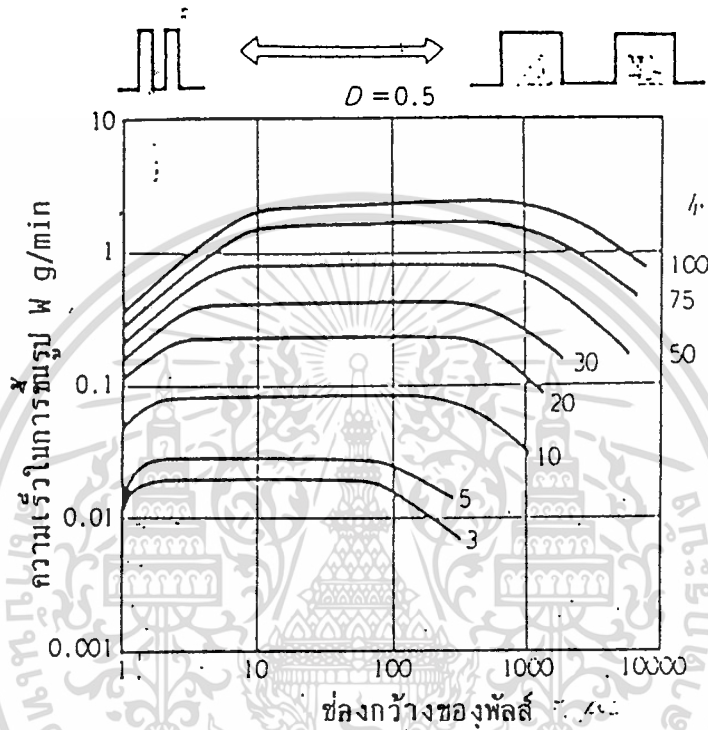
พลังงานการสปาร์ก จะเท่ากับผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูป  $I_p$  กับเวลาการสปาร์ก  $T_{on}$  ถ้าทำให้  $I_p$  มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ  $T_{on}$  ยาวขึ้น พลังงานดังกล่าวนี้ก็จะมียกระดับสูงขึ้น

แต่ทว่าในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันว่า ส่วนที่เริ่มต้นของพัลส์การสปาร์ก (กระแสไฟฟ้าเริ่มไหล) จะ มีผลเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูป เราสามารถอธิบายสิ่งนี้ได้ว่า ถ้ากระแสไฟฟ้าเริ่มไหลอย่างรวดเร็ว แรง กระแทก (แรงดันการสปาร์ก) โดยการสปาร์กก็จะมากขึ้น ปริมาณโลหะที่หลอมละลายก็จะมากขึ้น และ ยังสามารถจัดเศษการขึ้นรูปให้กระจายออกไปอย่างเพียงพออีกด้วย

ถึงแม้ว่าการกำหนดตั้งให้เวลาการสปาร์ก  $T_{on}$  ยาวขึ้นก็ตาม แรงกระแทกโดยการสปาร์กจะ ไม่มากขึ้น ปริมาณโลหะที่หลอมละลาย ในการสปาร์กแต่ละลูกคลื่นก็ไม่มากขึ้น และถ้า  $T_{on}$  ยาวจน เกินไป อาจจะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปลดต่ำลงอีกด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าต้องการทำให้ความเร็วในการขึ้นรูปสูงขึ้น เรามีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าในการ ขึ้นรูป  $I_p$  ให้ใหญ่ขึ้น และควบคุมบังคับให้เวลาการสปาร์ก  $T_{on}$  จบลงในช่วงเวลาที่เหมาะสม

แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีปัญหาเหลืออยู่ ดังที่สามารถเข้าใจได้ในรูป 2.15 การทำให้กระแสไฟ ฟ้าในการขึ้นรูป  $I_p$  มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้มีเวลาในการเริ่มไหล (STARTING TIME) ของกระแส ไฟฟ้ายาวขึ้นไปด้วย การที่กระแสไฟฟ้า ในการขึ้นรูปเพียงแต่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ นั้น จะไม่มีผลค้ำ ำทำให้แรงกระแทกโดยการสปาร์กใหญ่ขึ้นด้วยเลย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมคือใช้วงจรการสปาร์คที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่เริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้ ถ้าพิจารณาจากคุณสมบัติพิเศษของคอนเดนเซอร์แล้วเราไม่สามารถหวังได้ว่า วงจร RC จะสามารถทำให้กระแสไฟฟ้าการสปาร์คเริ่มไหลขึ้นอย่างรวดเร็วได้



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องกว้างของพัลส์กับความเร็วในการขึ้นรูป

นอกจากนั้นแล้ว ถ้าเป็นวงจร RC คอนเดนเซอร์จะใช้เวลามากในการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าที่สะสมไว้ออกมา ถ้าสังเกตด้วยตาของมนุษย์ธรรมดาจะเห็นว่าใช้เวลาสั้น ๆ เพียงชั่วพริบตาเดียวแต่ถ้าจะสังเกตและวัดด้วยหน่วยเวลาระดับไมโครแล้วจะทราบว่า การปล่อยประจุไฟฟ้าออกมาของคอนเดนเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษที่ใช้เวลายาวในเชิงเปรียบเทียบถ้าจะเร่งให้ความเร็วในการขึ้นรูปเร็วขึ้นโดยการเริ่มชาร์ตประจุไฟฟ้าครั้งถัดไปทันที หลังจากที่มีการสปาร์คครั้งก่อนเพิ่งจบลงจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า การสปาร์คครั้งถัดไปขึ้นระหว่างขั้วโดยที่การคืนสู่ความเป็นฉนวนยังไม่เพียงพอ ผลที่เกิดขึ้นก็คือ  $\tau_{on}$  จะหายไป และการสปาร์คจะกลายเป็นแบบอาร์ค ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของระหว่างขั้วสูงขึ้น เกินไปจนผิวการขึ้นรูปหยาบเกินไป

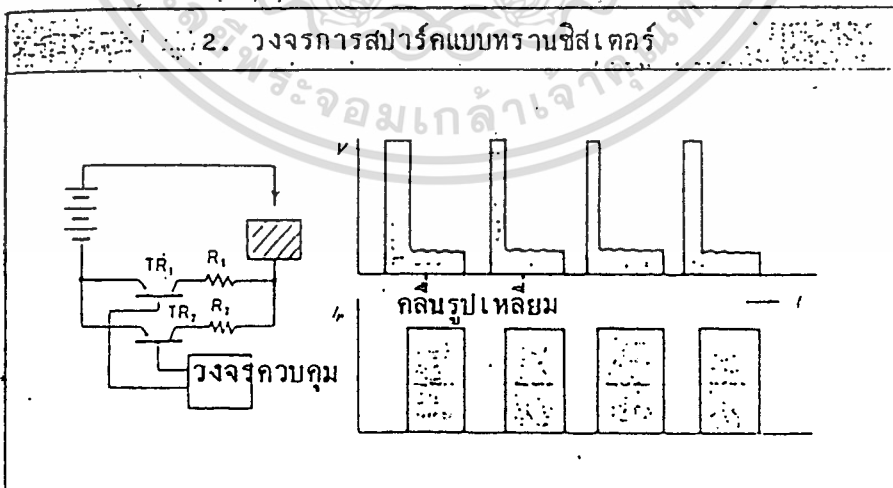
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าพิจารณาถึง วงจรที่มีเฉพาะ RC เท่านั้น จะเห็นว่าวงจรดังกล่าวนี้ขาด องค์ประกอบ ซึ่งจะทำให้หน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อคอยตัดกระแสไฟฟ้าการสปาร์ค ในช่วงระหว่างส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายไฟของการสปาร์คถึงระหว่างขั้ว ซึ่งหมายความว่า เมื่อประจุไฟฟ้าจากคอนเดนเซอร์ เริ่มถูกปลดปล่อยออกมาแล้ว จะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นอยู่ที่ประจุไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกจนหมด ในกรณีเช่นนี้ ถึงแม้ว่า เราต้องการที่จะหยุดกลางคันระหว่างการสปาร์ค ก็ทำไม่ได้

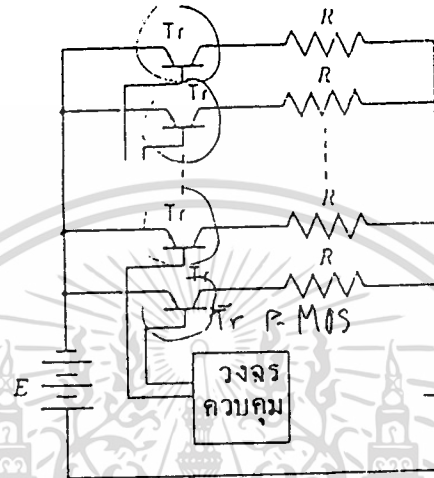
ดังนั้นเราสามารถที่จะกล่าวได้ว่า คุณสมบัติพิเศษ ของการสปาร์คของวงจร RC จะถูกกำหนดตายตัวลงไป ตามองค์ประกอบต่าง ๆ คือ คอนเดนเซอร์ , ตัวต้านทาน , คุณสมบัติพิเศษของฉนวนระหว่างขั้ว ซึ่งหมายความว่า เราไม่สามารถที่จะควบคุมปรับเวลาของ  $\tau_{on}, \tau_{off}$  ตามต้องการได้

### ยุคสมัยของทรานซิสเตอร์

วิวัฒนาการของวงจรการสปาร์คนั้น เป็นประวัติศาสตร์ของการคิดค้นหาวิธีที่จะควบคุมพลังงานของการสปาร์ค ถ้าเป็นวงจร RC แล้ว เราไม่สามารถที่จะควบคุมกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า จังหวะ (timing) ของพัลส์การสปาร์คตามต้องการ ดังนั้นจึงได้เคยมีการทดลองใช้หลอดสูญญากาศทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในวงจรการสปาร์คมาแล้ว แต่ไม่สามารถที่จะพัฒนาขึ้นมาจนใช้งานจริงได้ เราสามารถที่จะกล่าวได้ว่าวิวัฒนาการของเครื่อง E.D.M. นั้น มีความสัมพันธ์กับการคิดค้นทรานซิสเตอร์ขึ้นมาได้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องไฟฟ้า



รูปที่ 2.16 วงจรการสปาร์คแบบทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.17 วงจรทรานซิสเตอร์ต่อแบบขนาน

วงจรการสับรีดแบบทรานซิสเตอร์ จะมีโครงสร้างดังรูป 2.16 ถ้าใช้สวิทซ์ในการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากเพาเวอร์ซัพพลายกระแสตรง (แหล่งจ่ายไฟการสับรีด) เกิดการ ON ในช่วงที่สั้น ๆ จะทำให้เกิดการสับรีดขึ้นที่ระหว่างขั้ว และใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวเปิดปิด (switching) ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ดังกล่าวนี้ ยิ่งไปกว่านั้นจังหวะในการส่งจ่ายไปยังระหว่างขั้วจะขึ้นโดยตรงกับคุณสมบัติการเปิดปิด (สวิทซ์แบบไร้จุดสัมผัส) ของทรานซิสเตอร์ วงจรนี้จึงสามารถที่จะทำการเปิดปิดสลับกันไปอย่างรวดเร็วมากและถ้าสวิทซ์อยู่ในสภาพ OFF จะไม่มีแรงดันไฟฟ้าการสับรีดอยู่ที่ระหว่างขั้ว จึงทำให้วงจรสามารถควบคุม การตัดต่อกระแสไฟฟ้การสับรีดได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีของบริษัทโซติกส์นั้น ตามสเปคของเครื่องมาตรฐานแล้ว ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้การขึ้นรูปโดยเฉลี่ยคือ 40A (MARK 20) ในความจริงแล้วทรานซิสเตอร์ 1 ตัวจะรับภาระโหลดมากเกินไปถ้ามีกระแสไฟฟ้โดยเฉลี่ย 40A โหลดผ่าน ดังนั้นจึงมีการต่อทรานซิสเตอร์หลายตัวในแบบขนาน ดังรูป 2.17 เพื่อที่จะแบ่งกระจายภาระโหลด ตามค่าของกระแสไฟฟ้การขึ้นรูปของแต่ละช่วง

ดังนั้น ถ้าใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดของทรานซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ก็จะทำให้วงจรการสับรีดทำงานได้อย่างคล่องตัวและขอบเขตกว้างขวางโดยเฉพาะการควบคุมเวลา นอกจากนี้แล้วถ้า นำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูปซึ่งเป็นองค์ประกอบอีกอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่อง E.D.M. สมบูรณ์ขึ้น ก็จะทำให้สามารถป้อนแกนพิกัดให้เหมาะสมกับสถานะของระหว่างขั้วได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีเหล่านี้ บริษัท โซดิกสในสมัยนั้น (ปี 1960 กว่า) ได้เป็นผู้คิดค้น และได้นำมาประยุกต์สร้างเป็นเครื่องจริงขึ้นมาเป็นครั้งแรกของโลกซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้ได้กลายเป็นต้นแบบของเครื่อง E.D.M. ระบบ NC ในปัจจุบัน สำหรับลักษณะเฉพาะตัวทางเทคนิคนั้น สามารถที่จะสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก. วงจรการสปาร์คและแกนพิกัดในการขึ้นรูป ถูกควบคุมด้วยระบบ NC ในปัจจุบัน เครื่อง E.D.M. ที่ผลิตขึ้นมา นั้น โดยส่วนมากจะใช้ระบบ NC โดยเฉพาะเครื่อง Wire Cut E.D.M. นั้นเป็นเครื่องจักรที่เกิดขึ้นมาได้โดยใช้ระบบ NC ตั้งแต่แรก

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

ค. วงจรการสปาร์คใช้เฟาเวอร์ FET (P-MOS) ในการควบคุมพัลส์การสปาร์คได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ m-sec

เฟาเวอร์ FET มีคุณสมบัติพิเศษการเปิดปิด ซึ่งมีการตอบสนอง (responsibility) ที่ไวกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซิงเกิล เฟาเวอร์ ทรานซิสเตอร์แบบธรรมดาถึงประมาณ 10 เท่า จึงถูกใช้เป็นหัวใจสำคัญของวงจรการสปาร์ค ในปัจจุบัน นอกจากนั้น แล้วในแต่ละปีได้มีการพัฒนาให้ความเร็วในการเปิดปิดเร็วขึ้น สามารถผ่านกระแสที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ในปัจจุบันแต่ละบริษัทที่เกี่ยวข้องได้มีการแข่งขันกันอย่างกว้างขวางในด้านการพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อให้สามารถที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์ค (พลังงาน) ให้เร็วขึ้น ละเอียดขึ้น และถูกต้องขึ้น

หมายเหตุ : FET = Field Effect Transistor

MOS = Metal Oxide Semi-conductor

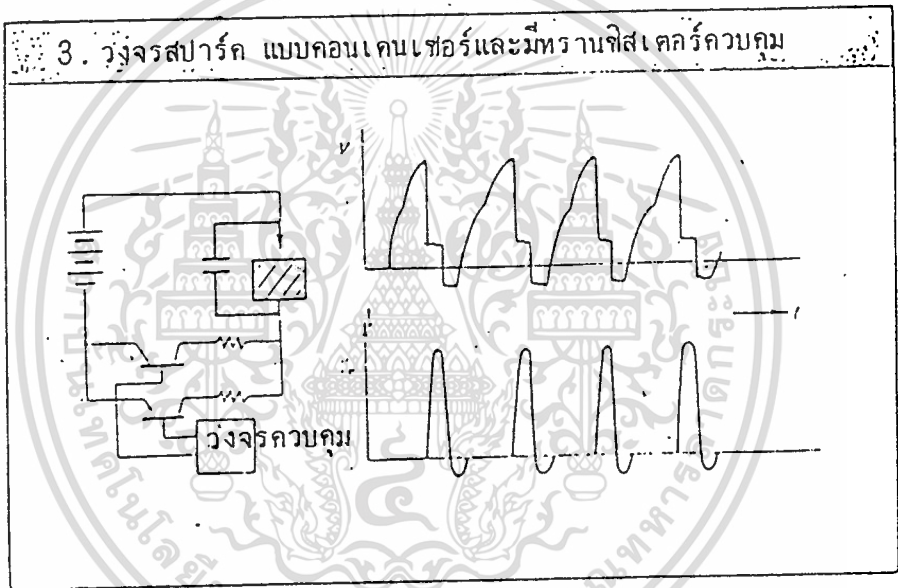
ในปี 1960 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการทดลองเร่งความเร็วในการเปิดปิดอย่างต่อเนื่องของการสปาร์คโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการขึ้นรูปให้มีระดับสูงขึ้นกว่าเดิมมาก ในสมัยนั้น ฟุรุกาว่า (ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานบริษัทโซดิกส) ได้เป็นแกนกลางของกลุ่มผู้ทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองครั้งนั้นได้ผลที่ไม่คาดหมายมาก่อนคือขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการสึกหรอโดยการขึ้นรูป และตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ก็เป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนว่าการขึ้นรูปหายา ด้วยวิธีสปาร์คนั้น สามารถกระทำในเงื่อนไขแบบไม่สึกหรอได้

วงจรคอนเดนเซอร์ควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์

วงจร RC นั้น มีจุดพร้อม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ทว่า การสอดใส่คอนเดนเซอร์ที่มีขนาดความจุเข้าที่ระหว่างขั้วของวงจรทรานซิสเตอร์ ก็จะทำให้สามารถเพิ่มขนาดของค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า

$I_p$  ขึ้นได้ (ในการใช้งานจริงนั้น วงจรสามารถที่จะ ON/OFF เฉพาะส่วนของคอนเดนเซอร์ได้ด้วยสวิตช์ หรือคำสั่งจากระบบ NC)

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



รูปที่ 2.18 วงจรสปาร์ค แบบคอนเดนเซอร์และมีทรานซิสเตอร์ควบคุม

### 2.2.4 เครื่อง E.D.M. ในปัจจุบัน

ถึงแม้ว่าเราจะสามารถ ทำให้การสปาร์คอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นได้หลายลูกคลื่นแต่จบลงเพียงแค่นั้น ก็ไม่มีความหมายในการใช้งานอย่างไรก็ตามเรามีความจำเป็นจะต้องควบคุมให้สภาพการสปาร์คสมบูรณ์อยู่ได้ตลอดเวลาอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับหัวข้อนี้ก็คือ เราจะมียุทธวิธีเช่นใดที่จะสามารถควบคุมการสปาร์คซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เร็วมากได้ นอกจากนั้นการควบคุมเครื่อง E.D.M. ซึ่งเป็นเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปจะสามารถทำได้อย่างไร

### องค์ประกอบของการควบคุม

การควบคุมเครื่อง E.D.M. นั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ

1. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค (การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)

2. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

การควบคุมทั้ง 2 อย่างนี้ จะต้องถูกดำเนินการอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งถ้าขาดอย่างใดอย่างหนึ่งก็จะทำให้การขึ้นรูปดำเนินไปด้วยดีไม่ได้

การควบคุมการพัลส์การสปาร์ค  
(การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)



การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป  
(การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

ก. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค (การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)

การที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์คนั้น ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องรู้สึกสภาวะระหว่างขั้วเสียก่อน หนึ่งสิ่งทีระบบ NC จะสามารถตรวจจับได้จริงโดยตรงนั้นคือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว และถ้าเราติดตามคอยบันทึกแรงดันไฟฟ้านี้ของแต่ละช่วงเวลา เราก็จะได้รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (บันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสถานะของฟังก์ชันของเวลา) การติดตามจับดูรูปร่างคลื่นดังกล่าวนี้ จะ

ทำให้เราสามารถรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วได้  $\tau_{on}$  ,  $\tau_{off}$  ในความจริงนั้น เราก็สามารถที่จะตรวจวัดได้จากรูปร่างคลื่นนี้

ยกตัวอย่างเช่น ระดับความเสถียร (stability) ของการสปาร์คนั้น เราสามารถคำนวณหาได้โดยอินทิเกรท รูปร่างของคลื่นแรงดันไฟฟ้าในสถานะของฟังก์ชันของเวลา เพื่อดำเนินการค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค (การกระจายของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์คที่ดูในเชิงเวลา) ค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค จะมีความหมายเช่นเดียวกันกับ "ระดับความเสถียรของการสปาร์ค" ดังนั้น ถ้ามีการคำนวณค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้ได้อย่างสม่ำเสมอ ก็จะสามารถที่จะตรวจดูสภาพของ ความเสถียรของการสปาร์คได้

ข. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

การควบคุมแกนพิกัดของเครื่อง E.D.M. นั้น จะแตกต่างจากเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น เครื่องกัด (milling machine) กล่าวคือ การส่งป้อนแกนพิกัดตามธรรมดาภายใต้คำสั่งจากอุปกรณ์ระบบ NC นั้นไม่เพียงพอ

ถึงแม้ว่าจะได้รับคำสั่งแบบเดียวกันกับเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น " จงเคลื่อนที่ไปข้างหน้า 10 มิลลิเมตร " ก็ตาม ถ้าเพียงแต่ทำตามคำสั่งคือ เลื่อนแกนพิกัดในการขึ้นรูปไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว ขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานจะสัมผัสกัน (ระยะระหว่างขั้วกลายเป็น 0) ทำให้เกิดการลัดวงจรคือ ไม่สามารถเริ่มการสปาร์คขึ้นได้

การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์คนั้น ระยะระหว่างขั้วที่ถูกต้องสมบูรณ์ พอที่จะทำให้เกิดการสปาร์คได้จะถูกกำหนดตามพลังงานการขึ้นรูป หรือพื้นที่การสปาร์คที่ถูกกำหนดตั้งเอาไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดให้ระยะดังกล่าวนี้คงที่อยู่เสมอตลอดเวลาที่ทำการขึ้นรูป

ถ้าเกิดการสปาร์คอย่างราบรื่นตลอดเวลาที่การขึ้นรูปกำลังดำเนินอยู่ ระยะระหว่างขั้วจะเปิดออกห่างเรื่อย ๆ จึงต้องมีการควบคุมให้ระยะระหว่างขั้วคงที่อยู่เสมอโดยการส่งป้อนแกนพิกัดให้สามารถทดแทนระยะที่คลาดเคลื่อนไป นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีที่เศษผงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขั้ว โดยการสปาร์คถูกขจัดระบายออกไปไม่เพียงพอและบรรยากาศระหว่างขั้วกลายเป็นบรรยากาศที่เกิดการสปาร์คซ้ำขึ้นได้ ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเปรียบเสมือน ระยะระหว่างขั้วแคบลง ดังนั้น ต้องมีการควบคุมให้แกนพิกัดในการขึ้นรูปเคลื่อนที่ในทิศทางที่แยกขั้วออกจากกัน ระยะระหว่างขั้วนี้สามารถทราบได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแรงดัน แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว หมายถึง แรงดันระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ซึ่งถ้าระยะระหว่างขั้วแคบลง (ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้กันไป) แรงดันไฟฟ้าจะสูง แต่ถ้าระยะกว้างขึ้นแรงดันจะต่ำลง จากความสัมพันธ์ที่ว่านี้ แรงดันไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางนั้น เราสามารถรู้ถึงระยะระหว่างขั้วได้ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว

## 2.3 ทฤษฎีการควบคุมเครื่อง NC-EDM

ระบบควบคุมต่าง ๆ ของเครื่อง NC-EDM นั้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ที่ 2.19 และรูปที่ 2.20

อุปกรณ์ระบบ NC จะป้อนข้อมูลเกี่ยวกับระยะระหว่างขั้ว มาจากวงจรการสปาร์คและคำสั่งซึ่งกำหนดปริมาณการส่งป้อนของแกนไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์ นอกจากนั้นแล้วหน้าที่ของ NC ก็ยังมีการรับคำสั่งจากผู้ปฏิบัติการคุมเครื่องหรือบอกแสดงสภาพต่าง ๆ ของเครื่องวงจรการสปาร์ค

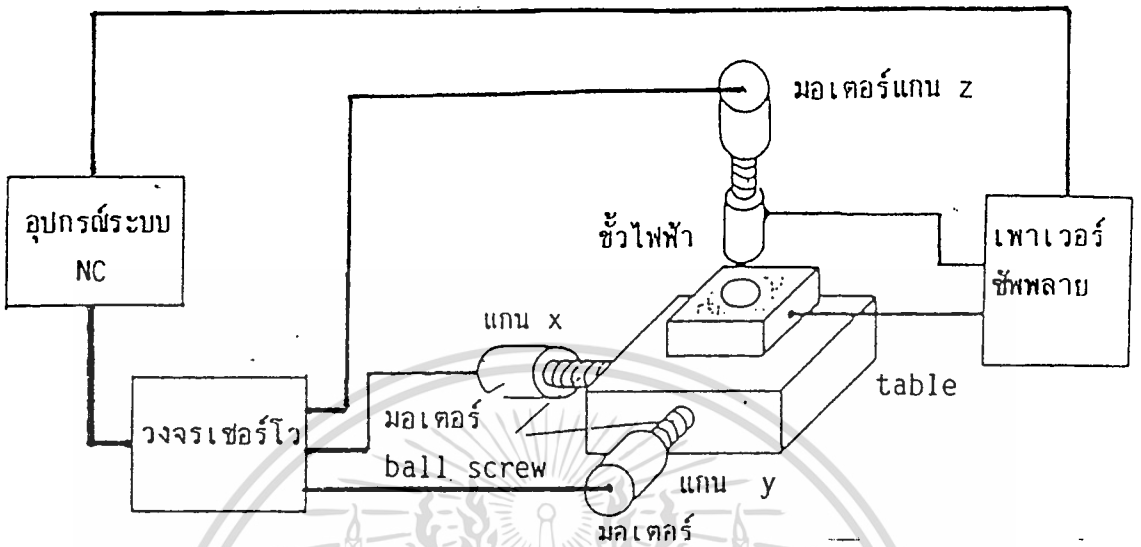
เป็นวงจรที่สร้างพัลส์การสปาร์ค วงจรนี้จะเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า ชิ้นงานและทำหน้าที่ป้อนจ่ายพลังงานในการขึ้นรูป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นก็คือ เครื่องที่ถูกผลิตขึ้นมาในปัจจุบันนี้ โดยส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์ P-MOS เป็นส่วนหัวใจสำคัญของวงจร ซึ่งสามารถควบคุมพัลส์ได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ m.sec

นอกจากนั้นแล้ว คุณสมบัติพิเศษ ในการเริ่มไหลของกระแสไฟฟ้าการสปาร์คนั้นจะมีความเร็วสูงคือ ขึ้นถึง 800 A ได้ภายในเวลาเพียง 1/ $\mu$ sec

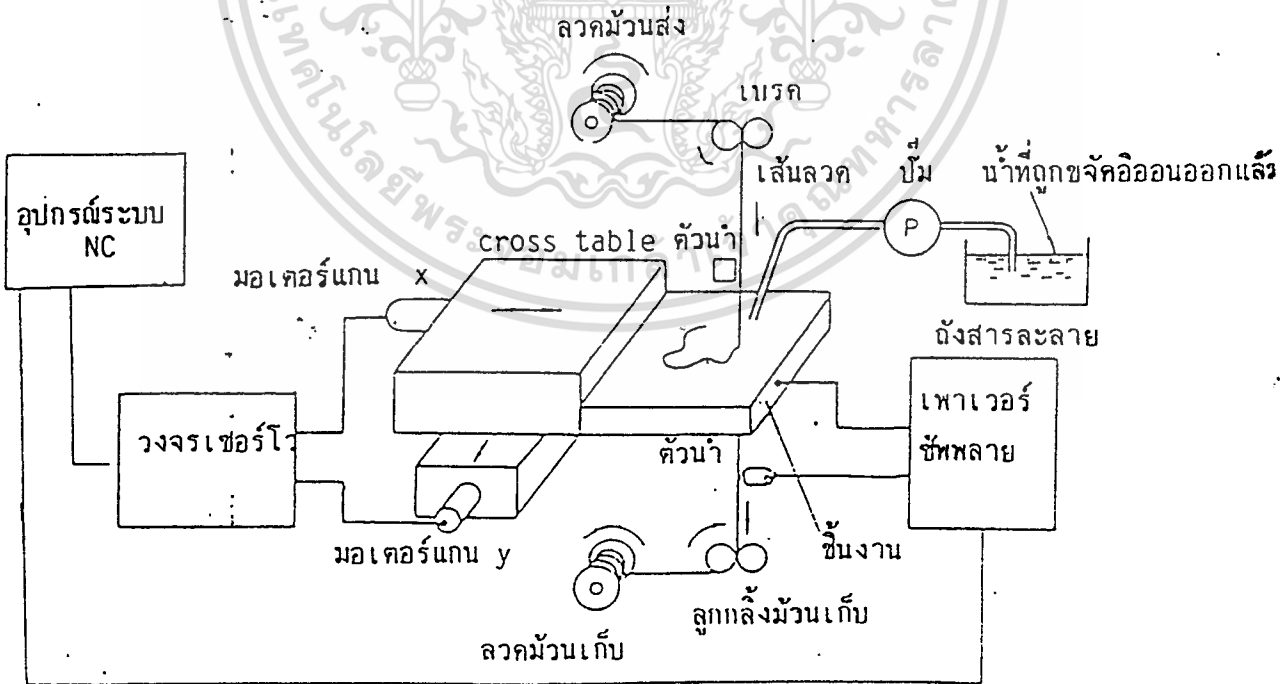
วงจรควบคุมมอเตอร์ (หรือเรียกอีกอย่างว่า motor driver)

ระบบควบคุมมอเตอร์ซึ่งรวมถึงมอเตอร์ด้วยนั้นเป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุมเครื่อง ในปัจจุบันเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนของการกำหนดตำแหน่งการส่งป้อน

มอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานดังกล่าวนี้จะสตาร์ทและหยุดสลับกันไปบ่อยมากคุณสมบัติพิเศษในช่วงเริ่มสตาร์ทจึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อระดับความละเอียดในการขึ้นรูป



รูปที่ 2.19 การควบคุมเครื่อง EDM



รูปที่ 2.20 การควบคุมเครื่อง Wire Cut EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

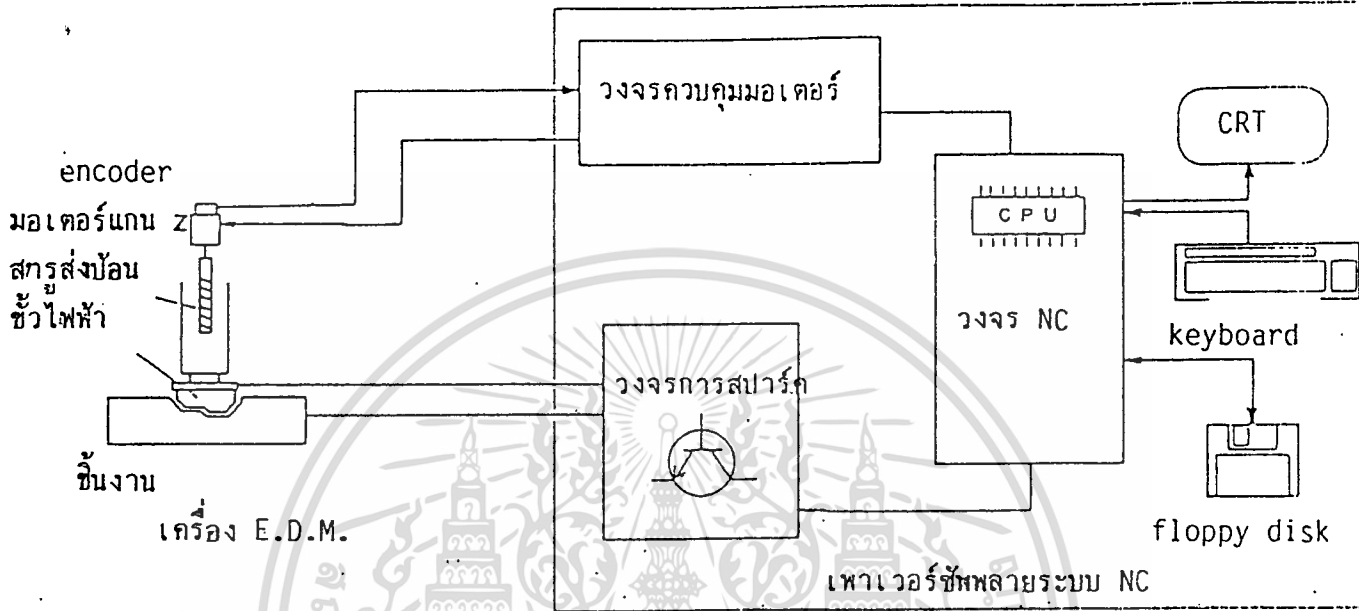
นอกจากนี้แล้วสมรรถนะการทำงานของวงจรถบคุมจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติพิเศษในการควบคุม

อนึ่ง มอเตอร์ที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานดังกล่าวนี้ จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษดังต่อไปนี้คือ

- หมุนได้ทั้งทวนและตาม โดยที่คุณสมบัติพิเศษของสองทิศทางนี้ เป็นสมมาตรกัน
- หยุดได้อย่างกะทันหัน
- แรงหมุนทั้ง starting torque และ holding torque มีค่ามาก
- โมเมนต์เฉื่อย (moment of inertia) ของตัวหมุน (rotor) มีค่าน้อย
- สามารถหมุนอย่างราบเรียบแบบความเร็วต่ำได้

มอเตอร์เหล่านี้ โดยทั่วไปมีชื่อเรียกว่า เซอร์โว มอเตอร์ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น พัลส์มอเตอร์, สเต็ป มอเตอร์, DC-AC มอเตอร์ เครื่องมือกลในปัจจุบัน โดยส่วนมากใช้ DC, AC มอเตอร์เป็นหลัก Encoder

ตัว DC-AC มอเตอร์เองไม่สามารถรู้ถึงว่า"เคลื่อนที่ไปเท่าไร" ได้ อนึ่งการที่จะควบคุมตำแหน่งหรือปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดในการขึ้นรูปให้ได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นต้องรู้ถึงปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งตามปกติแล้ว จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดมุมการหมุน (rotary encoder) เข้าที่แกนของมอเตอร์ และใช้วิธีการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ป้อนกลับ (feedback) ไปยังวงจรถบคุมมอเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเคลื่อนที่ ซึ่งถูกส่งไปยังมอเตอร์ ผลจากการเปรียบเทียบนั้น ถ้าค่าแตกต่างกัน 0 แสดงว่ามอเตอร์ได้ทำงานตรงตามคำสั่ง

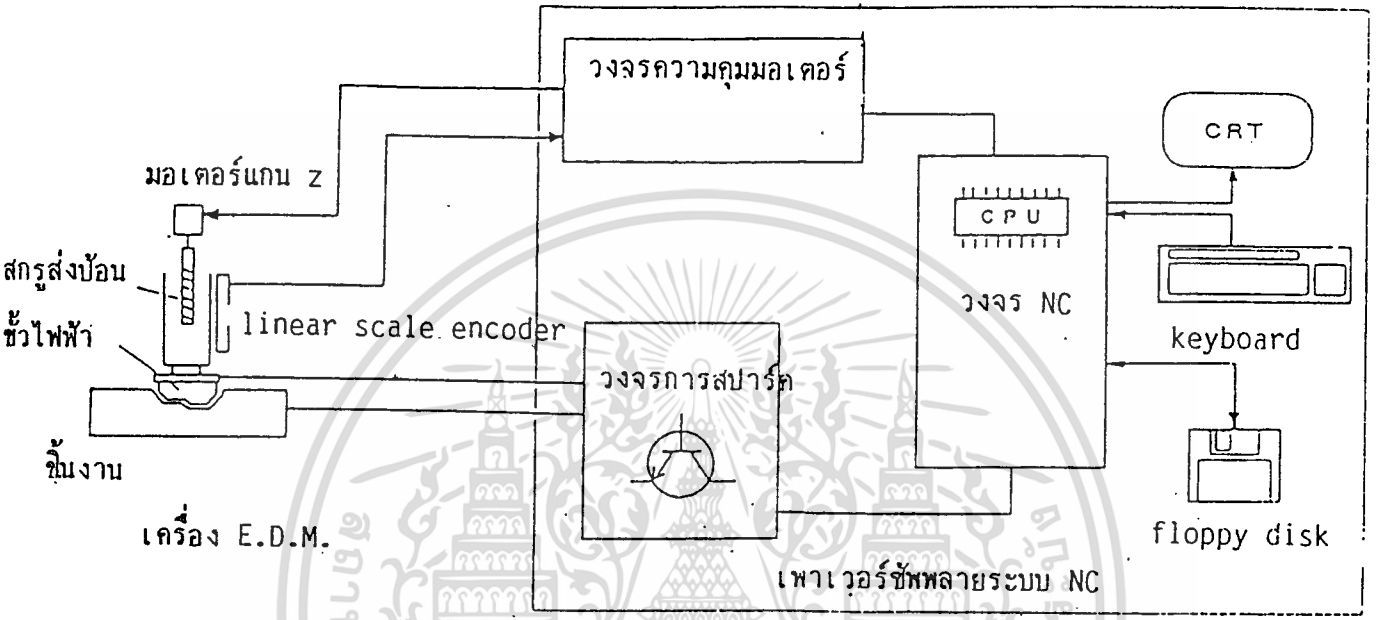


รูปที่ 2.21 Semi Closed Feedback

Semi closed feedback

ในกรณีที่ค่า lead angle ของสกรูส่งป้อน และแรงเสียดทานทางกลของแท่นส่งป้อนมีค่าคงที่ เราสามารถถือได้ว่ามุมการหมุนของมอเตอร์ = ปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนได้ ซึ่งหมายความว่า ถ้าควบคุมมุมการหมุนของมอเตอร์ได้ ก็สามารถนับได้ว่า แกนได้เคลื่อนที่ตามระยะที่กำหนด

วิธีการตรวจวัดตำแหน่ง และควบคุมเช่นนี้เรียกกันว่า "Semi closed feedback" เครื่องมือทุกวันนี้ โดยส่วนมากนำวิธีการนี้เข้ามาใช้



รูปที่ 2.22 Full Closed Feedback

Full closed feedback

ส่วนวิธีการอื่นซึ่งเรียกว่า "full closed feedback" นั้น จะใช้วิธีตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนที่ที่แท้จริงของแกนโดยตรง และส่งข้อมูลป้อนกลับ (feedback) ไปยังวงจรรวม เนื่องจากว่าแกนดังกล่าวจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง จึงจำเป็นที่จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดตำแหน่ง (linear encoder) ที่เหมาะสมกับระยะชัก (stroke) ของเครื่องจักรชนิดนั้น ๆ ด้วยวิธีการเช่นนี้จะใช้กับเครื่องจักรชนิดที่ทำงานขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูงในระดับ  $1 \mu\text{m}$  หรือละเอียดกว่านั้น

วิธีการนี้ใช้การตรวจวัดตำแหน่งที่แท้จริงโดยตรงจึงสามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างถูกต้องมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี semi closed feedback แต่ในทางกลับกันวิธีการนี้ก็ยังมีปัญหาที่เหลืออยู่อีกคือ ปัญหาการจัดหาช่องว่างสำหรับติดตั้ง linear encoder ปัญหาการตอบสนองช้าของระบบกลไกอันเนื่องมาจากน้ำหนักเฉื่อยของส่วนที่เคลื่อนที่ของแกน นอกจากนี้แล้ว คุณสมบัติพิเศษในการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบควบคุมโดยรวม จะมีแนวโน้มที่ไวเกิน ไปอันเนื่องมาจากความละเอียดในการตรวจวัดสูงจึงทำให้การปรับตั้งค่าต่าง ๆ ทำได้ยาก

ผลสรุปก็คือ การใช้วิธีการนี้จะต้องลงทุนสูงกว่ามากอุปกรณ์ระบบ NC

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

เราสามารถกล่าวได้ว่า CPU (Central Processing Unit) เป็นสมองของอุปกรณ์ระบบ NC ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ขนาด 16 bit เป็นหลัก แต่ทว่า แนวโน้มในปัจจุบันแสดงถึงว่า ระบบควบคุมจะถูกพัฒนาให้มีระดับสูงและซับซ้อนมากขึ้นไปอีกรวมทั้งจะมีการเพิ่มเติมฟังก์ชันต่างๆเข้าไปด้วยดังนั้น อุปกรณ์ระบบ NC ที่มีระดับสูง จะเริ่มมีการนำ CPU ขนาด 32 bit เข้ามาใช้แทน เพื่อที่จะให้ทำงานได้เร็วขึ้นเหมาะสมกับซอฟต์แวร์ ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นด้วย

สำหรับ "MARK 20 Series" ของบริษัทไซดิกส์ ก็เช่นกันคือใช้ CPU ขนาด 32 bit ในอุปกรณ์ NC

นอกจากนี้แล้ว อุปกรณ์ระบบ NC ยังทำให้ขอบเขตของวิธีการควบคุมกว้างขวางหรือมีอิสระมากขึ้นด้วย ถ้าเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบ NC เข้าระหว่างเซนเซอร์ (sensor) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดปรากฏการณ์กับส่วนที่เป็นกลไกการเคลื่อนที่ทำงาน เราก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง วิธีการควบคุมระบบที่ซับซ้อนและมีระดับสูงได้ รวมทั้งควบคุม ปรากฏการณ์ที่รวดเร็วมาก เช่น การสปาร์คได้ด้วย

เครื่องจักรในสมัยที่ผ่านมา นั้น จะใช้วิธีผลิตลึงค์ หรือเคมขึ้นมาใหม่ และถ้ายังไม่เพียงพออาจจะต้องออกแบบใหม่เลย ดังนั้นอุปกรณ์ระบบ NC จะช่วยทำให้ขั้นตอนการพัฒนาซึ่งจะต้องมีการลองผิดลองถูก (TRY & ERROR) สลับกันไปจนกว่าจะสำเร็จให้เร็วขึ้นมากได้

สำหรับวิธีการควบคุมนั้นจะอยู่ในรูปของ ซอฟต์แวร์ในตัวกลางเก็บบันทึกเช่น Rom (Read Only Memory) หรือ floppy disk ซึ่งซอฟต์แวร์เหล่านี้จะสนับสนุนอุปกรณ์ระบบ NC เราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลง หรือเพิ่มเติมฟังก์ชันเกี่ยวกับวิธีการควบคุมได้อย่างง่ายดาย โดยการสับเปลี่ยนตัวกลางเก็บบันทึกเท่านั้น และยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้เข้ากับความต้องการของผู้ใช้ (users) ได้อีกด้วย

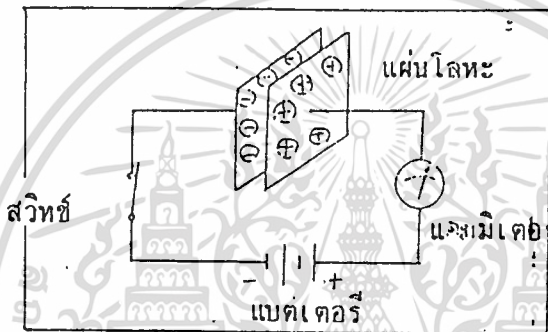
### 2.3.1 บรรยากาศของระหว่างขั้ว

ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานที่จะทำให้เกิดการสปาร์คนั้นจำเป็นต้องมีบรรยากาศอย่างไรบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คอนเดนเซอร์และความจุไฟฟ้าสถิตย์

ความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระหว่างขั้วนั้นถ้าคิดเช่นเดียวกันกับหลักการของคอนเดนเซอร์ ก็จะทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นคอนเดนเซอร์เป็นชิ้นส่วนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเก็บสะสมไฟฟ้าไว้ได้ชั่วคราวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง



รูปที่ 2.23 หลักการของคอนเดนเซอร์

เป็นที่ทราบกันว่า ถ้าจัดให้แผ่นโลหะ 2 แผ่น หันหน้าเข้าหากัน และต่อแบตเตอรี่ แอมมิเตอร์ สวิตช์ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแอมมิเตอร์ทันทีในจังหวะที่เปิดสวิตช์

สาเหตุก็คืออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังแผ่นโลหะของคอนเดนเซอร์ และขับไล่อิเล็กตรอนของแผ่นโลหะด้านบวกไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ (การที่เข็มชี้ของแอมมิเตอร์แกว่งนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเพราะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนเดนเซอร์ เราจะเห็นคล้ายกับมีกระแสไฟฟ้าไหล ในช่วงที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น) และเมื่อแรงดันไฟฟ้าของระหว่างแผ่นโลหะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุดไหล (การชาร์ตไฟเสร็จสิ้นลง) หลังจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่า จะถอดแบตเตอรี่ ออกประจุไฟฟ้า ก็ยังคงเหลืออยู่ในคอนเดนเซอร์ความสามารถในการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่าความจุไฟฟ้าสถิตย์(ความจุของคอนเดนเซอร์)

องค์ประกอบที่จะกำหนดความจุไฟฟ้าสถิตย์นี้มี 3 อย่าง

#### 1. การเปลี่ยนพื้นที่ของแผ่นโลหะ

ถ้าพื้นที่ใหญ่ ก็สามารถเก็บสะสมประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น

## 2. การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

ถ้าระยะห่างแคบลง ความจุสูงขึ้น (แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทนทานได้จะต่ำลง)

## 3. การเปลี่ยนชนิดของสารไดอิเล็กตริก

ความจุไฟฟ้าสถิตย์จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ค่าความต้านทานของฉนวน) ของวัสดุ (สารไดอิเล็กตริก) ถ้าความต้านทานสูง ความจุก็จะสูงด้วย ในรูปที่อธิบายหลักการนั้น ได้จัดวางแผ่นโลหะในอากาศ สารไดอิเล็กตริกก็คืออากาศ อนึ่ง น้ำมันมีค่าความต้านทานสูงกว่าอากาศ จึงถูกใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกในคอนเดนเซอร์ที่มีความจุสูง เสียเป็นส่วนมาก ซึ่งเรียกกันว่า ออยล์-คอนเดนเซอร์ นอกจากนี้ยังมีไมก้า-คอนเดนเซอร์ เปเปอร์-คอนเดนเซอร์ ซึ่งล้วนแต่ใช้ชื่อตามสารไดอิเล็กตริกทั้งสิ้น

### ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว

ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นถ้าจะนำมากล่าวในกรณีของระหว่างขั้วของเครื่อง EDM ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว (ความจุไฟฟ้าสถิตย์) จะมีขนาดตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

ก. ถ้าพื้นที่การสปาร์คมีขนาดใหญ่ ความจุจะสูง

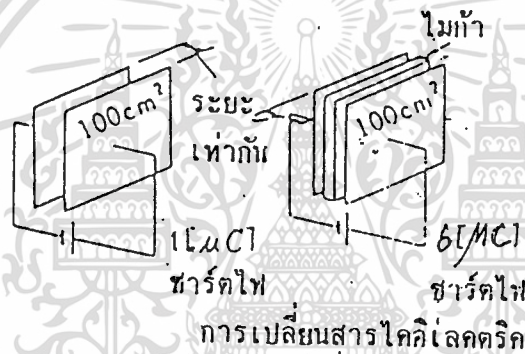
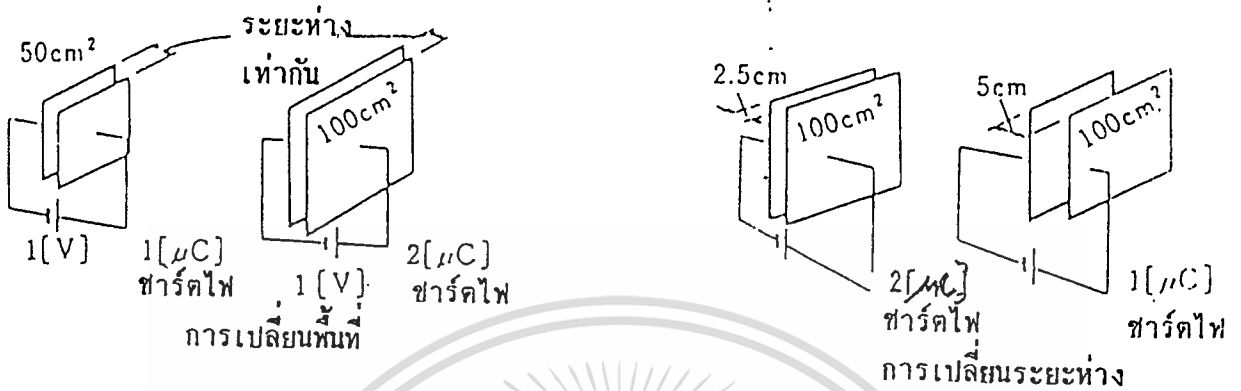
พื้นที่การสปาร์ค หมายถึง พื้นที่ของส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นจริงระหว่างขั้วไฟฟ้า และชิ้นงานในฝั่งตรงกันข้าม

ข. ถ้าระยะระหว่างขั้ว (ระยะห่างการสปาร์ค) แคบ ความจุจะสูง

ถ้าระยะระหว่างขั้ว แคบ ความจุไฟฟ้าสถิตย์ ก็จะมีค่าสูงขึ้น

ค. ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งหมายถึง สารละลายที่ใช้กับเครื่อง EDM สูง ความจุจะสูง

โดยปกติแล้ว การสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศ แต่ในเครื่อง EDM นั้น จะใช้ของเหลว ซึ่งก็คือ ใช้ของเหลว เป็นสารไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานการขึ้นรูป ด้วยเครื่อง EDM นั้น จำเป็นต้องขจัดระยะห่างทางโลหะซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปออกไปดังนั้นของเหลวที่มี คุณสมบัติการไหลที่ดี จะเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารไดอิเล็กตริกดังกล่าวนี้



รูปที่ 2.24 องค์ประกอบที่กำหนดความจุของคอนเดนเซอร์

ระยะห่างการสปาร์ค (ระยะระหว่างขั้ว)

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานนั้น จำเป็นต้องมีระยะห่างขนาดหนึ่ง ถ้าใกล้เกินไป จะเกิดการสปาร์คแบบอาร์ค เช่นเดียวกับการเชื่อม หรือถ้าห่างเกินไป การสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้น ระยะห่างดังกล่าวนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรก หรือสภาพการไหลของสารละลาย

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการสปาร์คกับค่าความต้านทานของฉนวน

การที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ให้มีความละเอียดสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ระยะห่างการสปาร์คแคบลงเนื่องจากว่าพื้นที่การสปาร์คจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดลงไปโดยรูปทรงการขึ้นรูป ดังนั้น การที่จะย่นระยะทางการสปาร์คให้แคบลง ก็ควรที่จะเพิ่มความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้สูงขึ้นด้วย

ค่าความต้านทานของฉนวนนั้นโดยทั่วไปแล้ว น้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ เครื่อง EDM จึงใช้น้ำมันมาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก น้ำมันมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงถึงขนาดที่ถูกใช้เป็นฉนวนฉนวนของหม้อแปลงขนาดใหญ่

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

ในทางกลับกัน ถ้าใช้น้ำเป็นสารละลายในเครื่อง EDM ค่าความต้านทานจำต่ำกว่าน้ำมัน ดังนั้น การสูญเสียความเป็นฉนวนของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ง่ายในระยะที่ห่างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน ซึ่งก็หมายความว่า ระยะทางการสปาร์คจะกว้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนและเกิดมีกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลขึ้นแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดใหญ่ ตามส่วนที่ค่าความต้านทานต่ำลง ดังนั้น เราสามารถที่จะให้พลังงานระดับสูงได้ ซึ่งจะมีผลดีคือ สามารถที่จะใช้กับงานขึ้นรูปที่ต้องการความเร็วสูงได้

### 2.3.2 องค์ประกอบ 4 ประการที่ควรรู้อ

ผู้ใช้เครื่อง EDM ในการขึ้นรูปนั้น คงจะมีเป้าหมายต่าง ๆ เหมือนกันคือ ความเร็วในการขึ้นรูปที่สูง ผิวการขึ้นรูปที่สวยงาม และความละเอียดในการขึ้นรูปที่สูง ซึ่งเป้าหมายเหล่านี้ก็กลายมาเป็นหัวข้อในการพัฒนาของบริษัทผู้ผลิตเช่นเดียวกัน เวลาที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้นเราจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบ 4 ประการต่อไปนี้ อยู่ตลอดเวลา

#### 2.3.2.1 ความเร็วในการขึ้นรูป (g/min)

ถ้ามองจากจุดยืนของประสิทธิภาพการผลิตแล้ว ความเร็วในการขึ้นรูป เป็นหัวข้อปัญหาที่สำคัญมาก การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คนั้น ถ้าจะเปรียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่น ๆ เช่น การตัด ก็จะถูกจัดอยู่ในประเภทที่มีความเร็วต่ำมาก การใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้า ๆ นั้น จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ แต่ถ้าจะเปลี่ยนมาใช้เงื่อนไขที่ทำให้ความเร็วสูงขึ้น ก็อาจจะทำให้ผิวขึ้นรูปที่ได้หยาบ ระยะทางการสปาร์คก็กว้างขึ้น ทำให้ความละเอียดถูกต้องของขนาดต่าง ๆ ไม่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเร็วในการขึ้นรูป สำหรับ เครื่อง EDM นั้น จะบอกแสดงด้วยปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา ปริมาณที่ถูกขจัดออกไปนี้ มีทั้งวิธีที่บอกแสดงด้วยปริมาตร และวิธีที่บอกแสดงด้วยน้ำหนัก ในประเทศญี่ปุ่นส่วนมากจะบอกแสดงด้วยน้ำหนัก

$$g/min \text{ (ญี่ปุ่น)} \quad mm^3 / sec \text{ (ยุโรป)} \quad in^3 / h \text{ (อเมริกา)}$$

- สำหรับเครื่อง EDM ประเภท Wire Cut นั้น จะบอกแสดงด้วยพื้นที่หน้าตัดการขึ้นรูปต่อหน่วยเวลา และมีการบอกแสดงความหนาของชิ้นงานด้วยในเวลาเดียวกัน

$$\text{ความเร็วการส่งป้อน} \times \text{ความหนาของชิ้นงาน} = \text{ความเร็วในการขึ้นรูป}$$

$$mm/min \quad \times \quad mm \quad = \quad mm^2/min$$

ในการบอกแสดงความเร็วในการขึ้นรูปนั้นจะมีการบอกแสดงเงื่อนไขต่าง ๆ เวลาขึ้นรูปประกอบไปด้วย

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

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

ความหยาบของผิวขั้นสุดท้ายของแม่พิมพ์ จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตมาจากแม่พิมพ์นั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติก ความหยาบของผิวด้านในแม่พิมพ์ จะถ่ายทอดกลายเป็นความหยาบของผิวผลิตภัณฑ์ไปโดยปริยาย ตามปกติแล้วจะมีการขัดซึ่งเรียกว่า lapping (ผู้ปฏิบัติงานขัดด้วยมือ) เพื่อแต่งผิวของแม่พิมพ์ให้ละเอียดขึ้น แต่เนื่องจากว่า กระบวนการขัด lapping นี้ใช้เวลาอย่างมาก ดังนั้นถ้าสามารถแต่งผิวให้ละเอียดไปในตัวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ก็จะช่วยลดเวลา การขัด lapping ให้สั้นลงได้

นอกจากนั้นแล้ว เครื่อง EDM สมัยนี้ ยังได้มีการติดตั้งวงจรช่วยแต่งผิวละเอียด (PIKA) ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ผิวที่มีค่าความหยาบต่ำกว่า 1 ( $\mu R_{max}$ ) ซึ่งถ้าเป็นผิวด้านที่เป็นรอยจับของผลิตภัณฑ์ก็อาจจะใช้ผิวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยตรงเลย โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการขัด lapping อีกครั้ง

- ความหยาบของผิว นั้น บอกแสดงถึงระดับความราบเรียบของพื้นผิวด้วยความแตกต่างของระดับสูงต่ำระหว่างส่วนที่เป็นภูเขา กับส่วนที่เป็นหุบใน ช่วงระยะความยาวหนึ่ง ๆ โดยใช้หน่วยเป็น  $m$  วิธี การบอกแสดงนั้น มีหลายวิธี ในญี่ปุ่นจะใช้วิธีการบอกแสดงซึ่งเรียกว่า "ค่าสูงสุดของความสูง" กันมาก.

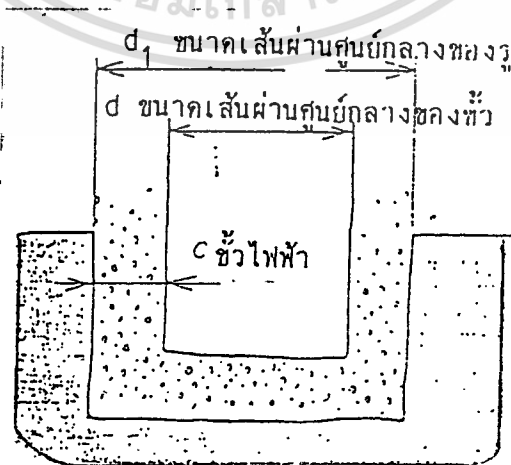
### 2.3.2.3 ระยะห่างการสปาร์ค ( $\mu m$ )

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน จำเป็นต้องมีช่องว่างขนาดหนึ่ง ซึ่งถ้าใกล้กันเกินไปจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสปาร์คแบบอาร์คเช่นเดียวกับการเชื่อมแต่ถ้าห่างกันเกินไปการสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้น ระยะห่างนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรก และสภาพการไหลของสารละลาย ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับงานขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ จะต้องคำนวณระยะห่างนี้ล่วงหน้า เพื่อเตรียมผลิตขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กพอไว้

นอกจากนี้แล้วในการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายจะต้องคำนวณระยะห่างภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวเพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้าย

โดยทั่วไปแล้ว การขึ้นรูปหยาบซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดใหญ่ จะมีระยะห่างนี้กว้าง แต่ ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดเล็กกว่า ระยะห่างนี้จะแคบลง

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



รูปที่ 2.25 ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.4 อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (%)

การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค เป็นวิธีการขึ้นรูปที่แปลกอยู่อย่างหนึ่งคือ ระหว่างที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานจะเกิดการสึกหรอ (ถูกตัดหรือกัดออกไป) ขึ้นโดยที่ขั้วไฟฟ้าไม่เป็นเช่นนั้นแต่ตามความเป็นจริงแล้วขั้วไฟฟ้าจะมีอัตราการสึกหรอที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น เจือปนโยการขึ้นรูปหรือการเลือก ใช้วัสดุของขั้วไฟฟ้า กับวัสดุที่ทำชิ้นงาน สภาพการไหลของสารละลาย ดังนั้น เราจำเป็นต้องคำนวณการสึกหรอนี้ล่วงหน้า เพื่อกำหนดปริมาณชิ้นสุดท้ายของขั้วไฟฟ้า

สำหรับอัตราการสึกหรอดังกล่าวนี้ ถ้าต่ำกว่า 1% จะเรียกว่า "ไม่สึกหรอ" 1-10% จะเรียกว่า "อัตราสึกหรอต่ำ" และถ้าสูงกว่า 10% จะเรียกว่า "มีการสึกหรอ" การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยปกติ นั้น ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบ อัตราดังกล่าวจะอยู่ในประเภท "ไม่สึกหรอ" แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียด จะอยู่ในประเภท "อัตราสึกหรอต่ำ" หรือ "มีการสึกหรอ" แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียด จะอยู่ในประเภท "อัตราสึกหรอต่ำ" หรือ "มีการสึกหรอ" อนึ่งการที่ไม่ดำเนินการขึ้นรูปชิ้นสุดท้ายด้วยเจือปนโยที่ทำให้ "ไม่สึกหรอ" นั้น มีเหตุผลคือ การยอมรับผลเสียจากการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเล็กน้อย เพื่อที่จะยกระดับให้เจือปนโย (องค์ประกอบ) อื่น ๆ ดีเด่นขึ้นมาจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปที่สูงกว่า

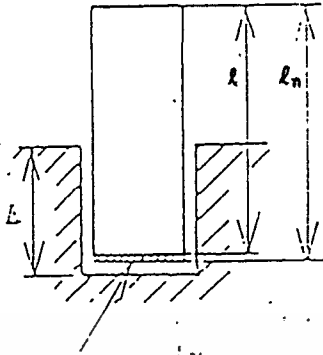
$$\text{อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (\%)} = \frac{\text{ปริมาณที่ขั้วไฟฟ้าสึกหรอไป (g หรือ mm}^3\text{)}}{\text{ปริมาณการขึ้นรูป (g หรือ mm}^3\text{)}} \times 100$$

#### วิธีเอ็นด์แวย์

ในบางกรณีจะมีการใช้ "วิธีเอ็นด์แวย์" ซึ่งบอกแสดง อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าด้วยความยาวยกตัวอย่าง เช่น ถ้าขั้วไฟฟ้าเป็นกราไฟต์ สารละลายจะซึมเข้าไปในช่องระหว่างการใช้งานขึ้นรูป ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น

$$\text{อัตราการสึกหรอ (\%)} = \frac{\text{ความยาวที่ด้านปลายขั้วสึกหรอไป (mm)}}{\text{ความลึกการขึ้นรูป (mm)}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



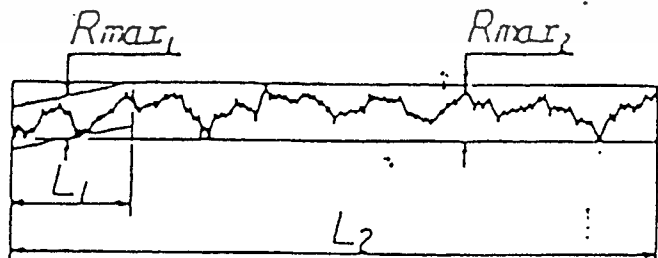
ความยาวที่หัวไฟ้าสี่แตรอไป

รูปที่ 2.26 การลึกรอของขั้วไฟฟ้า

### 2.3.3 ความหยาบละเอียดของผิว

#### 2.3.3.1 ค่าสูงสุดของความหยาบ $R_{max}$

เป็นวิธีบอกแสดงที่เลือกเส้นแสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัด ออกมาด้วยความยาวมาตรฐานระดับหนึ่ง และใช้หน่วย  $\mu m$  ในการบอกแสดงความแตกต่างสูงสุดของภูเขากับหุบที่อยู่ในส่วนนั้น (ภูเขาหรือหุบที่สูงหรือลึกผิวปกติจะไม่นำมานับรวมด้วย)



รูปที่ 2.27 ค่าสูงสุดของความหยาบ  $R_{max}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด $\mu mRz$

เป็นวิธีบอกแสดงที่เลือกเส้นแสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัด ออกมาด้วยความยาวมาตรฐานระดับหนึ่ง และคำนวณหาค่าความแตกต่างระหว่างความสูงเฉลี่ยของภูเขาที่สูงที่สุด 5 จุด กับความสูงเฉลี่ยของกันเหวที่ลึกที่สุด 5 จุด



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

รูปที่ 2.28 ความหมาย Rz

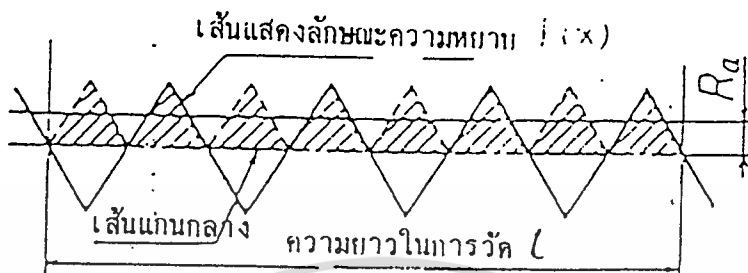
### 2.3.3.3 ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง Ra

เป็นวิธีบอกแสดงที่ใช้เส้นแกนกลางเป็นแนวพิชสำหรับเส้น แสดงลักษณะความหยาบของผิวซึ่งมองจากผิวหน้าตัด และหารพื้นที่ส่วนที่ระบายเส้นเฉียงด้วยความยาวในการวัด

วิธีการแปลงหน่วย

$$1 \mu R_{max} = 6-8 \mu Ra$$

$$(ญี่ปุ่น) = (ยุโรป)$$



รูปที่ 2.29 ความหยาบเฉลี่ย  $R_a$

### วิธีกำหนดความยาวมาตรฐาน

ความหยาบของผิวจะบอกแสดงด้วยความสูงของกราฟ ซึ่งวัดออกมาโดยเครื่องมือวัดแต่อย่างไรก็ตาม เราจำเป็นต้องกำหนด ความยาวมาตรฐาน (ขอบเขตของการวัด) ให้ใช้มาตรฐานเดียวกัน

ตารางด้านล่างนี้แสดงถึงค่ามาตรฐานของความยาวมาตรฐานที่ใช้สำหรับความหยาบระดับต่างๆ ตาราง 2.1 สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้บอกแสดงในแบบ เกี่ยวกับค่าสูงสุดของความสูง  $R_{max}$ , ความหยาบเฉลี่ย 10 จุด  $R_z$ , ความหยาบเฉลี่ยที่อ้างอิงเส้นแกนกลาง  $R_a$  ความยาวมาตรฐาน  $L$  และเครื่องหมายสามเหลี่ยม

ประเภทของ Rmax	ประเภทของ Rz R	ประเภทของ Ra R	ค่ามาตรฐานของความยาว L	เครื่องหมายสามเหลี่ยม
(0.05 S) 0.1 S 1.2 S 0.4 S	(0.05 Z) 0.1 Z 1.2 Z 0.4 Z	(0.00125 a) 0.025 a 0.05 a 0.10 a	-	▽▽▽▽
0.8 S	0.8 Z	0.20 a	0.25	
1.6 S 3.2 S 6.3 S	1.6 Z 3.2 Z 6.3 Z	0.40 a 0.80 a 1.6 a	0.8	▽▽▽
12.5 S (18 S) 25 S	12.5 Z (18 Z) 25 Z	3.2 a 6.3 a	2.5	▽▽
35 S 50 S 70 S 100 S	(35 Z) 50 Z (70 Z) 100 Z	12.5 a 25 a	8	▽
(100 S) 200 S (280 S) 400 S (660 S)	(140 Z) (200 Z) (280 Z) 400 Z (560 Z)	(50 a) (100 a)	-	-
(หมายเหตุ) ประเภทที่อยู่ในวงเล็บนั้น ถ้าไม่จำเป็นจริง ๆ จะไม่ใช่				

แรงดึง ของเส้นลวด รูป 2.30 ประกอบ

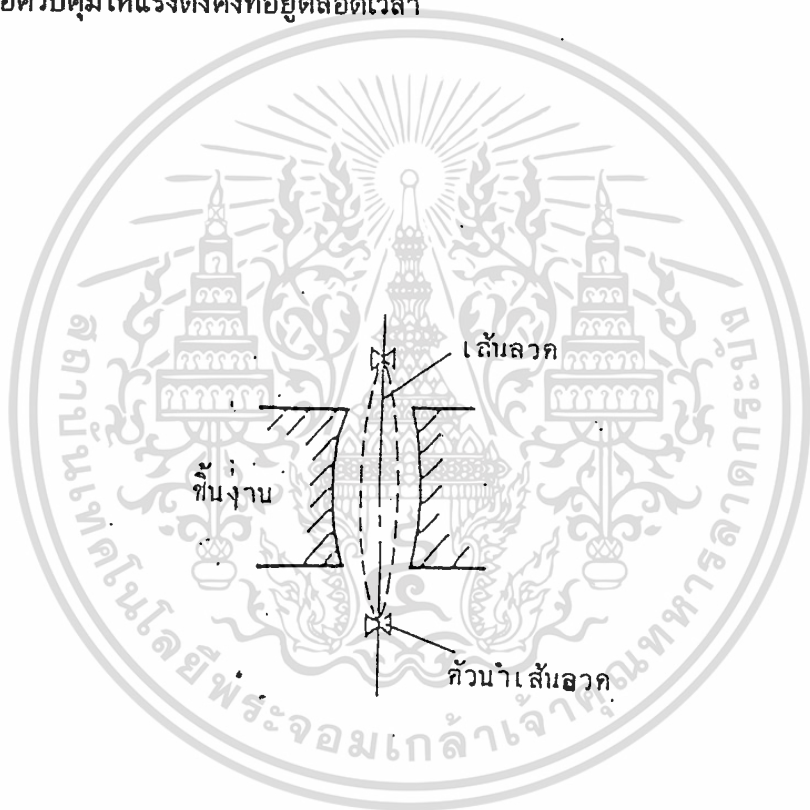
เส้นลวดที่ใช้ในการขึ้นรูป ดังกล่าวนี้ต้องมีความดึงที่เหมาะสม ถ้าเส้นลวดซึ่งเป็น เครื่องมือของ เครื่อง EDM ประเภท Wire Cut หย่อน จะทำให้ความละเอียดในการขึ้นรูปต่ำลง และควบคุมระยะห่างการสปาร์คได้ยาก ในระหว่างการขึ้นรูปนั้นแรงดันการสปาร์คที่เกิดขึ้นจะถ่ายทอดสู่เส้นลวดซึ่งถูกขึงยึดไว้กับตัวนำเส้นลวดบนล่าง ทำให้เส้นลวดเกิดการสั่นไปด้วย ถ้าแรงดึงในเส้นลวดต่ำเกินไป จะทำให้ช่วงระยะการสั่นกว้างมากขึ้น จนมีอิทธิพลต่อความละเอียดของงาน ซึ่งผลเสียที่ตามมาคือ จะเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่ว่า ผิวจีนงานจะเว้าเข้าเป็นลักษณะแฉ่งที่มีกันอยู่ตรงกลางชิ้นงาน ดังในรูป 2.30 (ปรากฏการณ์นี้ เรียกกันว่า "กลองใหญ่")

ในทางกลับกัน ถ้าใช้แรงดิ่งกับเส้นลวดมากจนตึงเกินไป โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์กลองใหญ่ขึ้นจะน้อยลงแต่เวลาที่สภาพการสปาร์คเกิดการเปลี่ยนแปลงจนมีกระแสไฟฟ้าไหลมากเกินไป อาจจะทำให้เส้นลวดขาดได้

นอกจากนั้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงของแรงดิ่งในเส้นลวด ก็มีผลต่อความละเอียดในการขึ้นรูปด้วย ดังนั้น เครื่อง EDM ประเภท Wire Cut รุ่นที่มีระดับเกเรตสูงบางรุ่นจะมีกลไกระบบ tension servo ประกอบติดไว้เพื่อควบคุมให้แรงดิ่งคงที่อยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 2.30 การสั่นของเส้นลวดระหว่างตัวนำ

#### -ความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวด

เส้นลวดที่ใช้ในเครื่อง EDM ดังกล่าว จะมีขนาดเล็ก (โดยปกติ  $\phi$  0.2 ) ซึ่งถ้าเกิดการสปาร์คขึ้นหลาย ๆ ครั้ง ที่ตำแหน่งเดียวกัน ก็จะทำให้สึกหรองจนขาดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการส่งป้อนเส้นลวดด้วยความเร็วคงที่ระดับหนึ่ง เพื่อสำหรับส่งจ่ายเส้นลวดใหม่มาใช้งานอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่ความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวดนี้ช้าเกินไป ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบซึ่งมีกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ เส้นลวดก็อาจจะขาดได้ แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ก็จะมีผลเสียต่อความละเอียดของงาน ในการกลับกันถ้าเร็วเกินไปก็จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นการสิ้นเปลือง (เส้นลวดใช้แล้วทิ้ง) ซึ่งถ้าปริมาณขนาดของลวดที่เตรียมไว้มีไม่มากพอ ก็อาจจะไม่สามารถทำงานขึ้นรูปที่ใช้เวลานานได้

- ตัวนำ (guide)

เส้นลวดไม่สามารถทำงานตามลำพังได้ด้วยตนเอง จึงต้องมีตัวนำคอยยึดประคองที่ด้านบนและล่างของชิ้นงาน ส่วนที่เป็นตัวนำนี้เป็นส่วนที่สำคัญมากในเครื่อง EDM ประเภท Wire Cut ที่มีอิทธิพลต่อความละเอียดในการขึ้นรูป เส้นลวดทองเหลืองนี้จะอ่อนก็จริงแต่จะวิ่งอยู่ตลอดเวลาที่ใช้งาน ดังนั้นตัวนำซึ่งทำหน้าที่รองรับเส้นลวดนี้ จึงใช้วัสดุประเภทหินแร่ที่มีความแข็งสูง เช่น ruby, sapphire ในบางกรณีก็มีการใช้ diamond ซึ่งมีราคาสูงมาก

รูปแบบของตัวนำนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ ๆ ตามรูปทรงหน้าตัด

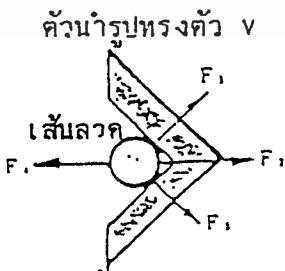
• ตัวนำหน้าตัดทรงตัว V

ตัวนำรูปทรงตัว V นี้จะมีต้นทุนผลิตที่ไม่สูง แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปในทิศทางที่ปิดของ ตัว V แล้วตัวนำจะต้องรับแรงดันการสปาร์คจากผิวการขึ้นรูป ทำให้แรงดันสัมผัสตัวนำของเส้นลวดต่ำ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้สูญเสียความละเอียดในการขึ้นรูปไป

• ตัวนำหน้าตัดทรงกลม

สำหรับตัวนำที่รูปทรงหน้าตัดกลม (die) นั้น ส่วนที่สัมผัสกันของตัวนำและเส้นลวดจะเป็นส่วนโค้งของวงกลมทั้งคู่ จึงทำให้ความดันการสัมผัสต่ำ และมีแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง กล่าวคือ ขึ้นรูปได้สม่ำเสมอโดยไม่เลือกทิศทาง แต่การผลิตตัวนำรูปทรงนี้จะยาก และจำเป็นที่จะต้องคอยระวังเกี่ยวกับช่องระยะเพื่อ (clearance) ระหว่างขนาดเส้นลวดกับขนาดรูตัวนำในการบำรุงรักษาประจำวันอีกด้วย

รายละเอียดของส่วนนี้นั้น แต่ละบริษัทก็มี know how ของตนเองจึงไม่สามารถกล่าวสรุปได้ว่าประเภทไหนจะดีกว่ากัน



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

ตัวนำรูปทรงกลม



ถ้ารูใหญ่เกินไปหรือเกิดการสึกหรอ ก็จะทำให้เส้นลวดภายในทำงานได้ไม่เต็มที่

รูปที่ 2.31 ประเภทของตัวนำเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การขึ้นรูปประเภท taper และการควบคุม

การขึ้นรูปโดยปกติมันจะมีหลักการอยู่ว่า ขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นเส้นลวดจะต้องตั้งฉากกับผิวอ้างอิงของชิ้นงาน ซึ่งจะต้องมีการปรับตั้งตัวนำด้านบน และตรวจเช็คระดับความตั้งฉากก่อนการขึ้นรูปด้วย

แต่ถ้าเลื่อนตำแหน่งตัวนำบนล่างให้คลาดเคลื่อนกัน ก็สามารถที่จะเอียงเส้นลวดได้ ซึ่งทำให้ใช้ในงานขึ้นรูปประเภท taper ได้แสดงไว้ในรูป 4-13 กล่าวคือติดตั้งตัวนำเส้นลวดด้านบนไว้ที่แกน U, V ซึ่งขนานกับแกน x, y และควบคุมทั้ง 4 แกนพร้อมกันด้วยคำสั่งจาก NC

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

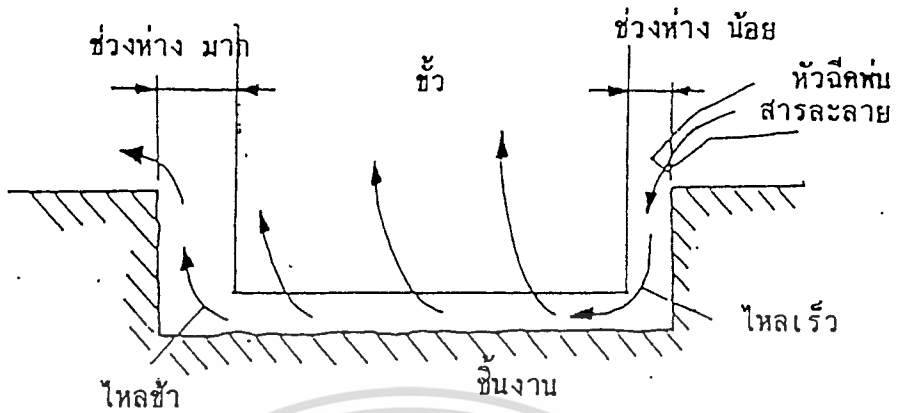
## 2.4 การขึ้นรูปในสารละลาย

เศษที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการสปาร์คถ้าติดค้างอยู่ในช่วงห่างระหว่างขั้วแล้วเศษนั้นจะเป็นตัวไปขัดขวางไม่ให้สามารถสปาร์คได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งในทางปฏิบัติจริงเราจะพ่นสารละลายที่ใช้เข้าไปในระหว่างขั้ว เพื่อล้างนำให้เศษเหล็กนั้นไหลออกมา ทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในรูป 2.32 จะเห็นว่าความเร็วของสารละลายที่พ่นเข้าไปถ้ามีความแตกต่างด้านความเร็วของการไหลแล้ว ในส่วนที่สารละลายไหลตัวเข้า ช่วงห่างระหว่างขั้วจะกว้างขึ้น การที่สารละลายไหลตัวเข้านั้น มีสาเหตุมาจากปริมาณเศษที่ลอยค้างอยู่ในช่วงห่างระหว่างขั้วมีอยู่มากทำให้ค่าความต้านทานความเป็นฉนวนของสารละลายนั้น ๆ ลดต่ำลง และช่วงห่างระหว่างขั้วก็จะกว้างขึ้นเท่ากับค่าความต้านทานฉนวนที่ต่ำลง

ลักษณะการเกิดขึ้นจะเกิดขึ้น เช่นกันกับการขึ้นรูปด้วยเรื่อง WIRE CUT EDM ซึ่งในการขึ้นรูปลวดของ WIRE CUT จะขึ้นรูปคล้ายกับการเจาะร่อง และสารละลายที่พ่นออกมาจาก GUIDE จะไหลเสาะเข้าไปในร่องอย่างสมบูรณ์เพื่อนำพาให้เศษที่ได้จากการตัดหลุดออกไป

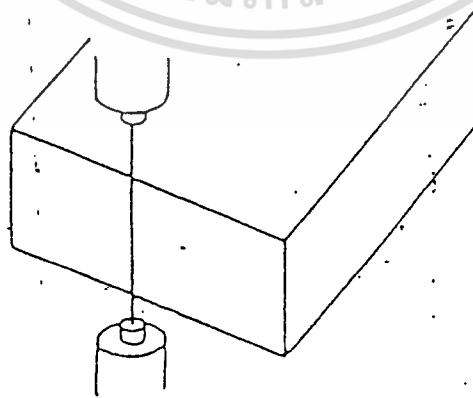
ในการขึ้นรูป ถ้าแรงดัน (ความเร็ว) ของการฉีดพ่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ก็จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ช่วงห่างระหว่างขั้วด้วย นอกจากนี้ การพ่นสารละลาย ในทิศทางความหนาของชิ้นงานควรจะกระทำให้สมบูรณ์ทั้งส่วนบนและล่าง แต่ในความเป็นจริงแล้ว เราไม่สามารถจะทำให้สมบูรณ์ได้ เนื่องจากมีส่วนเกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วง ดังนั้นเราจะพ่นสารละลายทางส่วนบนให้ค่อนกว่าสารละลายที่พ่นจากทางส่วนล่าง หรืออาจจะขึ้นรูปโดยการปิดสารละลายส่วนล่าง และพ่นแต่สารละลายส่วนบนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.32 ความแตกต่างของการไหลของสารละลาย และช่องห่างระหว่างขี้

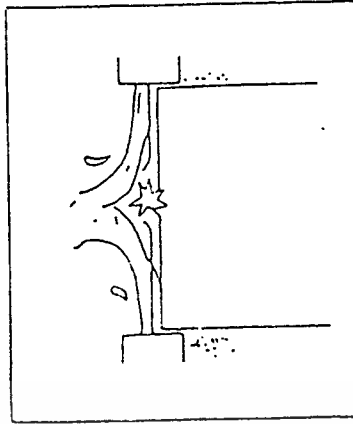
#### 2.4.1 การกระจายหลุดของสารละลาย

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM เมื่อเริ่มตัดจากด้านปลายทางชิ้นงานเข้าไป ถ้าเราเปิดแรงดันของสารละลายแรงเกินไปจะทำให้สารละลายนั้นกระจายหลุดจากด้านปลายที่ขึ้นรูปได้เมื่อเกิดการกระจายหลุดขึ้นก็เท่ากับเป็นการสปาร์คในอากาศทำให้สภาพการสปาร์คไม่สมบูรณ์เป็นผลให้ลดเกิดการขาดขึ้นได้ ดังนั้นเราจึงป้องกันการกระจายหลุดของสารละลาย โดยการพันสารละลายให้ค้อยลงในช่วงแรก หลังจากขึ้นรูป ได้สักระยะหนึ่ง จึงเพิ่มแรงดันของการพันสารละลายขึ้น

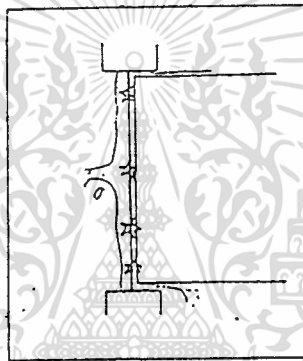


รูปที่ 2.33 ขึ้นรูปจากด้านปลายชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พ่นแรงทำให้สารละลายกระจายหลุดเกิดการสปาร์คในอากาศขึ้น

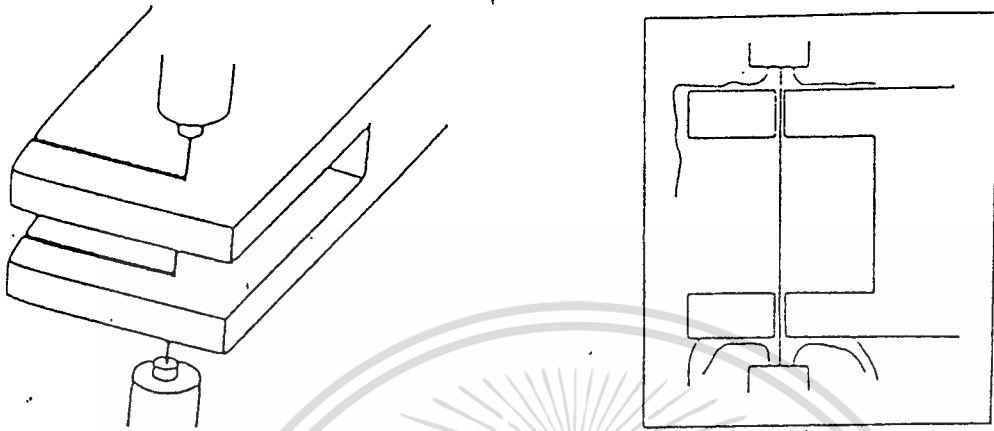


ลดแรงพ่นสารละลายลง

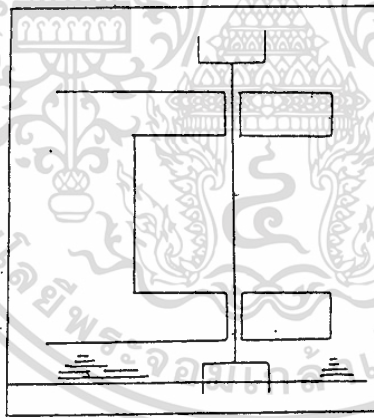
### 2.4.2 การขึ้นรูปแบบแซ่

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM ในบางครั้งอาจเกิดขึ้นปัญหาขึ้นในเรื่องของ สภาพการพ่นสารละลายเป็นไปไม่ได้ดีพอ หรือ แรงดันของการฉีดพ่นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่มีการคิดค้นหาวิธีป้องกันขึ้น และวิธีหนึ่งก็คือ "การขึ้นรูปแบบแซ่" เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยการแซ่ชิ้นงานในสารละลายช่วยป้องกันการกระจายหลุดของสารละลายหรือแรงดันพ่นที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนั้น วิธีการขึ้นรูปแบบแซ่ นี้ ยังเป็นการควบคุมอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย สามารถขึ้นรูปที่มีความละเอียดแน่นอนสูงได้ (อนึ่ง เมื่อความต้านทานจำเพาะของสารละลายที่เป็นน้ำต่ำลงอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แยกตัวของไอออน ELECTROLYTE ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน)



รูปที่ 2.34 การขึ้นรูปชิ้นงานที่ตรงกลางกลวง สารละลายที่ฟุ้งออกไปจะเข้าไปในส่วนกลวงได้ยาก ทำให้เสถียรภาพในการขึ้นรูปไม่ดี



การขึ้นรูปแบบเช่นในสารละลายจะช่วยแก้ปัญหาได้ สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีเสถียรภาพ

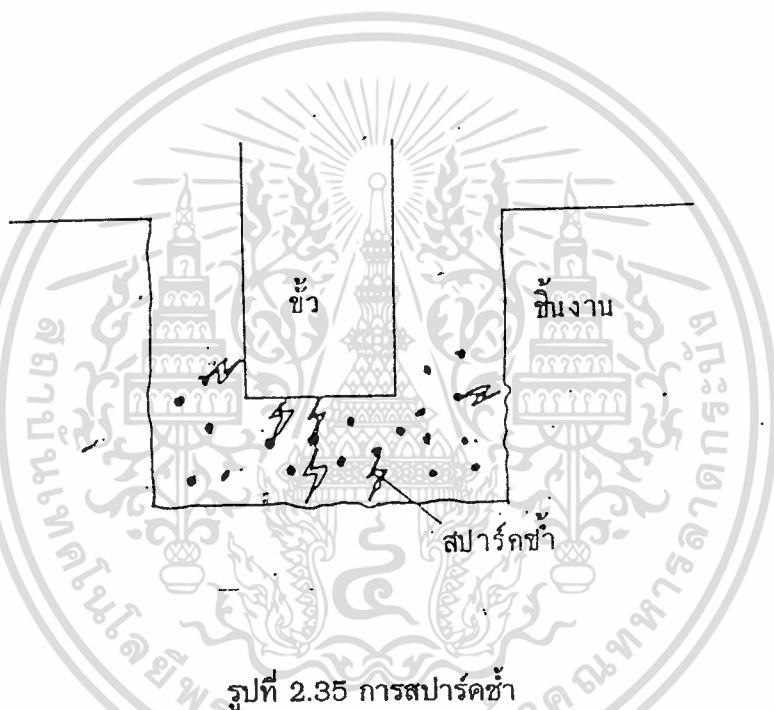
### 2.4.3 การสปาร์คซ้ำ

ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่แล้วว่า ปรากฏการณ์สปาร์คจะถูกควบคุมด้วยระบบ NC แต่ไม่ว่าจะเป็นเครื่อง EDM หรือเครื่อง WIRE CUT EDM ก็ตาม ถ้าสภาพการสปาร์คในระหว่างขึ้นรูปไม่ดีพอ เศษที่ได้จากการขึ้นรูปจะติดค้างอยู่ในช่วงระหว่างขั้วไม่สามารถหลุดออกมาได้ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างเศษกับขั้ว หรือเศษกับชิ้นงาน โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับจังหวะ (Timing) ของคลื่น PULSE ที่ส่งจาก วงจรสปาร์คเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การสปาร์คซ้ำ"

ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างขั้วกับชิ้นงาน(ระยะสปาร์ค)นั้นจะกำหนดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าไร้ โหลด พื้นที่สปาร์คและสภาพการพ่นสารละลาย ถ้ามีเศษที่ได้จากการขึ้นรูปลอยตกค้างอยู่ระหว่างขั้ว ก็ จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานจนวนของสารละลายในส่วนนั้นต่ำลงการเกิดสปาร์คไปเป็นได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดสปาร์คที่ไม่สามารถควบคุมได้จะไม่ใช้สภาพการสปาร์คที่เหมาะสม ดังนั้น ผิวชิ้นงานที่ออกมาก็จะ หยาบ นอกจากนี้ ช่วงเวลา  $T_w$  (ช่วงเวลาซาร์ทแรงดันไฟฟ้าไร้โหลด) จะสั้นลง ในบางครั้งอาจทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้



#### 2.4.4 คุณสมบัติพิเศษของสารละลายและสมรรถภาพการขึ้นรูป

สมรรถภาพของการขึ้นรูปโดยใช้สารละลายที่เป็นน้ำและสารละลายที่เป็นน้ำมัน มีความแตกต่างกัน ในที่นี้จะขอกล่าวเปรียบเทียบตัวเลขให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้น (ตัวเลขเดือนสิงหาคม 2534)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 คุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน

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

(หมายเหตุ).

คุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและสารละลายน้ำมัน สรุปได้ดังนี้ สารละลายน้ำมัน ความเรียบของผิวจะละเอียด เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปละเอียด หรือสัดส่วนขนาดที่ถูกต้องแน่นอน แต่ความเร็วในการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมันจะช้า สำหรับสารละลายน้ำหรือน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้น ความเร็วในการขึ้นรูปจะรวดเร็ว แต่ความเรียบผิวที่ได้จะด้อยกว่าการขึ้นรูปโดยใช้ สารละลายน้ำมัน

ตาราง 2.3 สรุปคุณสมบัติพิเศษ ของการขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำและน้ำมัน

	ชนิดของสารละลาย	
	น้ำ	น้ำมัน
ความเร็วในการขึ้นรูป	เร็ว	ช้า
ความเรียบของผิว	หยาบ	ละเอียด

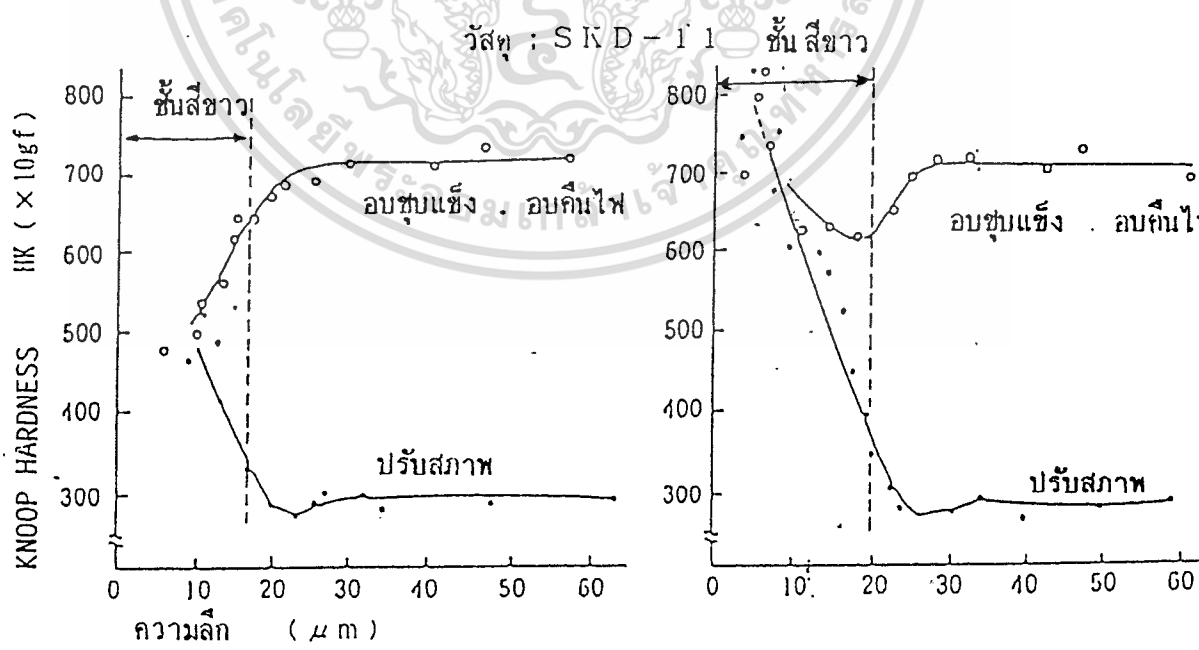
### 2.4.5 ชั้นผิวที่เกิดจากการขึ้นรูป

การขึ้นรูปโดยการสปาร์ค เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยอาศัยพลังงานจาก การสปาร์คไปทำให้ชิ้นงาน บางส่วนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและวัสดุเกิดการละลายตัวดังนั้นผิวของชิ้นงานส่วนที่ขึ้นรูปจะมีชั้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง (AFFECTED ZONE) ขึ้น

เหล็กกล้าเมื่อหลอมตัวและถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วถ้าเราส่องดูหน้าตัดของด้านที่ขึ้นรูปด้วย กล้องขยายจะเห็นเป็นสีขาว ซึ่งเราเรียกว่า ชั้นสีขาว (WHITE ZONE) (ดูรูป 2.37 ประกอบ) ชั้นสีขาวนี้ เกิดจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (MARTENSITE) ที่แตกตัวออกและโครงสร้างออสเตนไนต์ (AUSTENITE) ที่เหลือค้าง ส่วนใต้ของชั้นสีขาว แม้ว่าจะไม่ถูกหลอมตัวแต่ก็ได้รับความร้อน ทำให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์แตกตัวออกและแข็งตัวกลายเป็นชั้น HEAT-AFFECTED ZONE ขึ้น ซึ่งเราเรียกรวม ชั้นสีขาว และชั้น HEAT-AFFECTED ZONE นี้ว่า ชั้นผิวเปลี่ยนแปลง (AFFECTED ZONE)

รูปที่ 2.36 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของชั้นผิวตามความลึกจากผิวหน้าทั้งการขึ้นรูปใน สารละลายน้ำและน้ำมัน เราจะเห็นได้ว่า ในช่วงของ ชั้นสีขาวความแข็งของบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้าของ วิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำจะต่ำลง แต่ความแข็งของวิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมันจะแข็งขึ้น

ความลึกของชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลงนี้ แตกต่างกันไปตามวิธีการให้พลังงานในการขึ้นรูป โดยทั่ว ๆ ไปจะลึกประมาณความหนาของผิวหรือประมาณ 2 เท่าตัว จากการศึกษาวิเคราะห์รอยสปาร์คที่เกิดจาก การสปาร์คครั้งหนึ่งแล้ว ความลึกของชั้นผิวเปลี่ยนแปลง จะเกี่ยวข้องกับช่วงเวลาที่มีความร้อนจะแผ่ซ่อน อยู่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ กับการนำความร้อนของวัสดุด้วย



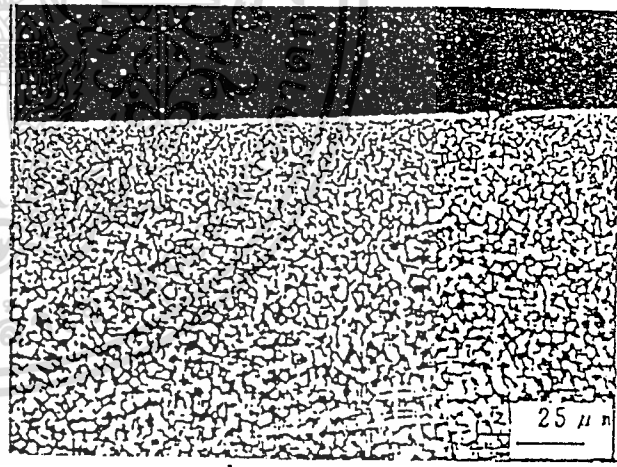
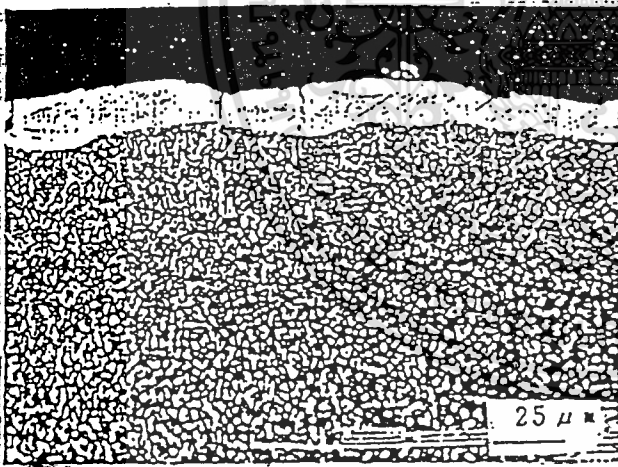
รูปที่ 2.36 ความแข็งของชั้นผิวเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำชั้นผิวเปลี่ยนแปลงให้น้อยลงนั้น ทำได้โดยการตั้งกระแสไฟฟ้าสูงสุด  $I_p$  ให้สูง และช่องกว้างของคลื่น PULSE ( $\tau_{on}$ ) ให้สั้น เพื่อทำช่วงเวลาที่ความร้อนจะคงอยู่ที่ผิว และในการขึ้นรูปละเอียดพยายามให้โลหะที่หลอมตัวลอยหลุดออกไปไม่เหลือค้างติดอยู่ที่ผิวชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คด้วยสารละลายน้ำมัน มีแนวโน้มที่จะแข็งกว่าวัสดุเดิมนั้นเป็นเพราะ ความร้อนจากการสปาร์คจะทำให้ คาร์บอนที่แตกตัวออกจากน้ำมัน ถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (CARBURIZATION) แม้ว่าชั้นของผิวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างเร็วนี้ จะแข็งแต่จะเปราะได้ง่าย ซึ่งเราจะเห็นว่า มีรอยแตกจ้าวเล็ก ๆ (MICRO CRACK) ในชั้นสีขาว ของเหล็กกล้าผสมที่มี โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตน อยู่มาก (เหล็กแม่พิมพ์ เหล็กไฮดรีด เป็นต้น)

รูป 2.37 เป็นชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปแบบหยาบในสารละลายน้ำมัน จะเห็นเป็นชั้นสีขาว และรอยแตกจ้าวเล็ก ๆ ได้อย่างเด่นชัด รูป 2.38 เป็นการขึ้นรูปแบบละเอียดซึ่งจะทำให้ชั้นสีขาวที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปแบบหยาบหมดหายไป สามารถได้ผิวหน้าที่มีคุณภาพดีมีความแข็งแรงเหมาะสม



รูปที่ 2.37 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปหยาบ  
ในสารละลายน้ำมัน  
ความละเอียดของผิว 3.8  $\mu\text{m}$

รูปที่ 2.38 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูป  
ละเอียดในสารละลายน้ำมัน  
ความละเอียดของผิว 1.5  $\mu\text{m}$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ

ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คในสารละลายน้ำ จะตรงข้ามกับสปาร์คในสารละลายน้ำมันคือ ความแข็งแรง ของผิวมีแนวโน้มที่จะอ่อนกว่าวัสดุเดิม นอกจากนี้จะเป็น สาเหตุจากสารละลายน้ำ ที่ไม่มีการเกิด CARBURIZATION แล้ว ยังเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ชั้นเล็กน้อยที่ผิว อันเนื่องมาจาก ความต้านทานจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าต่ำ ดังนี้ บางส่วนของทองแดงที่ใช้ทำขั้วจะละลายหลุดออกไปพร้อมกับเหล็กกล้าเหลือดินบนผิวเป็นผลให้ความแข็งแรงของผิวลดลงได้

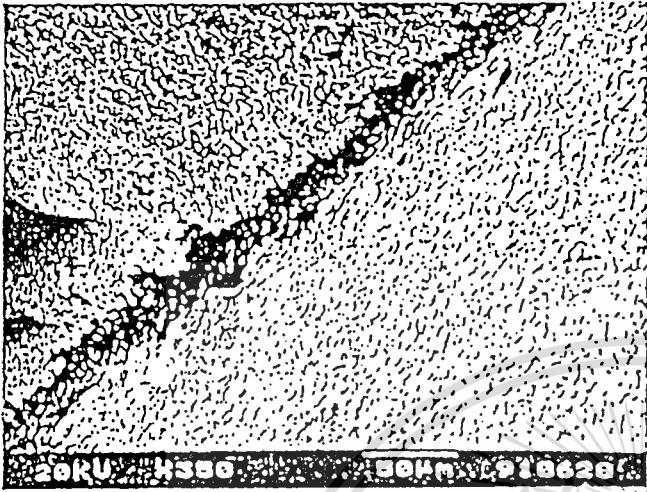
การขึ้นรูปด้วยสารละลายน้ำ นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM ซึ่งเราจะพยายามไม่ให้เกิดการแยกตัวเป็นอ็อกไซด์ โดยหาวิธีทำค่าความต้านทานจำเพาะ (ความต้านทานจนวน) ของสารละลายน้ำให้สูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำ เมื่อถูกความสกปรกของเศษโลหะ จะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงได้ง่าย การที่จะนำค่าความต้านทานให้สูงกว่าปกติ (50,000-100,000  $\Omega \cdot \text{Cm}$ ) จะทำให้การควบคุมดูแลค่าความต้านทานจำเพาะยุ่งยากขึ้น

นอกจากนี้ การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ ยังมีการพัฒนางจรสปาร์ค กระแสสลับ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากลับ (REVERSE VOLTAGE) เข้าไปเลี้ยงวงจร ในช่วงเวลาหยุดสปาร์ค ( $\tau_{OFF}$ )

## ข้อดีของการขึ้นรูปเครื่อง WIRE CUT EDM ในสารละลายน้ำมัน

รูป 2.39 , รูป 2.40 แสดงให้เห็นถึงภาพขยาย (350 เท่า ) ของด้านบนและมุมเหลี่ยมของด้านขึ้นรูป ซึ่งผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM

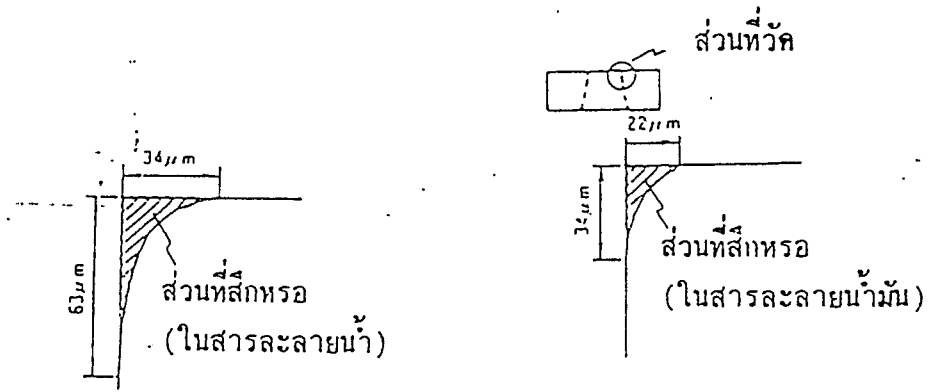
รูป 2.39 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ จะสังเกตเห็นการเกิดการแยกตัวของอ็อกไซด์ที่ด้านบน เห็นเป็นผิวหยาบ และบางส่วน ๆ ของมุมเหลี่ยมไม่เป็นระเบียบ ส่วน รูป 2.40 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน จะเห็นว่าด้านบนของผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการแยกตัวของอ็อกไซด์ และเหลี่ยมของมุมก็เป็นระเบียบดี



รูปที่ 2.39 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ รูปที่ 2.40 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

รูป 2.41 เป็นการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมมีดของ DIE แม่พิมพ์ PRESS ตัดเจาะ ซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM ในสารละลายน้ำและน้ำมัน และผ่านการใช้งานในสภาพเงื่อนไขเดียวกัน

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง WIRE CUT EDM ถ้าเราขึ้นรูปละเอียดส่วนปลายคมมีดของ PUNCH และ DIE ของแม่พิมพ์ PRESS ในสารละลายแล้ว จะทำให้ผิวหน้าชิ้นงานมีความแข็งแรง และสึกหรอได้ยาก ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของปลายคมมีดยาวนานกว่าคมมีดที่ขึ้นรูปในสารละลายน้ำ (ดูรูป 2.41 ประกอบ)



ขึ้นรูปในสารละลายน้ำ

ขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

รูปที่ 2.41 เปรียบเทียบการสึกหรอของปลายคมมีดของDIE (ขึ้นรูปด้วย WIRE CUT EDM)

วัสดุ : SKD-11 , ความแข็ง HRC 59 , ขึ้นรูปขึ้นงานแล้ว 7 หมั่นขึ้น



## 2.5 ลวดที่ใช้ตัดขบด้วยโคบอลต์ (WC-Co)

ลวดขบโคบอลต์จะ ถูกใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับชิ้นส่วนที่ทนต่อการสึกกร่อน และการตัดขบ เครื่องมือ การที่มีความแข็งและมีความต้านทานต่อการสึกหรอมาก ทำให้มันยากต่อการที่จะทำ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่มีความแข็งมาก ๆ ก็คือใช้ electrical discharge machine(EDM) วิธีนี้ถูก นำเสนอโดย Petrofes และ Gadalla ขั้นตอนของขบวนการ EDM เริ่มจากการกัดกร่อนโดยใช้ controlled electrical sparks จะไม่มีการสัมผัสโดยตรงระหว่าง electrode และชิ้นงาน และไม่มีแรง ทางฟิสิกส์ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความแข็งและความเปราะของวัสดุสามารถที่จะนำมาทำงานได้ง่าย

จากการตรวจสอบผลงานที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบที่ออกมานั้นเกิดจากการที่ขบวนการ EDM เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการทำให้เศษผิวของ WC-Co และทำให้โคบอลต์หมดไป

การผลิตโดยใช้วิธี EDM ถูกกล่าวหาว่าเป็นผลผลิต carbide ของการผลิตที่บกพร่องของวัสดุที่ ทำออกมาไม่ได้ เหตุผลจริง ๆ สามารถแสดง ให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่าไม่มีข้อจำกัดของการทำงานในการ ใช้การเรียงแถวของตัวเก็บประจุที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าพลังงานนี้ถูกปล่อยออกมาเพื่อทำให้เกิด ประกายไฟ เมื่อเกิดความแตกต่างของความต่างศักย์ของฉนวนออลอนที่มาถึง

ภายหลังจากการที่พลังงานถูกปล่อยออกมา ตัวเก็บประจุเริ่มสะสมพลังงานใหม่สำหรับการ สปาร์ค ครั้งต่อไป ปัญหาที่เกิดขึ้นกับ power supply ชนิดนี้ก็คือ ตัวเก็บประจุอาจจะ charged สำหรับ สปาร์คครั้งหนึ่ง ๆ สามารถปลดปล่อยพลังงานได้มากที่สุดและเคลื่อนย้ายวัสดุจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม สำหรับการสปาร์คครั้งอื่น ความแตกต่างของกระแส (gap voltage) อาจจะได้ค่าที่เหมาะสมก่อนที่ capacitor จะเต็ม ดังนั้นการปลดปล่อยพลังงานจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณภาพที่ไม่ค่อยดี โดยได้บอกในแคตตาล็อกแล้ว ในเครื่องชนิดใหม่ Power Supply ชนิดที่ให้สัญญาณ Pulse จะถูกใช้ พลังงานที่ปลดปล่อยโดยการสปาร์คจะถูกควบคุมและให้รูปสัญญาณ pulse ที่เที่ยงตรงโดยให้เป็นช่วง ๆ ในที่จุดนี้จะสามารถอธิบายได้อีกดังนี้

### เทคนิคการทดลอง

ลักษณะของการพิจารณาที่ประกอบขึ้นจากสิ่งต่าง ๆ

การพิจารณาครั้งนี้ใช้ WC-Co 3 ตัว ที่มี WC grain ขนาด 1-3  $\mu\text{m}$  และมีส่วนประกอบที่เป็น โคบอลต์อยู่ 6, 12 และ 24% จะถูกเลือกมาศึกษาถึงผลของส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของ WC grain จะพิจารณาว่า ส่วนประกอบทั้ง 3 มี โคบอลต์ 6% และขนาด grain 1-3, 2-4 และ 3-6  $\mu\text{m}$  ผลสรุปของ คุณสมบัติที่ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.4 ค่าความแข็ง (hardness) และ modulus ของความยืดหยุ่นจะลด เมื่อส่วนประกอบที่เป็น โคบอลต์เพิ่ม ในขณะที่ค่าความเหนียว แตกหัก และสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนก็เพิ่มขึ้นคุณสมบัติจะลดลง ขณะอุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้าของส่วนประกอบที่เป็นโคบอลต์สูงจะถูกรักษาไว้ความพรุน 2.0%, 3.0%, 7.3% ได้จากส่วนประกอบที่เป็นโคบอลต์ 6, 12 และ 24% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.4 คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ

Cobalt content (%)	WC grain size (µm)	Hardness (R <sub>A</sub> )	Thermalexpansion (X10 <sup>6</sup> °C)
6	1-3	91.4+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 2.4(ต่อ) คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ

Cobalt content (%)	WC grain size (µm)	Elastic modul (kg/mm <sup>2</sup> )	K ic (Mpa <sup>m-1/2</sup> )
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	6-6	59.4+2.2	17.4+2.6

ตาราง 2.4(ต่อ) คุณสมบัติที่ใช้ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ

Cobalt content (%)	WC grain size (µm)	Electrical conductivity (mhos/cm.)	Thermal conductivity (W/m-k)
6	1-3	0.0585	100
12	1-3	0.0585	105
24	1-3	0.0560	93
6	1-3	0.0585	100
6	2-4	0.0610	105
6	3-6	0.0620	107

ตารางที่ 2.4 จำนวน โคบอลต์, ค่าความแข็ง, ค่า modulus ยืดหยุ่น จะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของ WC grain มีขนาดลดลง ขณะที่สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิความเหนียวแตกหัก, อุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ นี้เชื่อว่าจะเกิดจากบริเวณที่มีพันธะตาและการเพิ่มจำนวน โคบอลต์ หมายถึง ระยะทางระหว่าง BC grain ที่ทำให้ WC grain ใหญ่ขึ้น

WIRE CUT EDM ซึ่งผลิตโดย Agietron Characterization ใน Switzerland ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ส่วนที่ใช้ในการตัดจะใช้รุ่น 612 และส่วนที่ใช้ในการควบคุมจะใช้รุ่น CNC-100 ส่วนของการควบคุมจะใช้ pulse ที่เปลี่ยนตามเวลา ความหนาแน่นของกระแสและ ความถี่ขณะที่กำลังรักษา อัตราการจ่ายลวดที่ 30 mm/min. สายลวดประกอบด้วยทองแดง 63% และ สังกะสี 37% ส่วนผสมของน้ำที่ไม่แตกตัวและถูกกักไว้จะถูกใช้เป็นของเหลว dielectric และอัตราส่วนจะถูกปรับเพื่อให้ค่าความคงที่ 6 s/cm. การใช้กำลังงานจะถูกกำหนดไว้ในแต่ละกลุ่มของภาระการทำงาน เช่น rectangular pulse สั้น ๆ โดยการหารค่ากำลังด้วยอัตราค่ากำลังด้วยอัตราที่เคลื่อนไปมีการตัดชิ้นส่วนตัวอย่าง และผิวตามขวางที่ถูกตัด JSM-25 S Scanning Electron Microscope ถูกใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบและ โครงสร้างพื้นผิว X-ray photoelectron spectroscopy XPS ทำขึ้นจากการ Kratos XSAM 800 ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว

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

ดูเหมือนว่า การใช้ power supply ชนิด pulse เพื่อกำเนิดรูปร่างและคาบเวลาของ pulse ที่แน่นอนและเป็นตัวให้กำเนิดความร้อนซึ่งเป็นตัวทำลายโครงสร้างของพื้นผิว

การใช้ power supply ชนิด pulse ผู้เขียนพบว่าช่วงเวลาที่ไม่โคบอลต์หลอมละลายระหว่าง off time เมื่อ plasma เกิดการปะทะกันทำให้เกิด shock wave เคลื่อนที่ออกจาก WC grain (ดูจากภาพ 2.42) ระหว่างขั้นตอนนี้ของเหลวพยายามที่จะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง และเนื่องจากมีการขยายตัวอย่างมากของอุณหภูมิของพื้นที่รอบแตกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นบนพื้นที่ผิวนั้นเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มของ โคบอลต์และขนาด grain ของ WC



รูปที่ 2.42 EDM - ed surface texture of WC-Co.  
(6%, 1-3  $\mu\text{m}$  WC grains) using operating conditions of : 1-1.0 A,  
t-1.4 s, f-0.56 kHz

ความเค้นที่ถูกสร้างขึ้นจะหลงเหลืออยู่ภายในพื้นผิวของ EDM-ed ถูกคำนวณแล้วโดยการใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาโดย Cel และ Fachette ซึ่งคิดจากรัศมีความโค้ง ซึ่งเป็นการวัดด้วยสายตาในทางวิทยาศาสตร์ โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง

ในการใช้ capacitant type power supply นั้น Zolotykil และ Korobova ได้แสดงให้เห็นว่า EDM ของ WC-Co สามารถผลิต microcrack ที่ surface full ได้โดยมีช่องว่างระหว่าง 21 ถึง 630  $\mu\text{m}$  นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Bormann ได้แสดงให้เห็นว่าโคบอลท์จะถูกทำให้หมดไปจากพื้นผิว Bormann ได้อธิบายปรากฏการณ์นี้ว่า Cobalt binder มีความสามารถในการเหนียวแน่นมาก ในขณะที่ carbide granules สามารถต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน binder และรอบ ๆ carbide granules นี้จะทำให้เกิด distergration ของโคบอลท์และเกิดแรงดึงที่เก็บเอา granules เอาไว้ด้วยกัน จากการติดตาม high-energy EDM pulse นี้ granule บางตัวจะถูกปลดปล่อยจนหมดและจะหายไป ส่วน granules อื่น ๆ บางส่วน จะถูกเก็บไว้ที่ที่เฉพาะ และอาจ flake away ภายใต้ความดันที่เหมาะสม นอกจากนี้ความร้อนที่สูงขึ้นจาก EDM spark จะละลายรอบ ๆ ขอบของ carbide granules

ในทางกลับกัน การวิเคราะห์ scanning electron microscopy (SEM) แสดงให้เห็นว่า ขณะที่กำลังใช้ขบวนการ EDM ที่มี power supply ชนิด pulse จะทำให้พื้นผิวที่ทำออกมาถูกปกคลุมด้วยหยดน้ำเล็ก ๆ รอบแตกเล็ก ๆ เป็นสิ่งเดียวที่สังเกตเห็นได้จากบนพื้นผิวที่มีโคบอลท์เป็นองค์ประกอบ 24 % คาดว่ารอยแตกนี้จะตื้นน้อยกว่า 10  $\mu\text{m}$  ดังนั้นมันจึงไม่เจาะทะลุเข้าไปภายใต้พื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.5 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

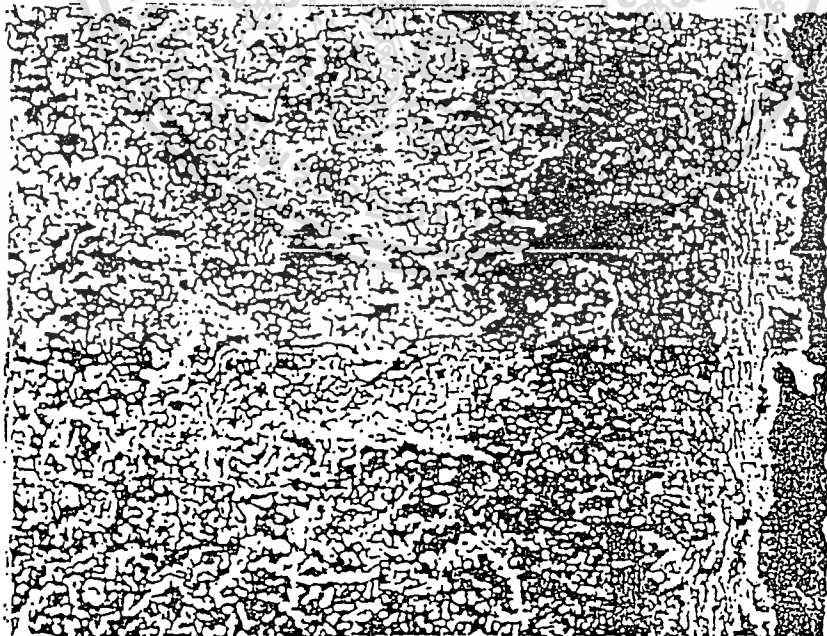
ตาราง 2.5(ต่อ) แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด

t (s)	I (A)	f (kHz)	Power	Energy per unit volume removed
1.00	0.75	0.58	0.031	6.2
1.40	0.75	0.58	0.043	8.3
1.75	0.75	0.58	0.053	9.2
2.25	0.75	0.58	0.089	11.2
2.50	0.75	0.58	0.076	12.0
3.00	0.75	0.58	0.092	14.5
3.50	0.75	0.58	0.107	16.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.5 (ต่อ)แสดงขีดจำกัดการทำงานสูงสุด

t (s)	I (A)	f (kHz)	Power	Energy per unit volume removed
1.40	0.50	0.58	0.028	7.6
1.40	0.75	0.58	0.043	8.3
1.40	1.00	0.58	0.057	9.0
1.40	1.25	0.58	0.071	11.2
1.40	1.50	0.58	0.086	13.6
1.40	0.75	0.50	0.037	9.3
1.40	0.75	0.60	0.044	8.5
1.40	0.75	0.70	0.052	8.4
1.40	0.75	0.80	0.059	9.31
1.40	0.75	1.25	0.092	14.5
1.40	0.75	2.00	0.147	23.2



รูปที่ 2.43 EDM-ed surface texture of WC-Co

(12% Co, 1-3  $\mu\text{m}$  WC grains) using operating conditions of :

1-1.0 A, t-1.4 s, f-0.56 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเพิ่มของกระแส-ความถี่ หรือช่วงเวลาของสัญญาณ pulse ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเร็วของการตัด และอัตราการเคลื่อนที่มีค่าแน่นอนที่ซึ่งต้องใช้พลังงานมากกว่าโดยปราศจากการเคลื่อนที่ในสภาวะการทำงาน สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ที่มากที่สุดนั้น สามารถได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบ และขนาดของ grain พบว่า ขณะที่มีการนำไฟฟ้าอย่างสูงขององค์ประกอบที่ส่วนมากเป็นโคบอลต์ หรือองค์ประกอบที่มี WC grain อย่างหนาแน่นอยู่จำกัดของอัตราการทำงานสูงสุดสามารถ ประยุกต์เพื่อให้เกิดอัตราการเคลื่อนไหวสูงกว่าได้ (ตารางที่ 2.5) การวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่เคลื่อนไหว

## 2.6 ภาษาที่ใช้ควบคุมเครื่อง CNC Wire Cut EDM

ในการที่จะนำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมเครื่องจักรกลให้ได้พอดีนั้นต้องกำหนดภาษาระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และต้องต่อเชื่อมโยงมาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล เรียกว่า ภาษาเครื่องจักรกล ในระบบ ISO CODE ซึ่งจะมีได้ต่าง ๆ ที่สำคัญอยู่ 4 โค้ด

- ก. G-Code ใช้ส่งอ่านคอมพิวเตอร์
- ข. M-Code ใช้เรียกโปรแกรม
- ค. T-Code ใช้ปรับ PARAMETER ของเครื่อง
- ง. H-Code ใช้ปรับ OFF-SET

ตาราง 2.6 จีโค้ด (G-Code)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

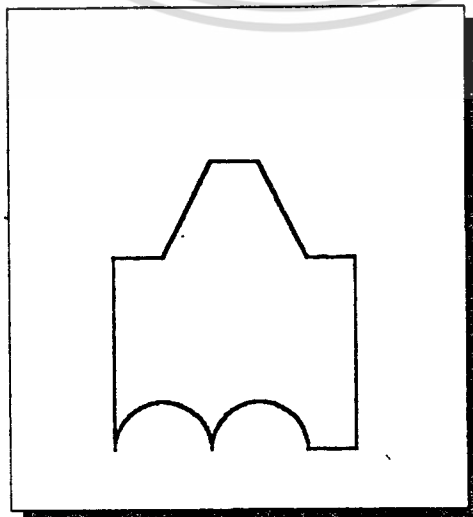
ตาราง 2.7 เอ็มโค้ด (M-Code)

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

ตาราง 2.8 ทีโค้ด (T-Code)

	Function
	สั่งให้ลวดเดิน
	สั่งให้ลวดหยุดเดิน
	เปิดปั๊มน้ำมันหล่อเย็น
	ปิดปั๊มน้ำมันหล่อเย็น
	ปิด Submerge
	เปิด Submerge

ตัวอย่างชิ้นงานและตัวโปรแกรมของ Wire Cut EDM



การเขียนโปรแกรมคิดระยะโคออดิเนตถึงจุดที่กระทำ

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. J 0 ;

G01 X-20. Y-30. ;

G01 X-20. Y-10. ;

G02 X-10. Y-10. I 5. J 0 ;

G01 X-10. Y-20. ;

G02 X 0 Y-30. ;

G02 X30. Y-30. ;

G02 X30. Y-30. I 15. J 0 ;

G01 X30. Y0 ;

G03 X10. Y20. I-10. J 40. ;

G01 X0 Y30. ;

G41 H015 G01 X0 Y40. ;

M02

การเขียนโปรแกรมคิดระยะจุดหนึ่ง ไปอีกจุดหนึ่ง

G91 (INCREMENTAL)

G92 X0.Y40. ;

G41 H015 G01 X0 Y-10. ;

G41 H167 ;

G01 X-10. Y-10. ;

G02 X-20. Y0 I-10. J 0 ;

G01 X0 Y-50. ;

G01 X10. Y10. ;

G01 X0 Y10. ;

G02 X10. Y0 I5. J0 ;

G01 X0 Y-10. ;

G01 X10. Y-10. ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G02 X30. Y0 I15. J0 ;  
G01 X0 Y30. ;  
G03 X-20. Y20. I-10. J10. ;  
G01 X-10. Y10. ;  
G41 H015 G01 X0 Y10. ;  
M 02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

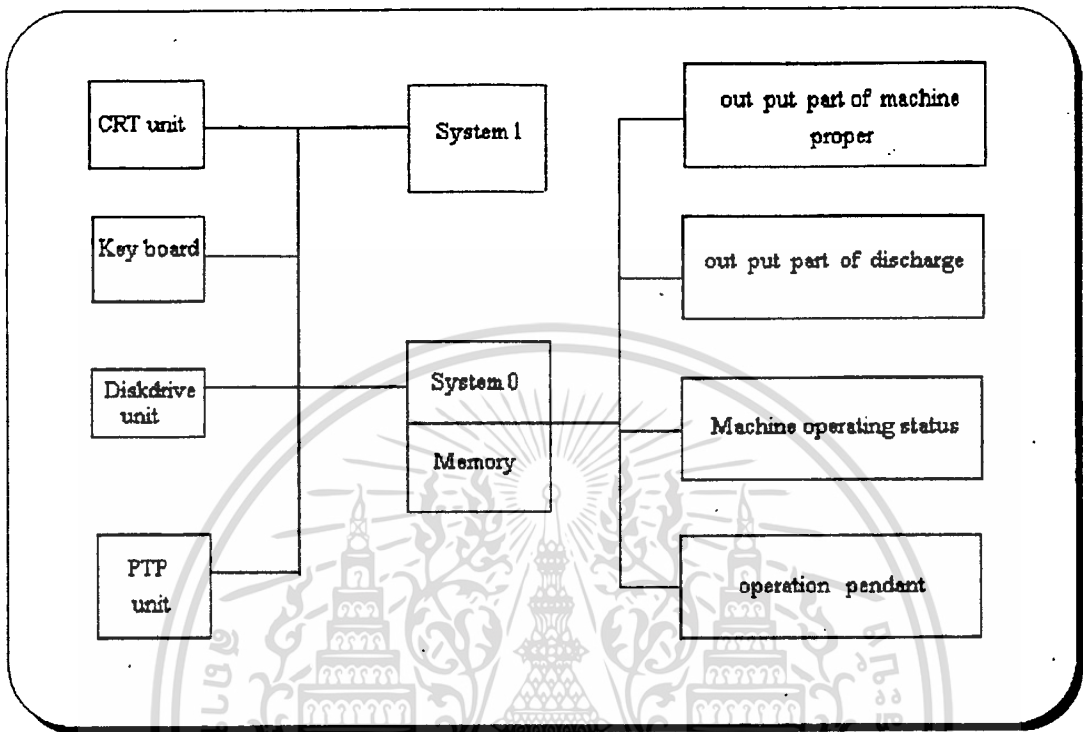
#### การวิเคราะห์ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

เครื่อง Wire Cut EDM ที่ใช้ตัดงานเพื่อทำการวิเคราะห์ผิวหยาบละเอียดนั้นใช้ เครื่อง CNC Wire Cut EDM ของบริษัท Sodick รุ่น A280 ตามรูป 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่อง CNC Wire Cut EDM

ระบบการทำงานของเครื่อง CNC Wire Cut EDM ซึ่งระบบควบคุมดังนี้



ลวดที่ใช้ทำการตัดเป็นแบบ SKG-20H (65 Cu-35 Zn) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.25 \pm 0.002$  mm. สามารถทนแรงดึงได้สูงสุด 95 kgf/mm<sup>2</sup>

**3.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการตัด**

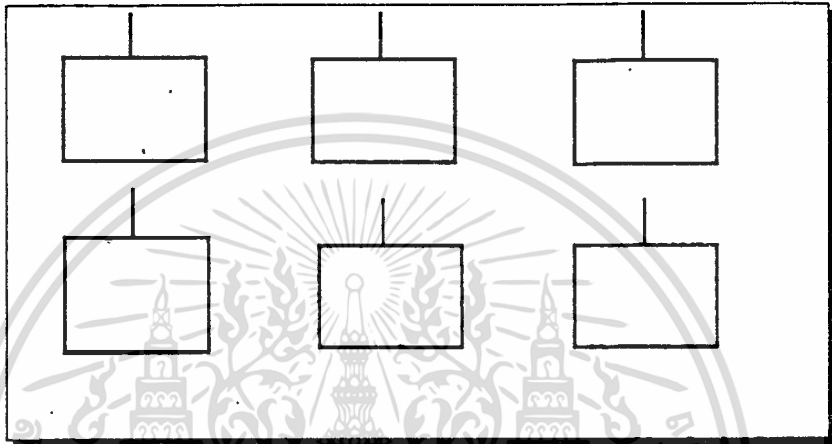
วัสดุชิ้นงานที่ใช้ทำการทดลองการตัดเป็นเหล็กทำเครื่องมือ (Tool steel) SKD-11 ขนาด 250X200X10 ซึ่งมีความแข็ง 58 HRC

ตาราง 3.1 ส่วนผสมของเหล็ก SKD-11

ชนิดของเหล็ก	ส่วนผสม							
	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	S	V
SKD 11	1.4	0.4	0.6	0.03	11	0.8	0.03	0.2
	≤				≤	≤		≤
	1.60	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	13	1.2	น้อยกว่า	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเตรียมชิ้นงาน นำเหล็ก SKD 11 ขนาด 250X200X10 มาเข้าเตาอบไฟฟ้า โดยตั้ง อุณหภูมิที่ 1150 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบในเตาประมาณ 20 นาที แล้วเอาออกจากเตานำมาชุบลงใน น้ำมันชุบ โดยจุ่มในน้ำมันชุบใช้เวลาประมาณ 7 นาที ต่อจากนั้น นำเข้าอบในเตาอบอีกครั้ง โดยตั้ง อุณหภูมิอบที่ 650 องศาเซลเซียสใช้เวลาอบประมาณ 1 ชั่วโมง ต่อจากนั้นก็เอาชิ้นงานออกจากเตาอบ และปล่อยให้เย็นในอุณหภูมิห้องเมื่อชิ้นงานเย็นดีแล้วก็เอามาทดสอบความแข็งแบบรอตเวลล์ ซึ่งจะได้ ประมาณ 58 HRC แต่ถ้าชิ้นงานมีความแข็งมากเกินไปก็ใช้เวลาอบให้มากขึ้นรูปแบบที่จะใช้ทดลองใน การตัดชิ้นงาน ดูได้จากรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบชิ้นงาน

ต่อจากนั้น นำชิ้นงานมาติดตั้งบนโต๊ะของเครื่อง Wire Cut EDM และป้อนโปรแกรมบน keyboard ดังนี้

```
G90  
G92 XO YO ;  
G41 H015 G01 XO Y-10. ;  
G41 H167 G01 X-10. Y-10. ;  
G01 X-10. Y-35. ;  
G01 X10. Y-35. ;  
G01 X10. Y-10. ;  
G01 XO Y-10. ;  
G41 H015 ;  
G01 XO YO ;  
M02
```

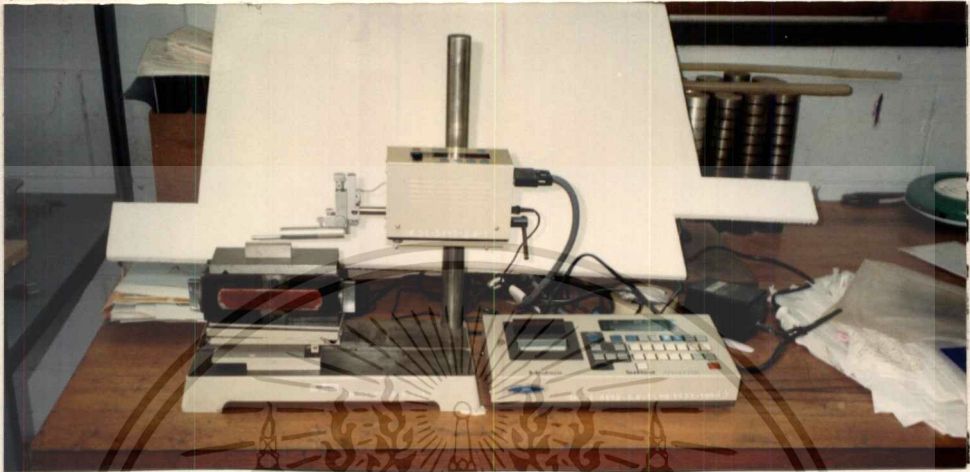
ในการตัดชิ้นงาน ชิ้นงานที่ตัดจะถูกเปลี่ยน PARAMETER ตามตัวแปลต่าง ๆ ดังนี้

- ก. IP (ปริมาณกระแสไฟฟ้า)
- ข. ON-OFF (เวลาเปิดปิดกระแสไฟฟ้า)

ค. Wire Tension (ความตึงในเส้นลวด)

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้วัดและวิธีการวัด

เครื่องมือที่ใช้วัดชิ้นงานเป็นเครื่องมือวัดความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานของ Mitutoyo surftest 402 รุ่น 178 ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวัดความหยาบละเอียดผิวชิ้นงาน

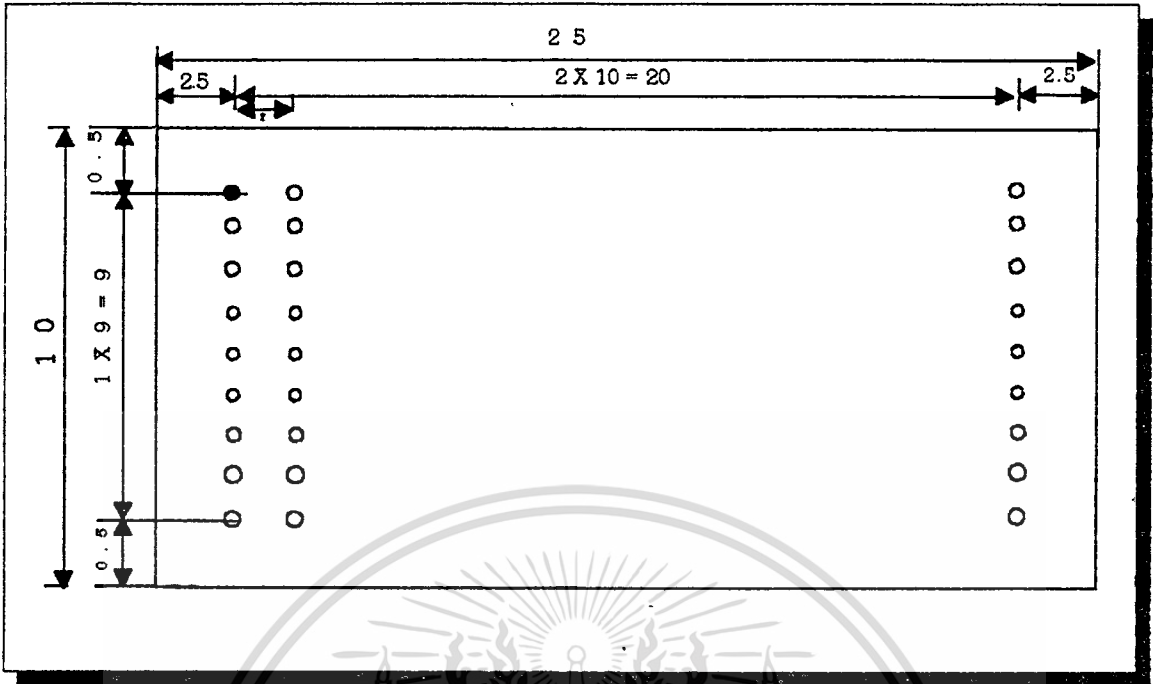
วิธีการวัดต้องนำชิ้นงานมากำหนดแกนวัดเป็นแกน X และแกน Y ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การกำหนดแกน X, Y ของชิ้นงาน

ต่อจากนั้น ก็ทำการวัดจุดต่าง ๆ ว่ามีค่าความหยาบละเอียด แต่ละจุดมีค่าเท่าไร ตามรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งจุดต่าง ๆ ที่ทำการวัด

3.3 ตัวโปรแกรมที่ใช้เขียนกราฟเพื่อการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#ifdef __TINY__
#error BGIDEMO will not run in the tiny model.
#endif

#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdarg.h>
#include <graphics.h>

#define ESC      0x1b          /* Define the escape key      */
#define TRUE     1            /* Define some handy constants */
#define FALSE    0            /* Define some handy constants */
#define PI       3.141592654  /* Define a value for PI      */
#define CU       72           /*                             */
#define CD       80           /*                             */
#define SCALE    0.9/5       /*                             */

char *LineStyle[] = {
    "SolidLn", "DottedLn", "CenterLn", "DashedLn", "UserBitLn"
};

int    GraphDriver;          /* The Graphics device driver */
int    GraphMode;           /* The Graphics mode value    */
double AspectRatio;         /* Aspect ratio of a pixel on the screen*/
int    MaxX, MaxY;          /* The maximum resolution of the screen */
int    MaxColors;           /* The maximum # of colors available */
int    ErrorCode;           /* Reports any graphics errors */
struct palettetype palette; /* Used to read palette info */
int    c;

/*
/*      Function prototypes
/*
void Initialize(void);
void Graph(void);
void Pause(int c);
void MainWindow(char *header);
void StatusLine(char *msg);
void DrawBorder(int left,int top,int right,int bottom,char *topics);
void changetextstyle(int font, int direction, int charsize);
int  gprintf(int xloc, int yloc, char *fmt, ... );
void highlite(int left,int top,int Color,char *topics);
void box(int left,int top,int right,int bottom);
/*
/*      Begin main function
/*

int main()
{
    Initialize();          /* Set system into Graphics mode */
    Graph();
    closegraph();         /* Return the system to text mode */
    return(0);
}

```

```
/* */
/* INITIALIZE: Initializes the graphics system and reports */
/* any errors which occurred. */
/* */

void Initialize(void)
{
    int xasp, yasp; /* Used to read the aspect ratio*/

    GraphDriver = DETECT; /* Request auto-detection */
    initgraph( &GraphDriver, &GraphMode, "" );
    ErrorCode = graphresult(); /* Read result of initialization*/
    if( ErrorCode != grOk ){ /* Error occured during init */
        printf(" Graphics System Error: %s\n",
            grapherrormsg( ErrorCode ) );
        exit( 1 );
    }

    getpalette( &palette ); /* Read the palette from board */
    MaxColors = getmaxcolor() + 1; /* Read maximum number of colors*/
    MaxX = getmaxx();
    MaxY = getmaxy(); /* Read size of screen */
    getaspectratio( &xasp, &yasp ); /* read the hardware aspect */
    AspectRatio = (double)xasp / (double)yasp; /* Get correction factor */
}

void box(int left,int top,int right,int bottom)
{
    setfillstyle(SOLID_FILL,LIGHTGRAY);
    bar(left,top,right,bottom);
    setcolor(DARKGRAY);
    line(left,top,left,bottom);
    line(left+1,bottom+1,right+1,bottom+1);
    setcolor(WHITE);
    line(left,bottom,right,bottom);
    line(left+1,top+1,left+1,bottom-1);
}

void highlite(int left,int top,int Color,char *topics)
{
    struct textsettingstype txtinfo;
    int height,width;
    gettextsettings(&txtinfo);
    height = textheight(topics);
    width = textwidth(topics);
    if (txtinfo.font) height++;
    setfillstyle(SOLID_FILL,Color);
    settextjustify(LEFT_TEXT,CENTER_TEXT);
    bar(left,top,left+width+15,top+height+10);
    setcolor(BLACK);
    rectangle(left+3,top+3,left+width+11,top+height+7);
    setcolor(Color+8);
    line(left+3,top+3,left+width+11,top+3);
    line(left+3,top+height+6,left+3,top+3);
    setcolor(BLACK);
    if (txtinfo.font) outtextxy(left+10,top+3*height/4,topics);
    else outtextxy(left+8,top+height+2,topics);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/* */
/* PAUSE: Pause until the user enters a keystroke. If the */
/* key is an ESC, then exit program, else simply return. */
/* */

void Pause(int ch)
{
    static char msg[] =
        "                Esc aborts or press a key...

    StatusLine(msg);                /* Put msg at bottom of screen */

    do{
        do ch=getch();while(ch!=0&ch!=ESC);
        if(ch==0)
            ch = getch();                /* Read a character from kbd */
        }while(ch!=CD&ch!=CU&ch!=ESC);
        c=ch;
    }

/* */
/* MAINWINDOW: Establish the main window for the demo and set */
/* a viewport for the demo code. */
/* */

void MainWindow( char *header )
{
    int height;

    cleardevice();                /* Clear graphics screen */
    setcolor( LIGHTGREEN );        /* Set current color to lightgreen */
    setviewport( 0, 0, MaxX, MaxY, 1 ); /* Open port to full screen */
    height = textheight( "H" );    /* Get basic text height */
    DrawBorder(0,0,MaxX,MaxY,header);
    changetextstyle( DEFAULT_FONT, HORIZ_DIR, 1 );

    setviewport( 0, height+4, MaxX, MaxY-(height+4), 1 );
    setviewport( 1, height+5, MaxX-1, MaxY-(height+5), 1 );
}

/* */
/* STATUSLINE: Display a status line at the bottom of the screen. */
/* */

void StatusLine( char *msg )
{
    setviewport( 0, 0, MaxX, MaxY, 1 ); /* Open port to full screen */
    changetextstyle( DEFAULT_FONT, HORIZ_DIR, 1 );
    highlight(4,457,LIGHTGREEN,msg);
    setcolor(WHITE);
    line(6,457,MaxX-4,457);
    setviewport( 1, 1, MaxX-1, MaxY-1, 1 );
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*
/*          DRAWBORDER:
/*
/*
*/
void DrawBorder(int left,int top,int right,
                int bottom,char *topics )
{
    int width;
    setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
    bar(0,0,MaxX,MaxY);
    setfillstyle(SOLID_FILL,LIGHTGRAY);
    bar(left+1,top+1,right-1,bottom-1);
    setcolor(BLACK);
    rectangle(left,top,right,bottom);
    rectangle(left+3,top+3,right-3,bottom-3);
    rectangle(left,top+22,right,bottom-22);
    rectangle(left+24,top,right-24,bottom);
    setfillstyle(SOLID_FILL,DARKGRAY);
    bar(left+7,top+11,left+22,top+14);
    bar(right-20,top+11,right-5,top+14);
    rectangle(left+6,top+10,left+21,top+13);
    rectangle(right-21,top+10,right-6,top+13);
    setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
    bar(left+4,top+23,right-4,bottom-4);
    bar(left+7,top+11,left+20,top+11);
    bar(right-20,top+11,right-7,top+11);
    setfillstyle(SOLID_FILL,LIGHTBLUE);
    bar(left+24,top+4,right-24,top+22);
    setcolor(WHITE);
    settextstyle(DEFAULT_FONT,HORIZ_DIR,1.6);
    settextjustify( LEFT_TEXT, TOP_TEXT );
    width = (right-left-textwidth(topics))/2 + 5;
    outtextxy(width,top+10,topics);
}

/*
/*          CHANGETEXTSTYLE: similar to settextstyle, but checks for
/*          errors that might occur whil loading the font file.
/*
*/
void changetextstyle(int font, int direction, int charsize)
{
    int ErrorCode;

    graphresult();
    settextstyle(font, direction, charsize);
    ErrorCode = graphresult();
    if( ErrorCode != grOk ){
        closegraph();
        printf(" Graphics System Error: %s\n", grapherrormsg( ErrorCode ) );
        exit( 1 );
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/* */
/* GPRINTF: Used like PRINTF except the output is sent to the */
/* screen in graphics mode at the specified co-ordinate. */
/* */

int gprintf( int xloc, int yloc, char *fmt, ... )
{
    va_list argptr; /* Argument list pointer */
    char str[140]; /* Buffer to build sting into */
    int cnt; /* Result of SPRINTF for return */

    va_start( argptr, fmt); /* Initialize va_ functions */
    cnt = vsprintf( str, fmt, argptr ); /* prints string to buffer */
    outtextxy( xloc, yloc, str ); /* Send string in graphics mode */
    yloc += textheight( "H" ) + 2; /* Advance to next line */
    va_end( argptr ); /* Close va_ functions */
    return( cnt ); /* Return the conversion count */
}
```

```
void Graph(void)
{
    int n,m,o;
    int workpiece;
    float Y_try;
    float X_ColS,X_ColE;
    float Y_ColS,Y_ColE;
    float X_Co,X_CoSub;
    float Y_Co,Y_CoSub;
    float V_Angle1,V_Angle2;
    int X_Plot[13][13],Y_Plot[13][13];
    int Z_Plot[13][13];
    int start,end;
    int XY_Plot[169];
    int X_Ref,Y_Ref;
    int SX_Ref,SY_Ref;
    int ON[] = { 6, 6, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 6, 6, 6, 6, 6 };
    int OFF[] = { 16,16,14,14,14,14,14,14,14,16,16,16,16,16 };
    int IP[] = { 17,17,17,16,15,14,16,16,16,17,17,16,15,14 };
    int MA[] = { 14,14,14,14,14,14,14,14,14,14,14,14,14,14 };
    int SV[] = { 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5 };
    int SF[] = { 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6 };
    int humidity[] = { 60,64,67,65,61,64,69,63,62,63,67,
        65,61,67 };
    float temp[] = { 24.0,24.6,24.7,24.6,25.1,24.5,24.3,
        24.5,24.3,24.6,24.4,24.2,24.5,24.3 };
    int Tension[] = { 340,500,500,500,500,500,340,
        390,740,390,740,500,500,500 };
    int Wire_Speed = 1;

    float Rmax[14],Rmin[14];
    float Ra[14][13][13] = {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.2 แสดงความลึกของพื้นผิวในแต่ละชั้นของชิ้นงาน

WORKPIECE No.1															
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	3.8764	4.2156	0.7932	2.9870	0.7624	-2.4651	2.5620	3.5615	4.7155	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-3.1445	-1.7820	-2.6992	3.7440	2.6687	0.4324	0.5440	1.2120	1.8997	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	4.5625	3.7274	0.0012	0.4450	1.7875	0.0641	3.9711	4.6545	3.1100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-2.1660	-1.4400	5.3212	-1.7506	3.7210	2.9790	1.8741	2.6450	4.7997	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-3.6621	-3.0104	-1.4624	-0.0200	3.0701	1.6263	2.8895	3.4775	1.9808	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-1.7271	0.0059	0.1792	2.9935	4.1131	3.9905	1.4145	1.2059	3.1100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-3.6245	-2.1915	2.3342	1.5645	1.8987	2.3650	4.3100	3.8144	1.9928	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.1135	3.6705	0.6211	2.7740	1.1155	2.8085	3.7640	1.9832	1.6265	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0720	2.1550	2.9935	1.7425	1.8865	3.7840	4.2770	2.1005	0.8764	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 340 gf
------------	-------------------	----------------



























```

    };
workpiece = 0;

```

```

do {
MainWindow("Surface Graphics Plotting");
  V_Angle1 = tan(23*PI/180);
  V_Angle2 = tan(60*PI/180);
  X_Ref = 300;
  Y_Ref = MaxY-200;
  for(m=0;m<13;m++)
  {
    X_Co = X_Ref - (8*m);
    Y_Co = Y_Ref - (8*m*V_Angle1);
    for(n=0;n<13;n++)
    {
      X_CoSub = X_Co+(10*n);
      Y_CoSub = Y_Co-(5*n*V_Angle2);
      X_Plot[m][n] = X_CoSub;
      Y_Plot[m][n] = Y_CoSub;
      Z_Plot[m][n] = Y_Plot[m][n]
                    -ceil(Ra[workpiece][m][n]*10*SCALE);
    }
  }

/*===== Graph A =====*/
setcolor(BLUE);
for(m=0;m<=11;m++)
  for(n=0;n<=11;n++)
  {
line(X_Plot[m][n],Z_Plot[m][n],X_Plot[m+1][n],Z_Plot[m+1][n]);
line(X_Plot[m][n],Z_Plot[m][n],X_Plot[m][n+1],Z_Plot[m][n+1]);
line(X_Plot[m][12],Z_Plot[m][12],X_Plot[m+1][12],Z_Plot[m+1][12]);
line(X_Plot[12][m],Z_Plot[12][m],X_Plot[12][m+1],Z_Plot[12][m+1]);
  }
  line(X_Ref-110,(Y_Ref-110*V_Angle1),X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1));
  line(X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1),
        X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1)-36*SCALE*5/3);
  line(X_Ref-110,(Y_Ref-110*V_Angle1)-36*SCALE*5/3,
        X_Ref-122,Y_Ref-122*V_Angle1-36*SCALE*5/3);
  outtextxy(X_Ref-106,Y_Ref-45,"0");
  outtextxy(X_Ref-106,Y_Ref-(51+30*SCALE*5/3),"5");
/* =====*/

/* ===== Graph B =====*/
line(X_Ref-120,Y_Ref+60+20,X_Ref-105,Y_Ref+60+20);
line(X_Ref-120,Y_Ref+60+20,X_Ref-120,Y_Ref+(60+20-30*SCALE*5/3));
line(X_Ref-120,Y_Ref+(60+20-30*SCALE*5/3),X_Ref-105,
      Y_Ref+(60+20-30*SCALE*5/3));
outtextxy(X_Ref-100,Y_Ref+60+20,"0");
outtextxy(X_Ref-100,Y_Ref+34+20+30*SCALE*5/3,"5");
SX_Ref = X_Ref - 70;
SY_Ref = Y_Ref + 60 + 20;
for(m=0;m<12;m++)
  for(n=0;n<12;n++)
  {
    start = ceil(Ra[workpiece][m][n]*10*SCALE);
    end   = ceil(Ra[workpiece][m][n+1]*10*SCALE);
    line(SX_Ref+n*10,SY_Ref-start,(SX_Ref+(n+1)*10),SY_Ref-end);
  }
}
/*=====*/

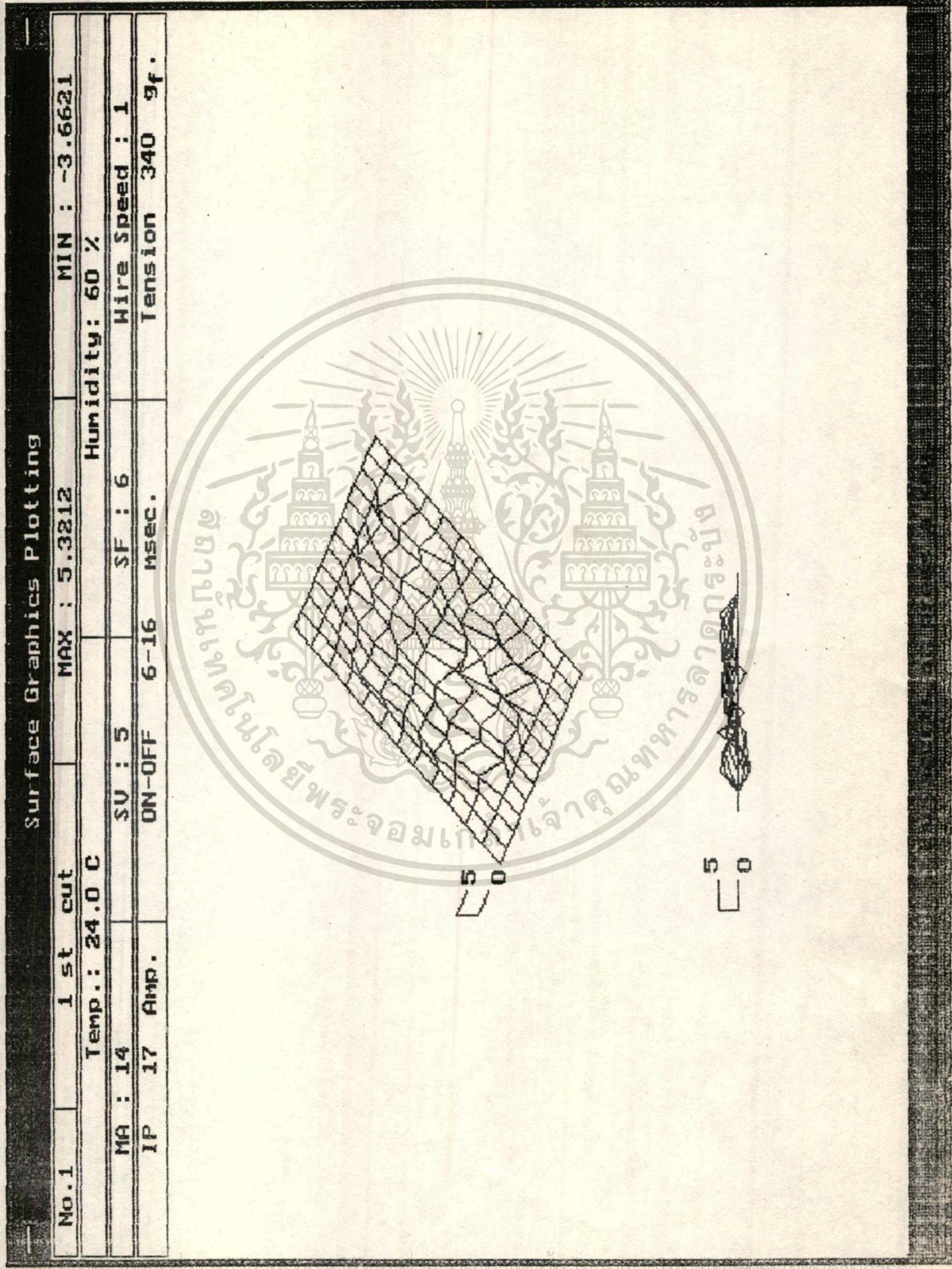
```

```
gprintf(20,14,"No.%d ",workpiece+1);
rectangle(4,11,MaxX-6,23);
rectangle(4,11,80,23);
gprintf(100,14," 1 st cut");
rectangle(255,11,440,23);
rectangle(MaxX/2,25,MaxX-6,38);
gprintf(MaxX/6,28,"Temp.: %2.1f C",temp[workpiece]);
gprintf(410,28,"Humidity: %2d %",humidity[workpiece]);
rectangle(4,25,MaxX-6,38);
setcolor(RED);
gprintf(57,43,"MA : %d",MA[workpiece]);
gprintf(227,43,"SV : %d",SV[workpiece]);
gprintf(355,43,"SF : %d",SF[workpiece]);
gprintf(480-10,43," Wire Speed : %d",Wire_Speed);
gprintf(MaxX/3+13,57,"ON-      %d-",ON[workpiece]);
gprintf(MaxX/3+13,57,"  OFF      %d msec.",OFF[workpiece]);
gprintf(57,57,"IP %d Amp.",IP[workpiece]);
gprintf(468+10,57,"Tension %d g .",Tension[workpiece]);
gprintf(467+10,61,"      f");
rectangle(4,40,MaxX-6,52);
rectangle(4,54,MaxX-6,69);
line(175,40,175,52);
line(MaxX/2,40,MaxX/2,52);
line(MaxX/2+120,40,MaxX/2+120,52);
line(175,54,175,69);
line(MaxX/2+120,54,MaxX/2+120,69);
Rmax[workpiece]=0.0;
Rmin[workpiece]=10000.0;
for(m=2;m<11;m++)
  for(n=2;n<11;n++)
  {
    if(Rmax[workpiece]<=Ra[workpiece][m][n])
      Rmax[workpiece] = Ra[workpiece][m][n];
    if(Rmin[workpiece]>=Ra[workpiece][m][n])
      Rmin[workpiece] = Ra[workpiece][m][n];
  }
gprintf(300,14,"MAX : %2.4f",Rmax[workpiece]);
gprintf(500,14,"MIN : %2.4f",Rmin[workpiece]);

Pause(c);
if(c==CD){ if(workpiece==0)
            workpiece=13;
            else
            --workpiece;
          };
if(c==CU){ if(workpiece==13)
            workpiece=0;
            else
            ++workpiece;
          };
}
while(c!=ESC);
exit(0);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

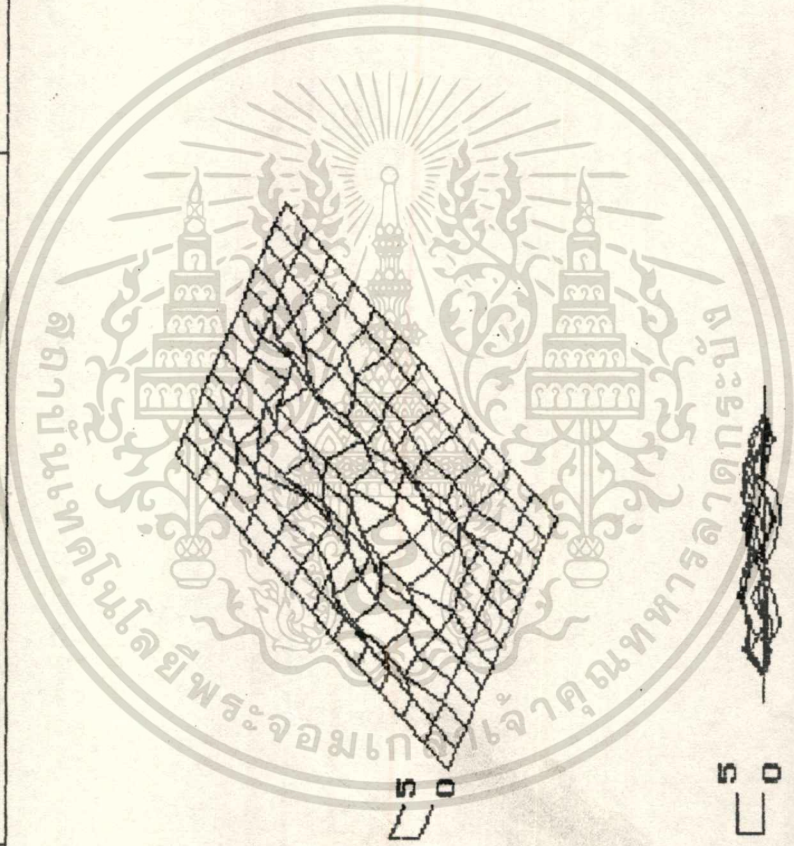
รูปที่ 3.6 แสดงความยาวของพื้นผิวในแต่ละชั้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาคู่เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ในการนำ  
 ไปทำการผลิตหรือสิ่งอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

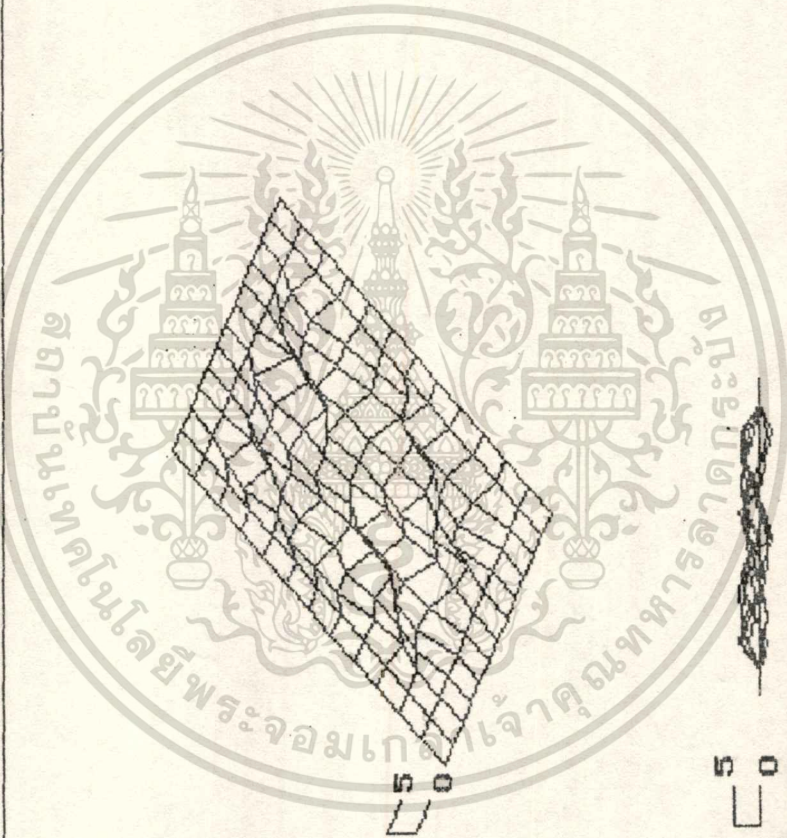
No.2	1 st cut	MAX : 5.1120	MIN : -3.7829
	Temp.: 24.6 C	Humidity: 64 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 17 AMP.	ON-OFF 6-16	msec.	Tension 500 gf.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

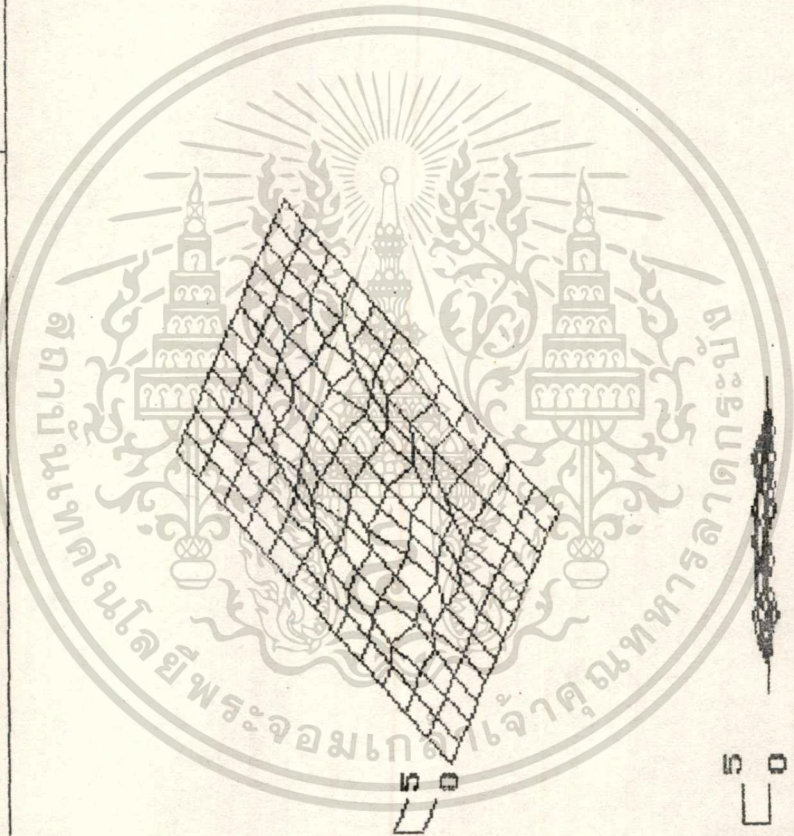
No.3	1 st cut	MAX : 4.0101	MIN : ~3.0015
	Temp.: 24.7 C	Humidity: 67 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 17 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 gf.	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

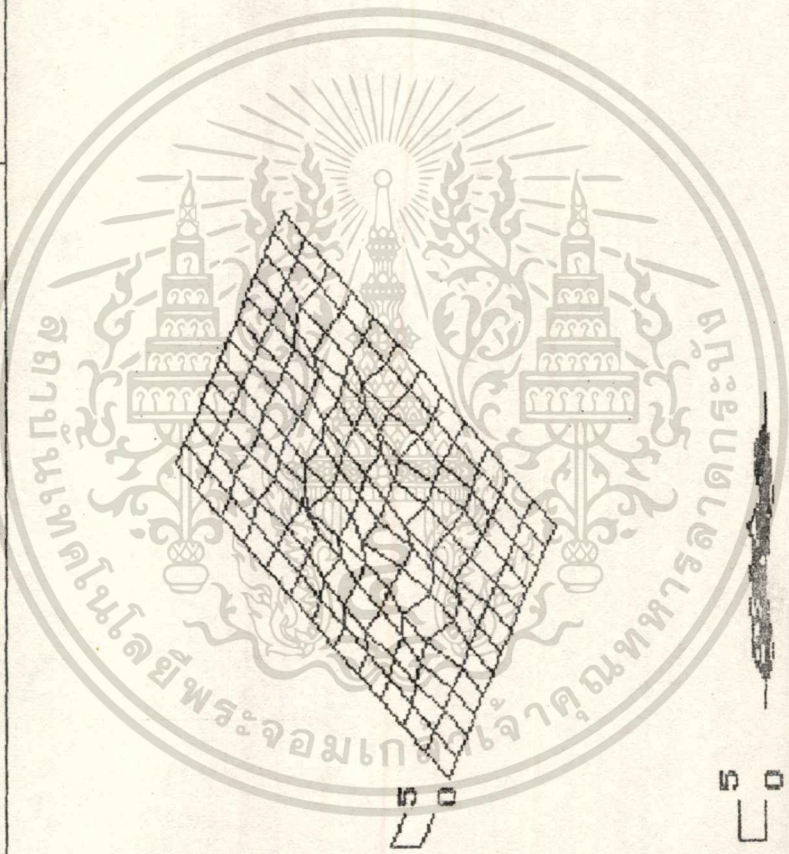
No.4	1 st cut	MAX : 3.0019	MIN : -2.4067
	Temp.: 24.6 C	Humidity: 65 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 16 AMP.	ON-OFF	4-14 msec.	Tension 500 gf.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

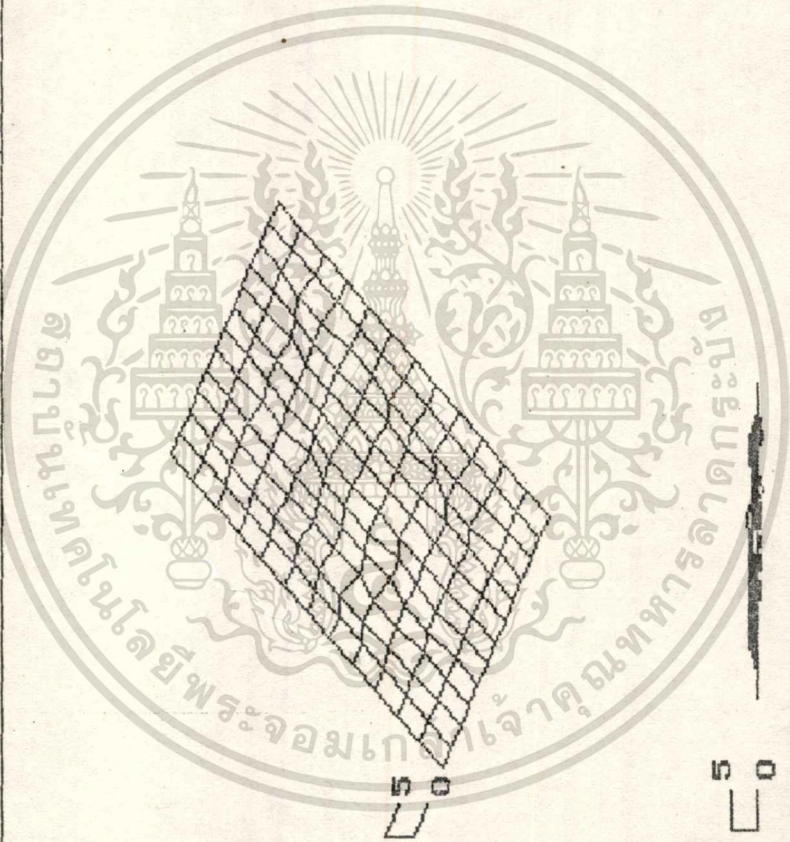
Surface Graphics Plotting

No.5	1 st cut	MAX : 3.4400	MIN : -1.7870
	Temp.: 25.1 C	Humidity: 61 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 15 Amp.	ON-OFF	4-14 msec.	Tension 500 gf.



Surface Graphics Plotting

No.6	1 st cut	MAX : 2.0332	MIN : -1.3556
	Temp. : 24.5 C	Humidity: 64 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 14 Amp.	ON-OFF 4-14	Tension 500 gf.	

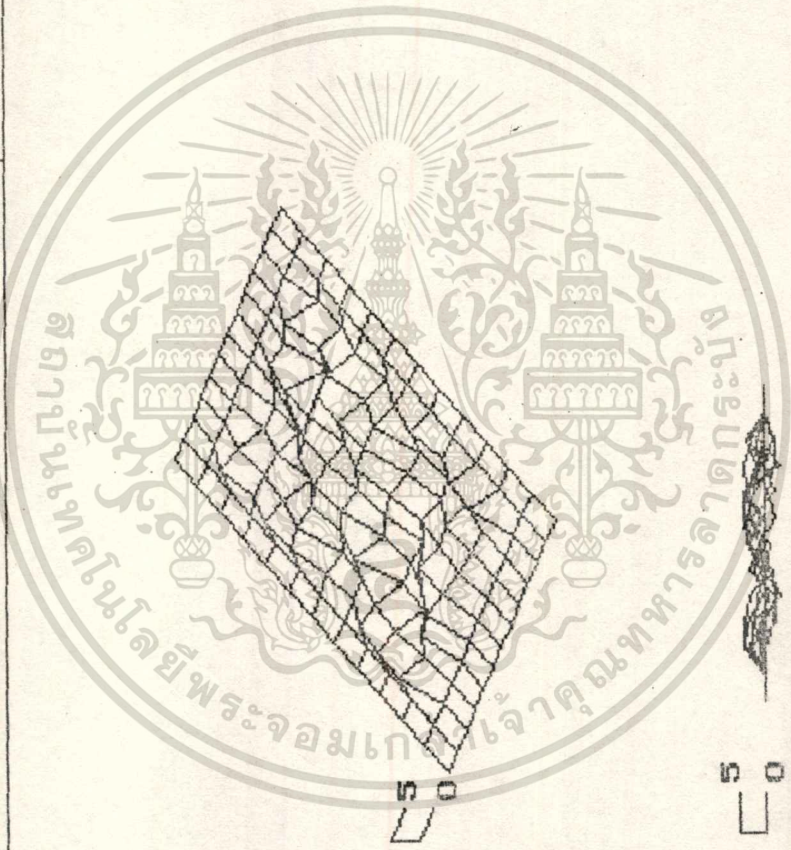


50

50

Surface Graphics Plotting

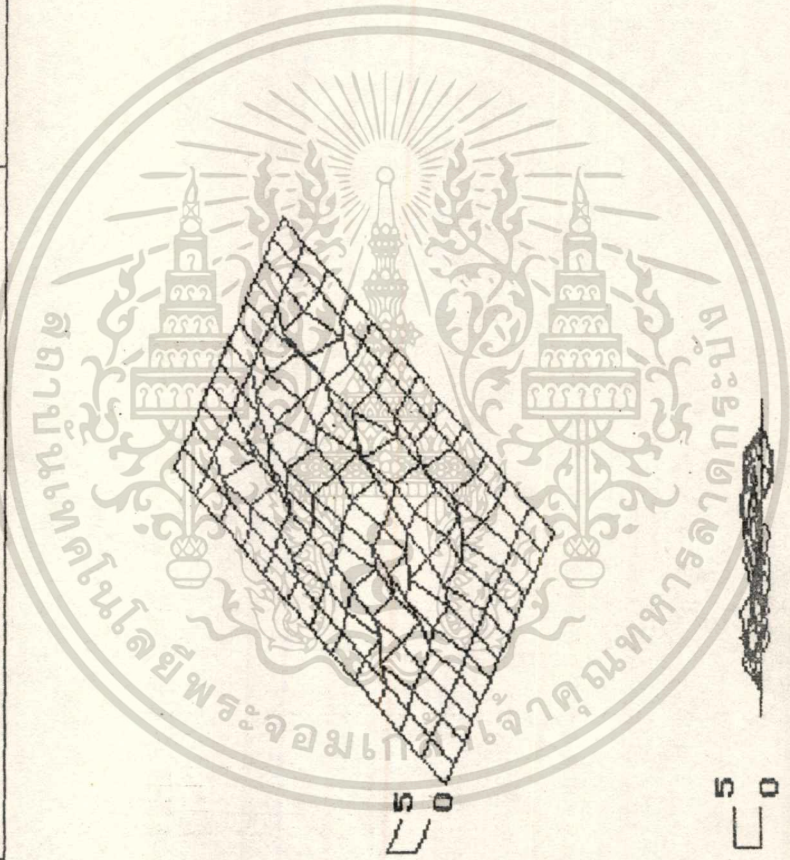
No.7	1 st cut	MAX : 4.1000	MIN : -3.7808
	Temp.: 24.3 C		Humidity: 69 %
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.		Tension 340 gf.



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

No.8	1 st cut	MAX : 4.2104	MIN : -2.6550
	Temp.: 24.5 C	Humidity: 63 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 390 gf.	

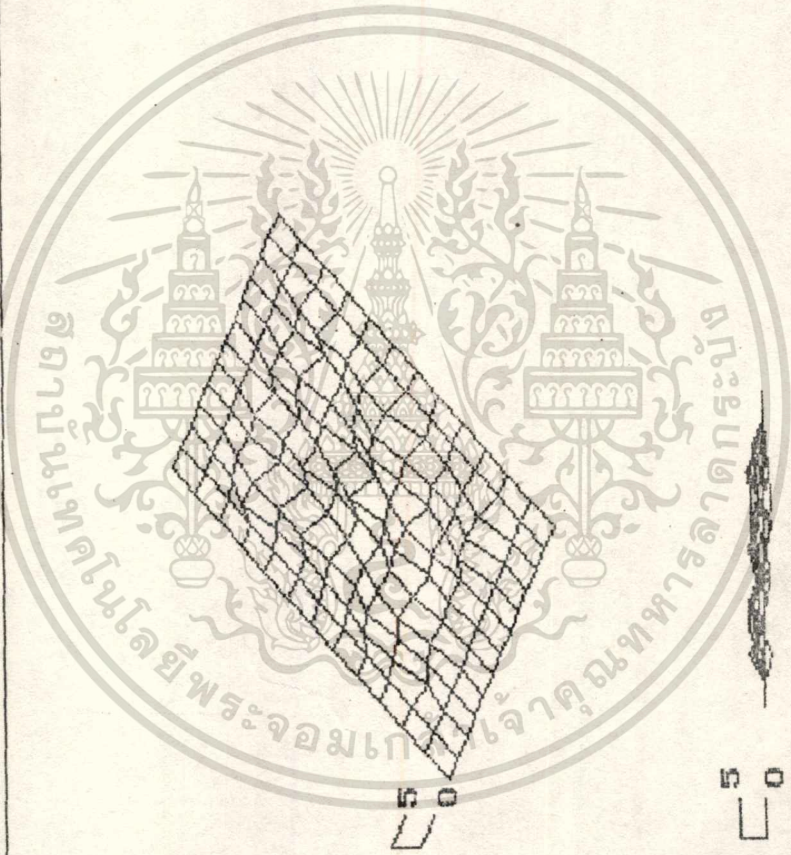


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีผู้ละเมิดลิขสิทธิ์โดยไม่ได้รับอนุญาตทางราชการจะดำเนินการตามกฎหมายต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

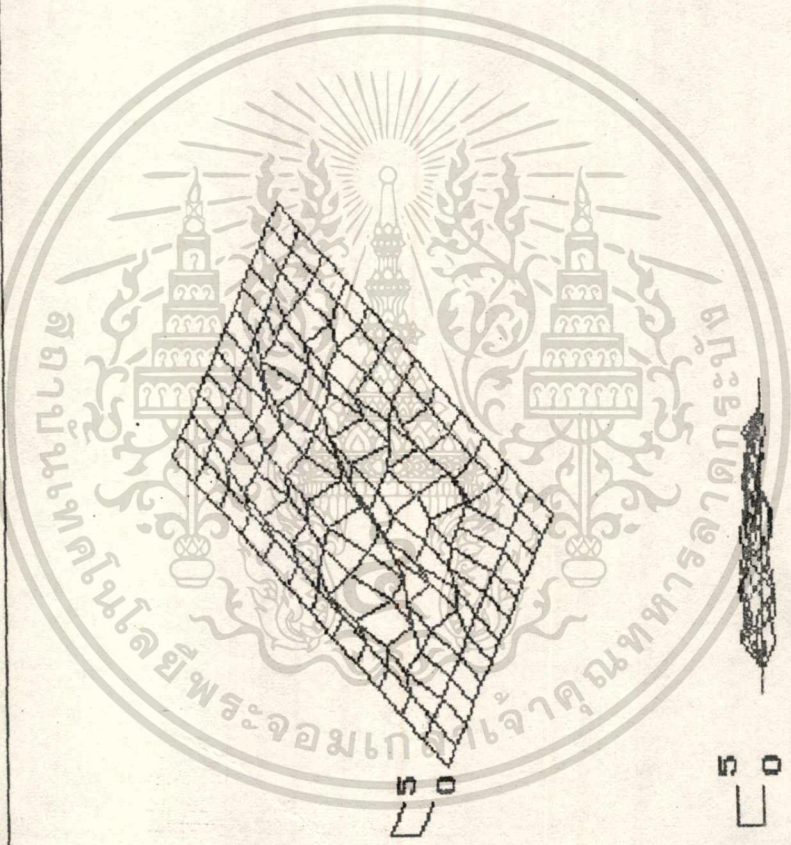
Surface Graphics Plotting

No.9	1 st cut	MAX : 3.4435	MIN : -2.1004
	Temp.: 24.3 C	Humidity: 62 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 16 Amp.	ON-OFF	4-14 msec.	Tension 740 gf.



Surface Graphics Plotting

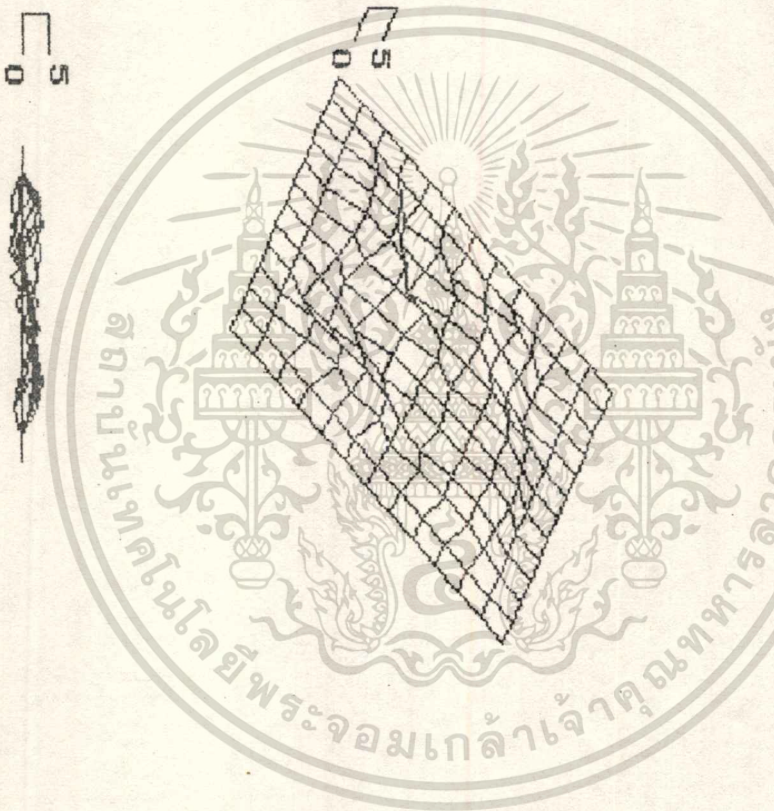
No.10	1 st cut	MAX : 4.5312	MIN : -3.2838
	Temp.: 24.6 C	Humidity: 63 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Hire Speed : 1
IP 17 Amp.	ON-OFF 6-16	msec.	Tension 390 gf.



เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงานวิชาหการรงงานเพอการศกษาแทนน ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไมวารณใด ๆ ทั้งสิ้น อิกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

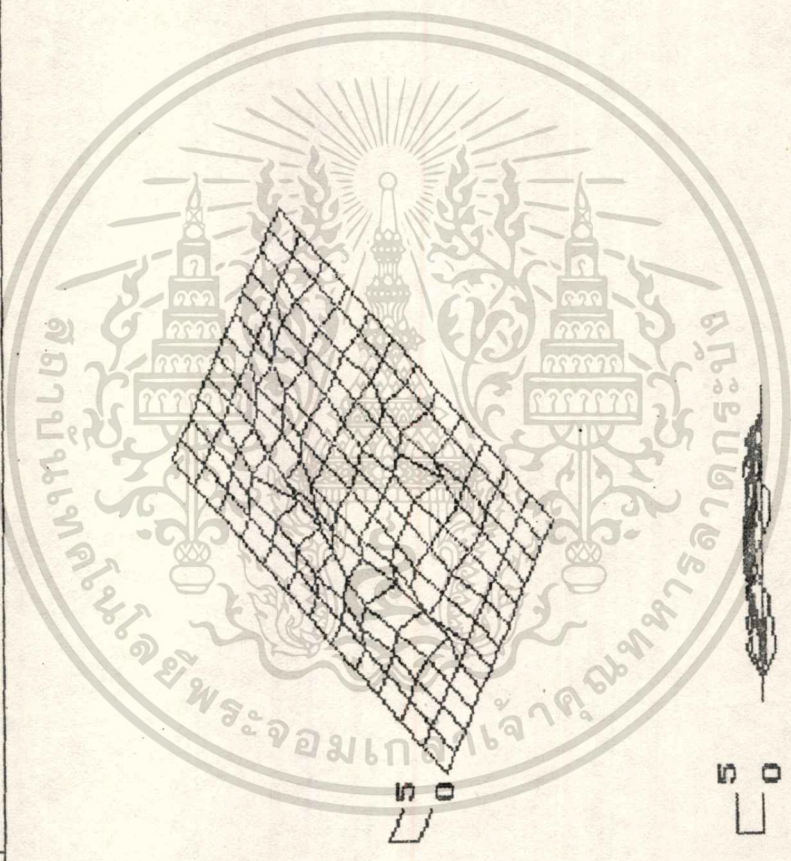
No. 11	1 st cut	MAX : 4.0020	MIN : -2.7871
	Temp. : 24.4 C	Humidity : 67 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Mire Speed : 1
IP 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 740 gf.	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

No.12	1 st cut	MAX : 3.7800	MIN : -2.7981
	Temp.: 24.2 C	Humidity: 65 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 16 Amp.	ON-OFF	6-16 msec.	Tension 500 gf.

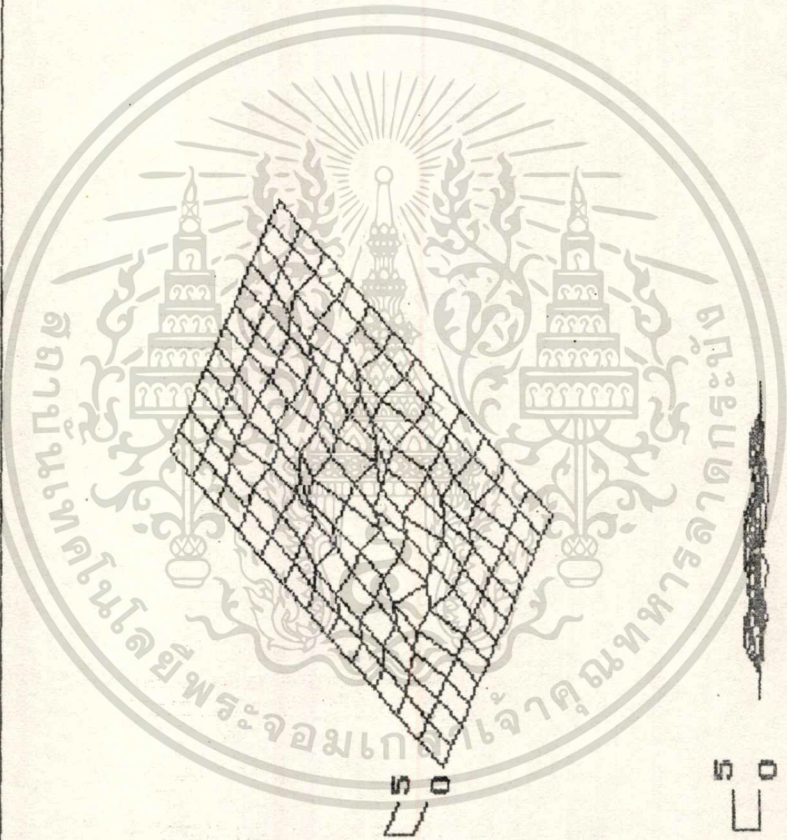


5 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่สามารถแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

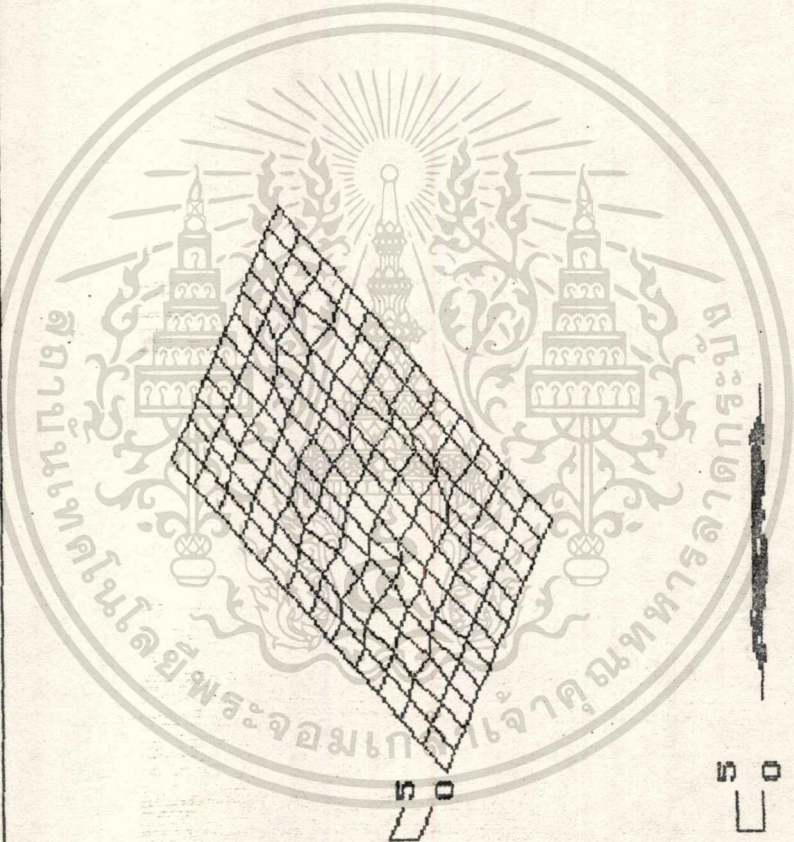
No.13	1 st cut	MAX : 3.2412	MIN : -2.1744
	Temp.: 24.5 C	Humidity: 61 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 15 AMP.	ON-OFF 6-16	msec.	Tension 500 gf.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Surface Graphics Plotting

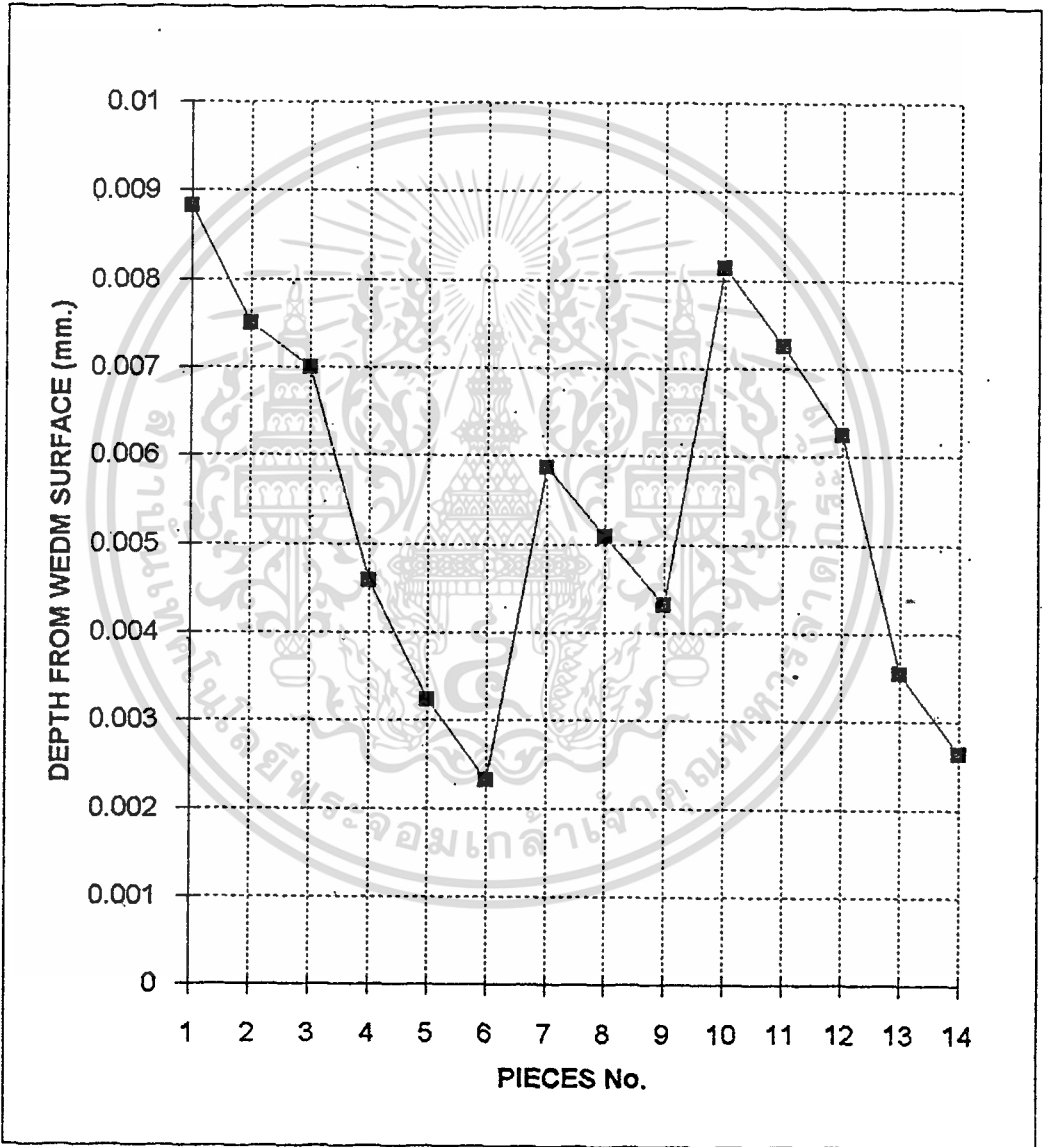
No.14	1 st cut	MAX : 1.7823	MIN : -1.2110
	Temp.: 24.3 C	Humidity: 67 %	
MA : 14	SU : 5	SF : 6	Wire Speed : 1
IP 14 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 gf.	



PIECES No.	Ip. (Amp.)	ON-OFF (msec.)	TENSION (gf)	DEPTH (mm.)
1	17	6-16	340	0.0088273
2	17	6-16	500	0.0074957
3	17	4-14	500	0.0070051
4	16	4-14	500	0.0045872
5	15	4-14	500	0.0032323
6	14	4-14	500	0.0023215
7	16	4-14	340	0.0058725
8	16	4-14	390	0.0050915
9	16	4-14	740	0.0043156
10	17	6-16	390	0.0081376
11	17	6-16	740	0.0072528
12	16	6-16	500	0.0062469
13	15	6-16	500	0.0035458
14	14	6-16	500	0.0026354

ตารางที่ 3-3 แสดงค่าความลึกเฉลี่ยของผิวชิ้นงานของแต่ละชิ้น

กราฟที่ 3.1 แสดงค่าความลึกเฉลี่ยที่พารามิเตอร์ต่างๆ

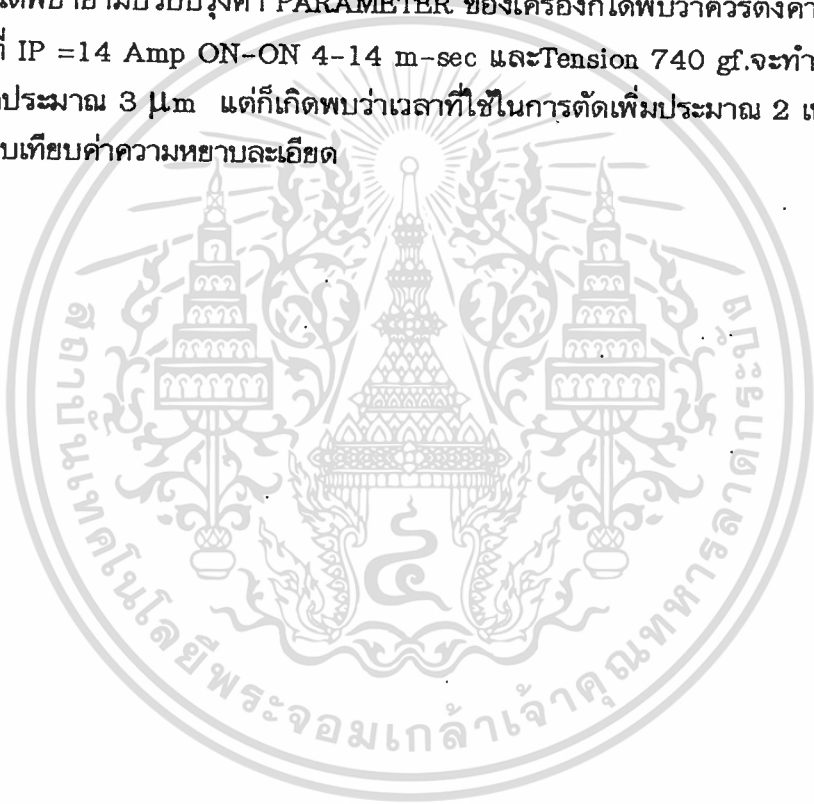


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ผลของการวิเคราะห์

ก่อนที่จะมีการปรับแต่ง PARAMETER ต่าง ๆ เครื่อง Wire Cut EDM ได้ถูกตั้ง PARAMETER ไว้ที่ IP=17 Amp ON-OFF 6-16 m-sec และ Tension 340 gf. ซึ่งเมื่อตัดชิ้นงานออกมาแล้วจะให้ค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานประมาณ 8  $\mu\text{m}$  เนื่องจากกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูงไป และระยะเวลาในการเปิดปิดนานเกินไปแล้วลดหย่อนมาก จึงทำให้ผิวชิ้นงานค่อนข้างหยาบ

ผู้วิจัยได้พยายามปรับปรุงค่า PARAMETER ของเครื่องก็ได้พบว่าควรตั้งค่า PARAMETER ของเครื่องไว้ที่ IP =14 Amp ON-ON 4-14 m-sec และ Tension 740 gf. จะทำให้ผิวงานมีความละเอียดดีที่สุดในประมาณ 3  $\mu\text{m}$  แต่ก็เกิดพบว่าเวลาที่ใช้ในการตัดเพิ่มประมาณ 2 เท่า ซึ่งจะดูได้จากกราฟการเปรียบเทียบค่าความหยาบละเอียด



## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงาน

เครื่อง Wire Cut EDM ที่ใช้ตัดงานเพื่อทำการวิเคราะห์ความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงานใช้เครื่อง CNC Wire Cut EDM ของบริษัท Sodick รุ่น A280 ตามรูปที่ 3.1 ในบทที่ 3 ลวดที่ใช้ในการตัดเป็นแบบ SKD-20H (65 Cu-35 Zn) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.25 \pm 0.002$  mm สามารถทนแรงดึงได้สูงสุด  $95 \text{ kgf /mm}^2$

#### 4.1 วัสดุชิ้นงานและวิธีการวัด

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ทำการทดลองเป็นเหล็กเครื่องมือ (Tool steel) SKD-11 ขนาด 15X15X90

ตาราง 4.1 ส่วนผสมของเหล็ก SKD 11

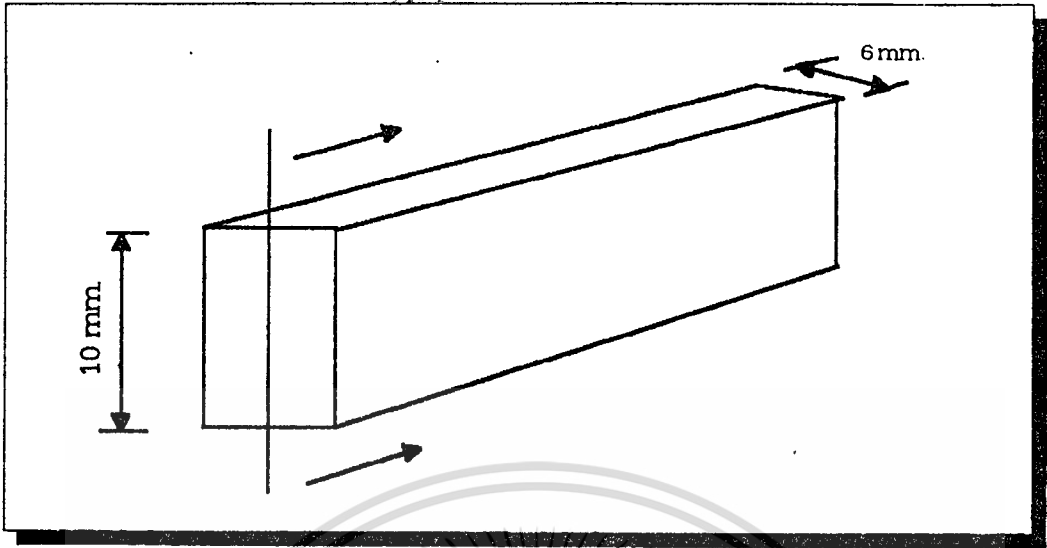
ชนิดของเหล็ก	ส่วนผสม							
	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	S	V
SKD 11	1.4	0.4	0.6	0.03	11	0.8	0.03	0.2
	§				§	§		§
	1.60	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	13	1.2	น้อยกว่า	0.5

วิธีเตรียมชิ้นงานนำเหล็ก SKD11 ขนาด 15X15X90 มม. ทำการไสให้ได้ขนาด 10.8X6.5X88 มม. ต่อจากนั้นก็นำชิ้นงานมาเจียรนัยด้าน 10.8 และด้าน 6.5 มม. โดยทำการเจียรนัยทั้ง 4 ด้าน ให้ได้ขนาด 10X6X88 มม. ต่อจากนั้นก็นำชิ้นงานเข้าเตาอบไฟฟ้า โดยตั้งอุณหภูมิที่ 1150 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบในเตาประมาณ 20 นาที แล้วนำชิ้นงานออกจากเตามาชุบลงในน้ำมันชุบ โดยจุ่มในน้ำมันชุบใช้เวลาประมาณ 5 นาที ต่อจากนั้นก็นำเหล็กมาเข้าเตาอบอีกครั้ง โดยตั้งอุณหภูมิที่เตา 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 60 นาที ต่อจากนั้นก็นำชิ้นงานออกจากเตาอบแล้วปล่อยให้เย็นลงในอากาศธรรมดา เมื่อชิ้นงานเย็นดี แล้วก็นำชิ้นงานมาทดลองความแข็งจะได้ความแข็งประมาณ 58 HRC.

#### วิธีการตัด

จะจับชิ้นงานด้วยจิ๊กจับชิ้นงานโดยจะตัดผ่านชิ้นงานด้านหนา 6 มม. ดูได้จากรูป 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อตัด

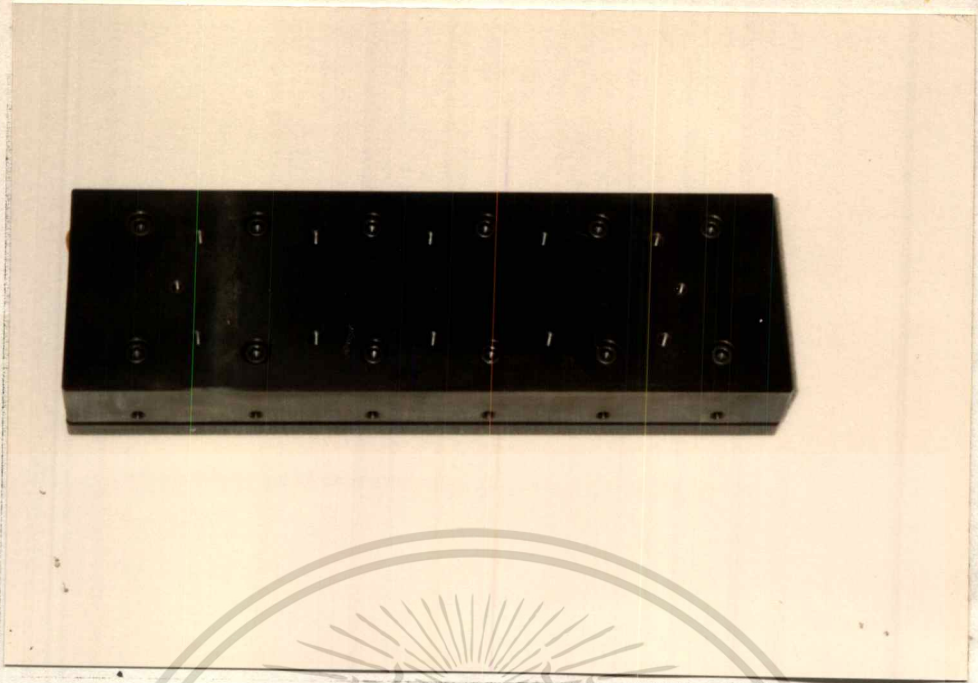
เมื่อประกอบชิ้นงานเข้ากับจิ๊กบนโต๊ะของเครื่อง CNC Wire Cut EDM เรียบร้อยแล้วก็ทำการตัดโดยเปลี่ยนPARAMETER ตามตัวแปรดังต่อไปนี้

- ก. IP (ปริมาณกระแสไฟฟ้า)
- ข. ON-OFF (เวลาเปิดปิดกระแสไฟฟ้า)
- ค. Wire Tension (ความตึงในเส้นลวด)

#### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัด และวิธีการวัด

##### 4.2.1 ลางเลื่อน (Slide way)

เป็นลางเลื่อนที่ให้ความเที่ยงตรงสูง โดยเมื่อเลื่อนระยะทาง 100 มม. ค่าความผิดพลาดไม่เกิน 2  $\mu\text{m}$  เป็นของ THK รุ่น VRU 6810-T9140 ตามรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ล่างเลื่อน

#### 4.2.2 ฐานยึดชิ้นงาน

สามารถปรับความสูงค่าได้ เวลาติดตั้งจะใช้ดินน้ำมันเป็นตัวยึดไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ตอนเวลาตรวจวัด โดยฐานยึดชิ้นงานจะเป็นแท่งเหล็ก 2 แผ่น ที่ด้านหนึ่งจะกัดเป็นรูปตัววี และอีกด้านหนึ่งจะทำเกลียวเพื่อที่จะเอาสกรูมาใส่ไว้ใช้ในการปรับชิ้นงาน ตามรูป 4.3

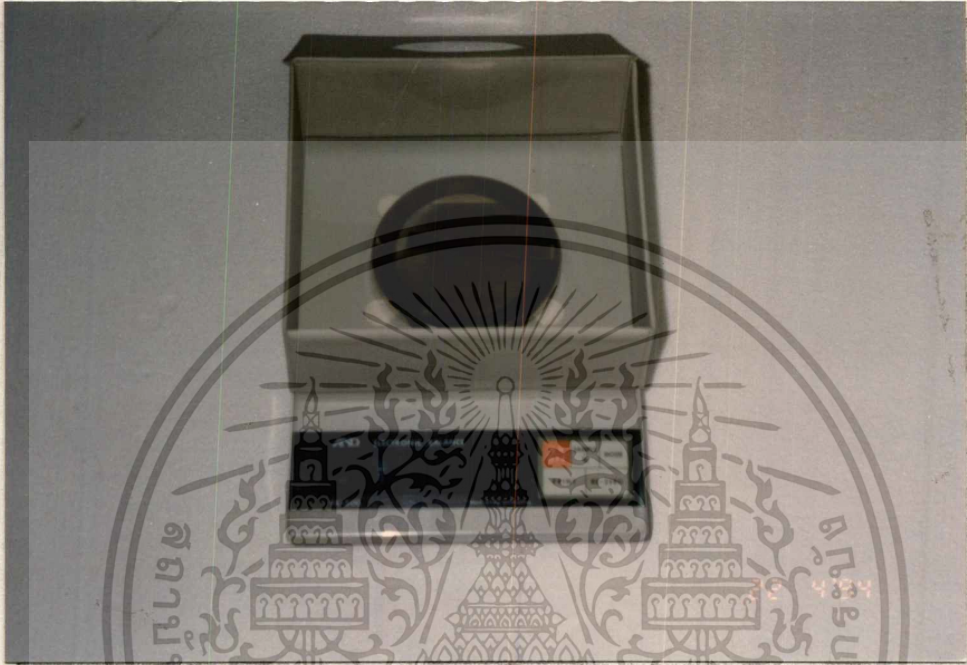


รูปที่ 4.3 ฐานยึดจับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์แสดงผลด้วยระบบดิจิทัล

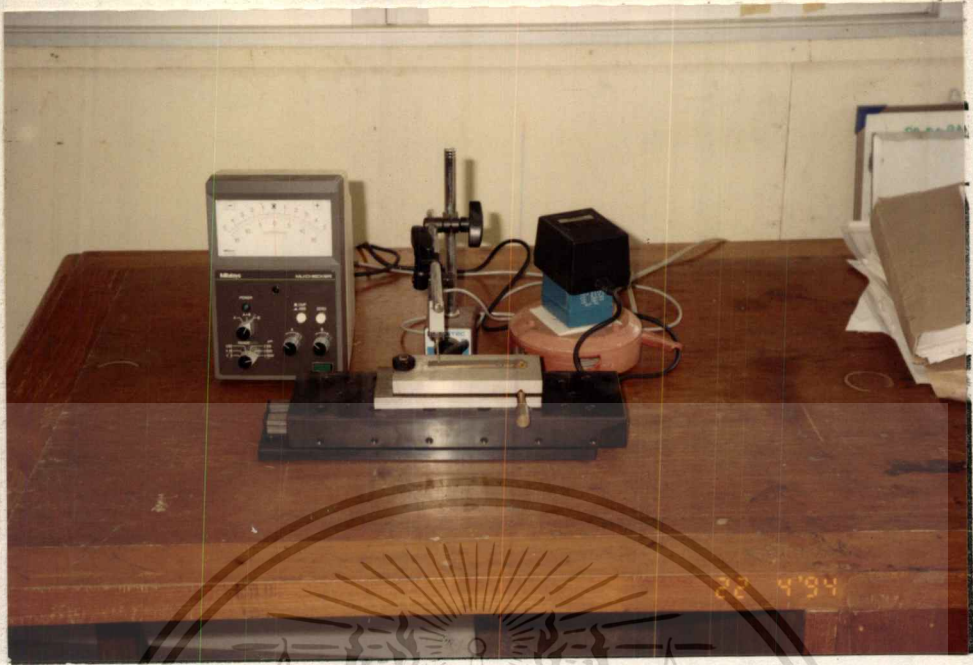
เป็นเครื่องชั่งที่ให้ค่าความละเอียด ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเป็นหน่วยมิลลิกรัม เป็นของ AND Electronic Balance รุ่น FX-300 ดูได้จากรูป 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.2.4 เครื่องวัดความโก่ง (MU-Checker)

ใช้วัดว่าความโก่งของชิ้นงาน ซึ่งให้ค่าความละเอียดถึง  $0.1 \mu\text{m}$  เป็นของ Mitutoyo รุ่น M403 ตามรูป 4.5



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดความโค้ง (MU-Checker)

#### 4.2.5 Parafin

ใช้สำหรับทำชิ้นงานทุกด้านเว้นแต่ด้านที่ตัดด้วย Wire Cut EDM

#### 4.2.6 กรดไนตริก

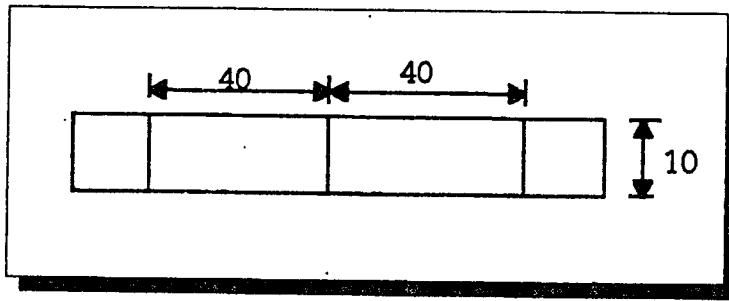
เข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเอาไว้กัดชิ้นงาน

#### 4.2.7 Methyl Alcohol

เอาไว้มสมกับกรดไนตริก เพื่อให้กรดไนตริกเจือจางลงเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์

#### 4.2.8 วิธีการทดสอบการวัด

1. นำชิ้นงานที่ตัดด้วย Wire Cut EDM ด้วยการเปลี่ยน PARAMETER ต่าง ๆ ด้านที่ตัดมา Lay out gauge length ตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การ Lay out gauge length

2. การนำชิ้นงานมาทำความสะอาดโดยใช้ Methyl alcohol เช็ดให้ทั่วชิ้นงาน
3. ใช้เวอร์เนียร์วัดขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นทดสอบโดยขนาดต่าง ๆ ที่วัดจะต้องทำการวัด 3 ตำแหน่งแล้วนำค่าที่วัดมาเฉลี่ยทั้ง 3 จุดบนชิ้นงาน แล้วจดข้อมูลเอาไว้
4. นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ แล้วจดข้อมูลเอาไว้
5. นำชิ้นงานไปติดตั้งบนแท่นวัดความโค้งของชิ้นงาน โดยเอาดินน้ำมันติดหัวและท้ายของชิ้นงานต้องไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ ในเวลาทำการทดสอบ นำเครื่องวัดความโค้งมาตรวจจุดที่ทำการ Lay out ทั้ง 3 จุดบนชิ้นงานโดยการปรับจุดหัวและจุดท้ายให้เป็นศูนย์ และวัดจุดตรงกลางว่ามีความโค้งเท่าไร หน่วยเป็น  $\mu\text{m}$  ในการติดตั้งชิ้นงานให้เอาด้านที่ติดอยู่ด้านบน
6. นำ Parafin อุ่นให้ร้อนเพื่อจะทำให้ Parafin เป็นของเหลว ต่อจากนั้นก็นำปรอทมาจุ่ม Parafin และทาบนชิ้นงานทุกด้าน เว้นแต่เฉพาะด้านที่ตัดด้วย Wire Cut EDM
7. นำชิ้นทดสอบมากัดในกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 10 วินาที (ขั้นต่อไปใช้เวลา 20 วินาที  $\Rightarrow$  30 วินาที  $\Rightarrow$  1 นาที  $\Rightarrow$  2 นาที  $\Rightarrow$  3 นาที  $\Rightarrow$  4 นาที  $\Rightarrow$  5 นาที  $\Rightarrow$  7 นาที  $\Rightarrow$  9 นาที)
8. นำชิ้นงานทดสอบขึ้นจากกรดไนตริกและล้างด้วยน้ำ ต่อจากนั้นก็แกะ Parafin แล้วนำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนัก และทำการวัดค่าความโค้งตามขั้นตอนที่ 5
9. นำชิ้นทดสอบชิ้นเดิมมา Coat Parafin ตามขั้นตอนที่ 6 แล้วนำมากัดในกรดไนตริกตามขั้นตอนที่ 7 แต่เปลี่ยนเวลาจุ่มให้นานเป็นเวลา 20 วินาที ต่อจากนั้นก็ทำตามขั้นตอนที่ 8
10. จะทำการทดสอบชิ้นทดสอบตามขั้นตอนที่ 9 ไปเรื่อย ๆ โดยการเพิ่มเวลาจุ่มในกรดไนตริกเป็น 30 วินาที  $\Rightarrow$  1 นาที  $\Rightarrow$  2 นาที  $\Rightarrow$  3 นาที  $\Rightarrow$  4 นาที  $\Rightarrow$  5 นาที  $\Rightarrow$  7 นาที  $\Rightarrow$  9 นาที จึงสังเกตว่าเมื่อค่าความโค้งของชิ้นงานเริ่มติดลบก็หยุดทำการทดสอบ

ตาราง 4.2 RESIDUAL STRESS CALCULATED FORMULAR

RESIDUAL STRESS CALCULATED FORMULA

$$\sigma_n = \frac{E}{L^2} \left[ \frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_n}{\Delta t_n} - 4 \left( T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i \right) \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_i - \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^i \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_i \right\} + \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ 4 \cdot \Delta f_i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} \Delta t_k \right\} \right]$$

$\sigma_n$  : stress of n<sup>th</sup> removed thin layer (kg<sub>r</sub>/mm<sup>2</sup>)  
 $T$  : thickness after WEDW (mm)  
 $L$  : gauge length (mm)  
 $\Delta t_n$  : thickness of n<sup>th</sup> removed thin layer (mm)  
 $\Delta f_n = f_n - f_{n-1}$  : variation of deflection (mm)  
 $E$  : elastic modulus (2.1 × 10<sup>4</sup> kg<sub>r</sub>/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_n$	1 (+)	2 (-)	3 (-)	4 (+)
$\sigma_1 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \Delta t_1)^3}{T} \cdot \frac{\Delta f_1}{\Delta t_1}$	0	0	0
$\sigma_2 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \Delta t_1 \right)} \cdot \frac{\Delta f_2}{\Delta t_2}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i \right) \cdot \Delta f_1$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1$	$4 \cdot \Delta f_1 \sum_{k=2}^1 \Delta t_k = 0$
$\sigma_3 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_3}{\Delta t_3}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^2 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k \right)^2}{(T - \Delta t_1)} \cdot \Delta f_2$	$4 \cdot \left( \Delta f_1 \sum_{k=2}^2 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^2 \Delta t_k \right) = 4 \cdot (\Delta f_1 \Delta t_2)$

$\sigma_2 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i \right)} \bullet \frac{\Delta f_4}{\Delta t_4}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i \right) \bullet \sum_{i=1}^3 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \bullet \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \bullet \Delta f_1$ $+ \frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k \right)^2}{(T - \Delta t_1)} \bullet \Delta f_2$ $+ \frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k \right)} \bullet \Delta f_3$	$4 \bullet \left( \Delta f_1 \sum_{k=2}^3 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^3 \Delta t_k \right)$ $+ \Delta f_3 \sum_{k=4}^3 \Delta t_k$ $= 4 \bullet \{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3) + \Delta f_2 \Delta t_3 \}$
$\sigma_3 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i \right)} \bullet \frac{\Delta f_5}{\Delta t_5}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i \right) \bullet \sum_{i=1}^4 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \bullet \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \bullet \Delta f_1$ $+ \frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k \right)^2}{(T - \Delta t_1)} \bullet \Delta f_2$ $+ \frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k \right)} \bullet \Delta f_3$ $+ \frac{4}{3} \bullet \frac{\left( T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k \right)} \bullet \Delta f_4$	$4 \bullet \left( \Delta f_1 \sum_{k=2}^4 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^4 \Delta t_k \right)$ $+ \Delta f_3 \sum_{k=4}^4 \Delta t_k + \Delta f_4 \sum_{k=5}^4 \Delta t_k$ $= 4 \bullet \{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4) + \Delta f_3 \Delta t_4 \}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_4 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_6}{\Delta t_6}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta f_i$	<p style="text-align: center;">above value</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^5 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_5$	$4 \cdot \left( \Delta f_1 \sum_{k=2}^5 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^5 \Delta t_k + \Delta f_3 \sum_{k=4}^5 \Delta t_k + \Delta f_4 \sum_{k=5}^5 \Delta t_k \right)$ $= 4 \cdot \{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_4 (\Delta t_5) \}$
$\sigma_7 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_7}{\Delta t_7}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^6 \Delta f_i$	<p style="text-align: center;">above value</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^6 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^5 \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_6$	$= 4 \cdot \{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_5 (\Delta t_6) \}$

$\sigma_x = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_8}{\Delta t_8}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^7 \Delta f_i$	<p style="text-align: center;">above value</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^6 \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_7$	$= 4 \cdot \left\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_6 \Delta t_7 \right\}$
$\sigma_x = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_9}{\Delta t_9}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^8 \Delta f_i$	<p style="text-align: center;">above value</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_8$	$= 4 \cdot \left\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_6 (\Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_7 \Delta t_8 \right\}$

$\frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i \right)^3}{\left( T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i \right)} \cdot \frac{\Delta f_{10}}{\Delta t_{10}}$	$4 \left( T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i \right) \cdot \sum_{i=1}^9 \Delta f_i$	<p style="text-align: center;">above value</p> $\frac{4}{3} \cdot \frac{\left( T - \sum_{k=1}^9 \Delta t_k \right)^2}{\left( T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k \right)} \cdot \Delta f_9$	$= 4 \cdot \left\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_6 (\Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_7 (\Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_8 (\Delta t_9) \right\}$
-----------------	--	---	---	--

Nishimoto formula

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ให้มีเหตุพิเศษขออนุญาต และต้องขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 1	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 340 gr
----------------	------------	-------------------	----------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>0</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>0</sub> (μm)
89.40	10.62	2.75	19738.608	+12

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19727.842	0.0015	13.5	0.0015	28.611
2	20	19586.671	0.0012	15.0	0.0015	34.121
3	30	19498.954	0.0024	20.0	0.0050	56.779
4	60	19388.981	0.0037	24.5	0.0045	34.224
5	120	19234.405	0.0036	28.0	0.0035	27.556
6	180	19173.319	0.0141	33.0	0.0050	14.792
7	240	19126.360	0.0221	36.0	0.0030	6.172
8	300	19086.465	0.0275	38.0	0.0020	1.927
9	420	19027.752	0.0232	39.0	0.0010	0.929
10	540	18976.047	0.0309	39.0	0.0000	-1.204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 2	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 $g_f$
----------------	------------	-------------------	-------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight $W_o$ (mg)	Deflection $\Delta f_o$ ( $\mu m$ )
89.50	10.63	2.74	19707.369	+14

Test	Time (Sec)	$W_i$ (mg)	$\Delta t_i$ (mm)	$m\Delta f_i$ ( $\mu m$ )	$\Delta f_i$ (mm)	$\sigma$ ( $kg_f/mm^2$ )
1	10	19696.581	0.0017	15.5	0.0015	26.665
2	20	19552.737	0.0015	17.4	0.0019	33.902
3	30	19479.288	0.0015	20.4	0.0030	53.251
4	60	19377.846	0.0028	23.7	0.0033	32.241
5	120	19216.244	0.0052	28.2	0.0045	24.226
6	180	19155.109	0.0107	33.2	0.0050	12.112
7	240	19101.101	0.0133	37.2	0.0040	7.572
8	300	19054.190	0.0224	40.2	0.0030	2.774
9	420	18995.551	0.0231	41.2	0.0010	0.795
10	540	18943.932	0.0334	41.2	0.0000	-1.109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
 เฉพาะกรณีพิเศษ ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำเอาไปใช้

Specimen No. 3	Ip 17 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 g <sub>f</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>0</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>0</sub> (μm)
86.90	10.61	2.78	19377.679	+9

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19367.920	0.0015	10.4	0.0014	25.232
2	20	19227.362	0.0016	12.2	0.0018	31.687
3	30	19160.964	0.0013	14.4	0.0022	49.154
4	60	19061.520	0.0033	17.7	0.0033	28.845
5	120	18909.166	0.0048	21.3	0.0036	21.120
6	180	18849.534	0.0144	26.3	0.0050	9.378
7	240	18807.027	0.0138	28.8	0.0025	4.782
8	300	18771.371	0.0147	30.3	0.0015	2.279
9	420	18713.714	0.0217	31.3	0.0010	0.736
10	540	18662.862	0.0354	31.3	0.0000	-0.847

Specimen No. 4	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 $g_f$
----------------	------------	-------------------	-------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection $\Delta f_o$ ( $\mu m$ )
88.00	10.42	2.82	19548.854	+7

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	$\Delta t_i$ (mm)	m $\Delta f_i$ ( $\mu m$ )	$\Delta f_i$ (mm)	$\sigma_f$ (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19538.455	0.0018	8.5	0.0015	22.594
2	20	19385.130	0.0024	12.0	0.0035	42.418
3	30	19316.336	0.0031	14.5	0.0025	22.371
4	60	19223.918	0.0046	16.7	0.0022	14.590
5	120	19084.200	0.0054	18.3	0.0016	9.026
6	180	19046.231	0.0105	20.1	0.0018	5.013
7	240	19014.394	0.0108	21.0	0.0009	2.277
8	300	18985.281	0.0184	21.5	0.0005	0.562
9	420	18930.456	0.0187	22.0	0.0005	0.411
10	540	18879.014	0.0279	22.0	0.0000	-0.129

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 5	Ip 15 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 g <sub>f</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>0</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>0</sub> (μm)
88.20	10.44	2.81	19561.277	+2

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg.)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19484.702	0.0019	13.0	0.0110	17.020
2	20	19338.547	0.0019	15.5	0.0025	37.272
3	30	19274.632	0.0028	17.3	0.0018	19.805
4	60	19185.066	0.0040	19.1	0.0018	12.628
5	120	19045.563	0.0063	20.7	0.0016	6.536
6	180	19013.728	0.0096	21.6	0.0009	2.529
7	240	18985.311	0.0124	22.0	0.0004	0.708
8	300	18956.223	0.0181	22.5	0.0005	0.157
9	420	18903.496	0.0164	22.7	0.0002	0.109
10	540	18852.128	0.0239	22.7	0.0000	-0.053

\*\*

Specimen No. 6	Ip 14 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 g <sub>f</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
87.55	10.41	2.84	19568.026	+14

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19561.825	0.0019	14.9	0.0009	13.953
2	20	19420.812	0.0016	16.6	0.0017	32.498
3	30	19356.805	0.0030	18.4	0.0018	17.106
4	60	19271.115	0.0034	19.6	0.0012	10.372
5	120	19135.199	0.0059	20.6	0.0010	5.607
6	180	19106.003	0.0121	21.1	0.0005	1.482
7	240	19078.837	0.0130	21.3	0.0002	0.154
8	300	19052.347	0.0146	21.4	0.0001	0.079
9	420	19000.715	0.0191	21.4	0.0000	-0.202
10	540	18949.083	0.0204	21.4	0.0000	-0.697

๗.๖

Specimen No. 7	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 340 g <sub>f</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
88.55	10.36	2.84	19696.473	+10

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19688.150	0.0015	11.2	0.0012	25.014
2	20	19546.225	0.0017	12.9	0.0017	28.963
3	30	19482.491	0.0011	14.6	0.0017	45.108
4	60	19387.347	0.0029	17.1	0.0025	25.461
5	120	19237.012	0.0054	20.1	0.0030	16.875
6	180	19190.685	0.0104	23.1	0.0030	7.579
7	240	19151.193	0.0136	25.1	0.0020	4.026
8	300	19118.508	0.0158	26.1	0.0010	1.273
9	420	19061.970	0.0183	26.8	0.0007	0.750
10	540	19010.171	0.0374	26.8	0.0000	-0.527

Specimen No. 8	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 390 g <sub>f</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
87.95	10.39	2.82	19481.496	+13

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19471.824	0.0017	14.4	0.0014	24.316
2	20	19334.807	0.0013	15.6	0.0012	26.957
3	30	19269.627	0.0013	17.6	0.0020	44.332
4	60	19175.404	0.0030	20.1	0.0025	23.411
5	120	19028.600	0.0048	22.8	0.0027	15.728
6	180	18986.015	0.0102	25.3	0.0025	6.593
7	240	18948.203	0.0131	27.1	0.0018	3.522
8	300	18917.842	0.0152	27.8	0.0007	1.010
9	420	18862.538	0.0196	28.4	0.0006	0.503
10	540	18811.281	0.0361	28.4	0.0000	-0.251

Specimen No. 9	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 740 g <sub>r</sub>
----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
88.75	10.00	2.93	19658.835	+8

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>r</sub> (kg <sub>r</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19651.455	0.0017	9.1	0.0011	20.415
2	20	19501.489	0.0022	12.1	0.0030	41.371
3	30	19436.260	0.0031	14.1	0.0020	20.819
4	60	19345.169	0.0045	16.1	0.0020	14.132
5	120	19205.646	0.0052	17.6	0.0015	8.493
6	180	19169.876	0.0102	19.1	0.0015	4.092
7	240	19140.691	0.0124	19.6	0.0005	1.813
8	300	19112.171	0.0172	20.0	0.0004	0.437
9	420	19058.416	0.0183	20.3	0.0003	0.298
10	540	19006.627	0.0280	20.3	0.0000	-0.115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 10	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 390 g <sub>f</sub>
-----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
89.20	10.05	2.79	18908.493	+7

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	18896.972	0.0018	8.7	0.0017	27.738
2	20	18762.566	0.0012	10.1	0.0014	33.998
3	30	18687.756	0.0019	13.8	0.0037	54.120
4	60	18586.155	0.0032	17.8	0.0040	34.011
5	120	18431.690	0.0049	22.3	0.0045	26.930
6	180	18370.330	0.0120	27.8	0.0055	14.091
7	240	18319.006	0.0213	31.8	0.0040	5.306
8	300	18280.985	0.0281	33.8	0.0020	1.116
9	420	18224.845	0.0180	34.8	0.0010	0.821
10	540	18175.321	0.0309	34.8	0.0000	-1.194

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปไซประโยชน์ดานการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 11	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 740 g <sub>f</sub>
-----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
88.65	10.15	2.79	18978.889	+5

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>f</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	18968.685	0.0016	6.5	0.0015	25.473
2	20	18831.743	0.0015	8.2	0.0017	32.944
3	30	18759.352	0.0018	11.5	0.0033	51.138
4	60	18662.734	0.0030	14.7	0.0032	30.012
5	120	18512.979	0.0046	18.4	0.0037	22.761
6	180	18456.034	0.0118	23.2	0.0048	10.953
7	240	18407.821	0.0122	26.7	0.0035	7.006
8	300	18369.631	0.0202	28.7	0.0020	2.045
9	420	18313.226	0.0283	29.7	0.0010	0.576
10	540	18263.462	0.0295	29.7	0.0000	-0.819

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดตทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specimen No. 12	Ip 16 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 gf
-----------------	------------	-------------------	----------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
89.10	10.00	2.83	19062.767	+6

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19053.336	0.0016	7.4	0.0014	25.157
2	20	18915.947	0.0016	9.1	0.0017	30.980
3	30	18848.888	0.0015	11.6	0.0025	46.903
4	60	18755.445	0.0027	14.3	0.0027	27.043
5	120	18604.649	0.0055	18.1	0.0038	19.517
6	180	18556.465	0.0107	21.6	0.0035	9.021
7	240	18518.220	0.0131	23.6	0.0020	4.955
8	300	18483.298	0.0195	25.1	0.0015	1.948
9	420	18426.650	0.0232	26.1	0.0010	0.563
10	540	18376.577	0.0321	26.1	0.0000	-0.704

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยู่ยาดเอนาไปไซบะระยเอนคานการค

ไม่ว่ากรณีใดตห้ั้งสิ้น อีกห้ั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้อองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกคร้ั้งห้ั้งมีการนำไปใช้

Specimen No. 13	Ip 15 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 gr
-----------------	------------	-------------------	----------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
88.65	10.20	2.77	18935.661	+2

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>i</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	18926.775	0.0018	3.3	0.0013	19.548
2	20	18779.867	0.0022	6.5	0.0032	38.947
3	30	18714.954	0.0029	8.7	0.0022	20.083
4	60	18625.154	0.0049	10.9	0.0022	12.617
5	120	18489.600	0.0059	12.5	0.0016	7.073
6	180	18457.287	0.0095	13.6	0.0011	2.981
7	240	18426.999	0.0128	14.4	0.0008	1.320
8	300	18400.062	0.0149	14.7	0.0003	0.258
9	420	18348.201	0.0203	15.0	0.0003	0.209
10	540	18298.342	0.0248	15.0	0.0000	-0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากทางสถาบัน

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

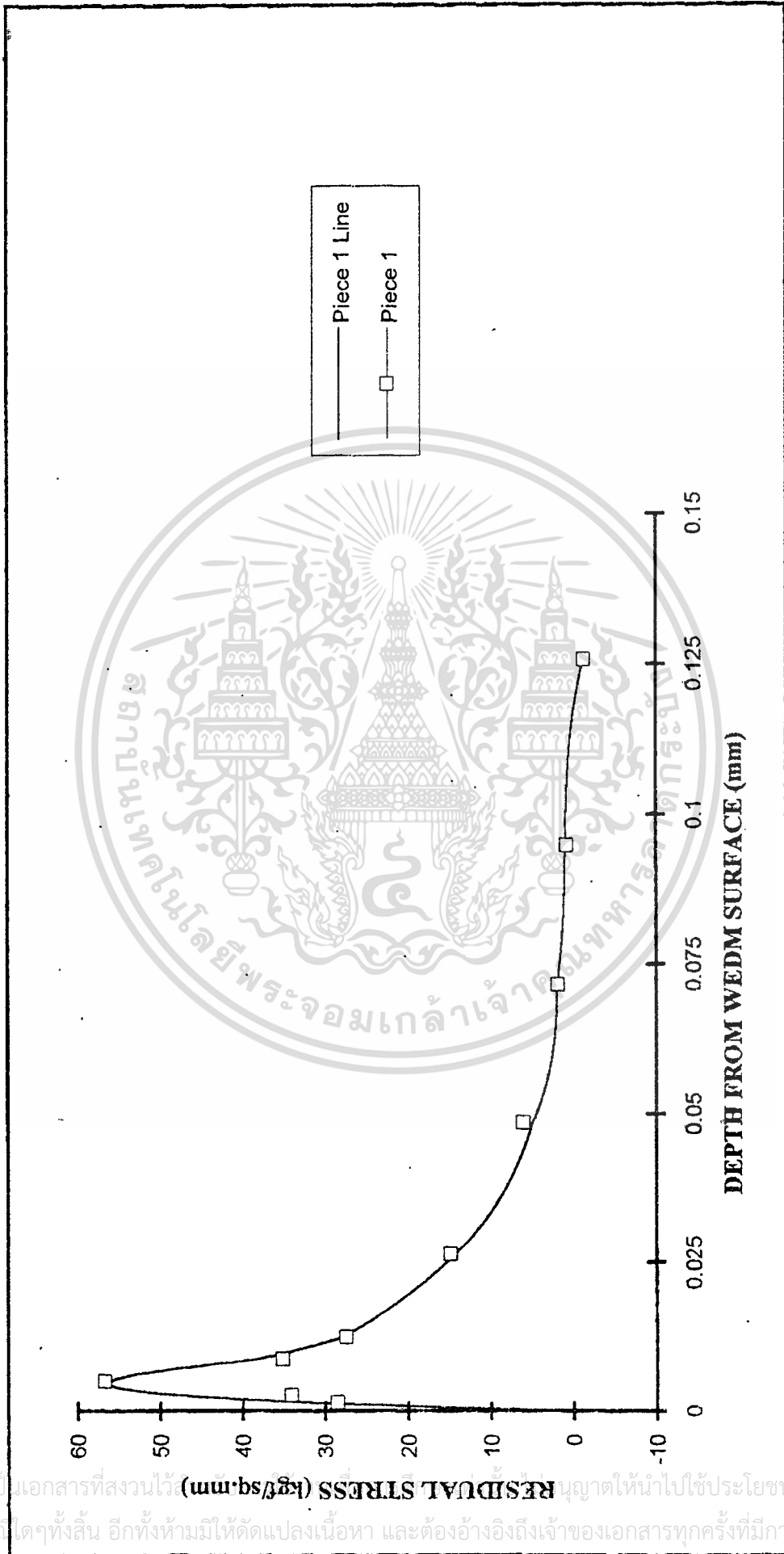
Specimen No. 14	Ip 14 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 g <sub>f</sub>
-----------------	------------	-------------------	----------------------------

Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness T (mm)	Weight W <sub>o</sub> (mg)	Deflection Δf <sub>o</sub> (μm)
88.95	10.08	2.81	19047.352	+5

Test	Time (Sec)	W <sub>i</sub> (mg)	Δt <sub>i</sub> (mm)	mΔf <sub>i</sub> (μm)	Δf <sub>i</sub> (mm)	σ <sub>f</sub> (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )
1	10	19039.895	0.0020	6.1	0.0011	15.025
2	20	18897.810	0.0020	8.5	0.0024	33.914
3	30	18837.409	0.0023	10.0	0.0015	18.136
4	60	18751.257	0.0040	11.6	0.0016	11.138
5	120	18616.277	0.0062	13.0	0.0014	6.933
6	180	18585.845	0.0098	13.8	0.0008	1.981
7	240	18559.404	0.0164	14.0	0.0002	0.296
8	300	18533.628	0.0134	14.1	0.0001	0.095
9	420	18483.402	0.0177	14.1	0.0000	-0.302
10	540	18433.175	0.0221	14.1	0.0000	-0.419

กราฟ 4.1 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของแต่ละชิ้นงาน

ภาพที่ 1 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 1



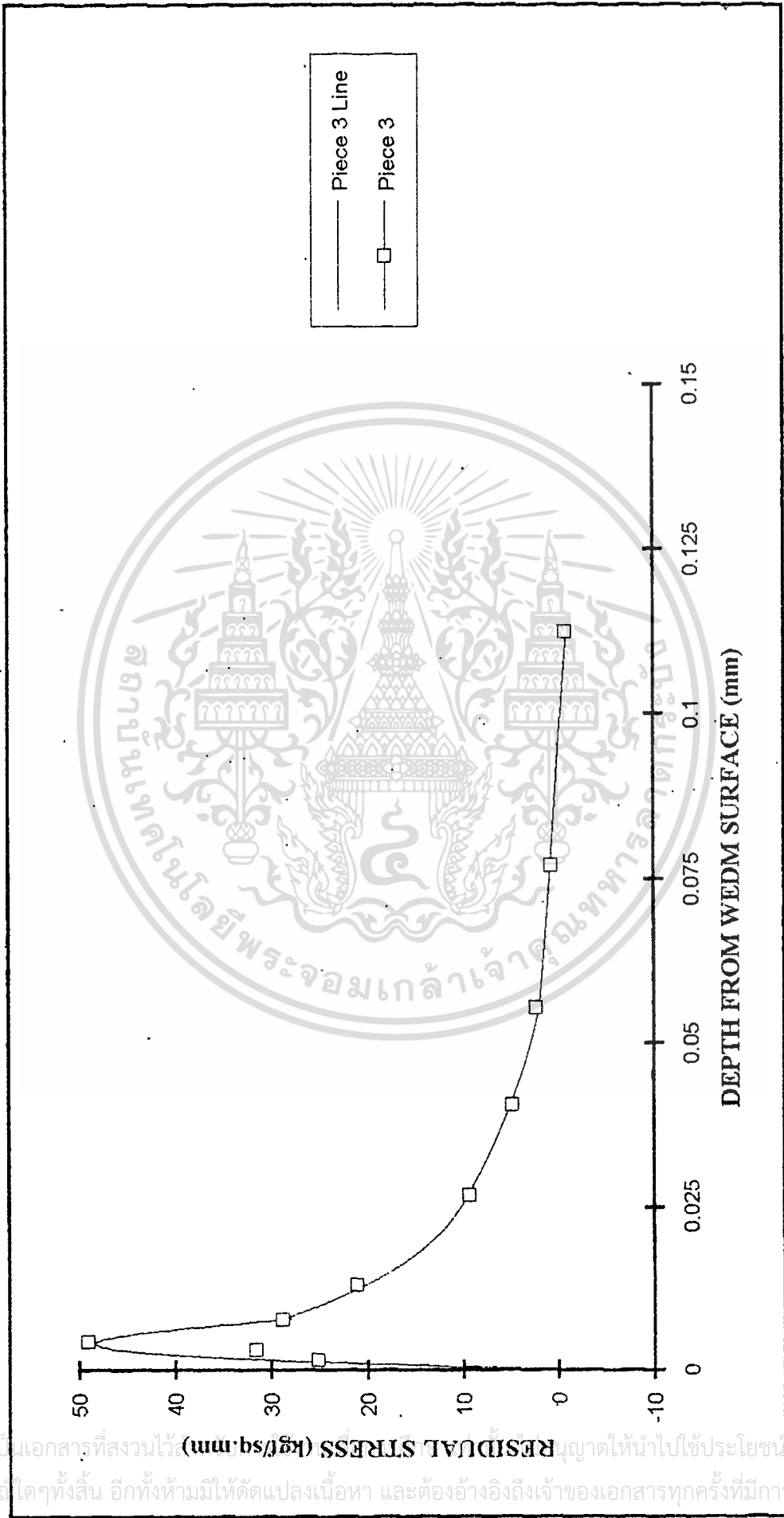
Piece 1 Ip 17 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 340 gf

ภาพที่ 2 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 2



Piece 2 Ip 17 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 3 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 3



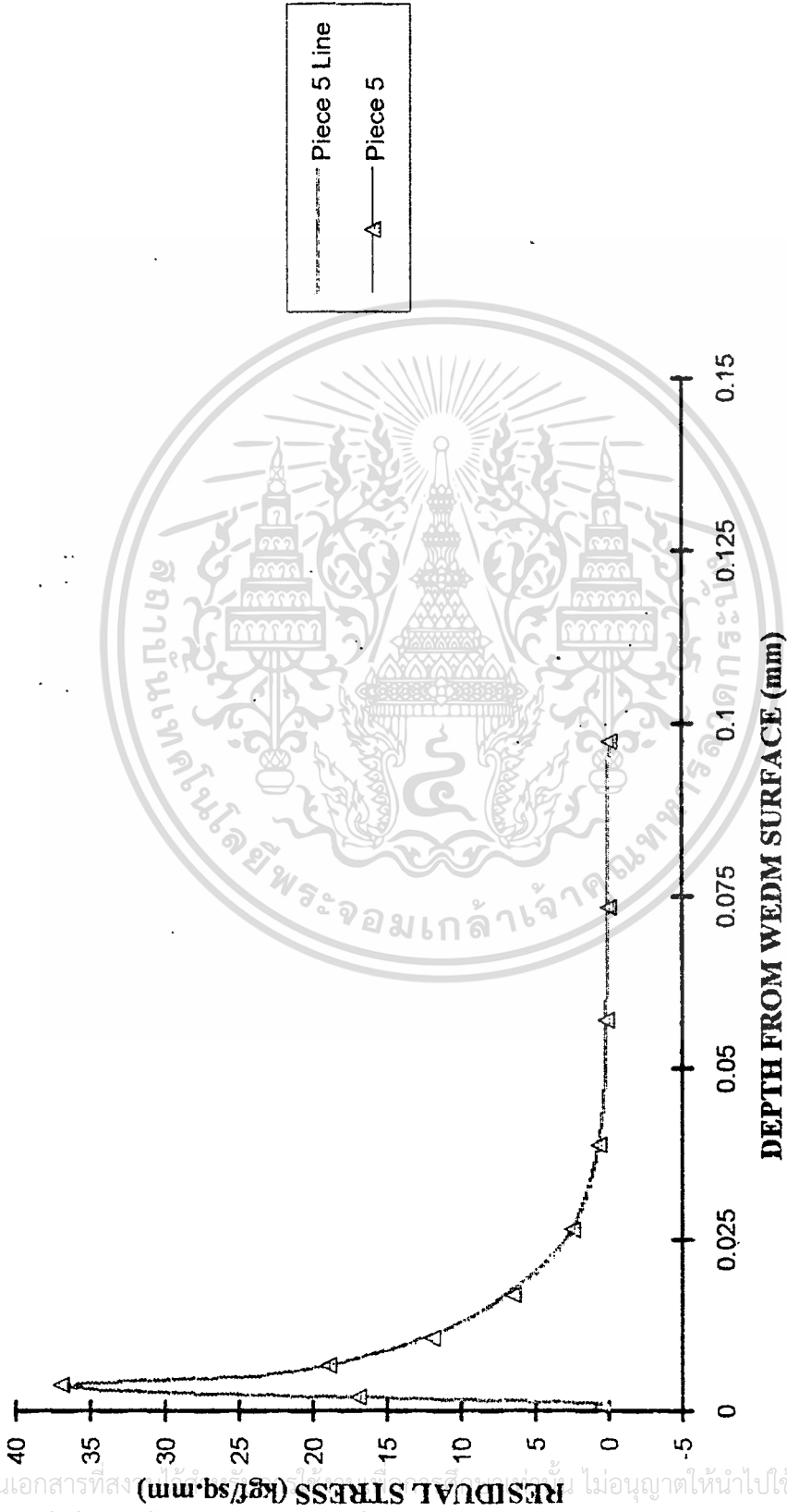
Piece 3 Ip 17 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 4 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 4



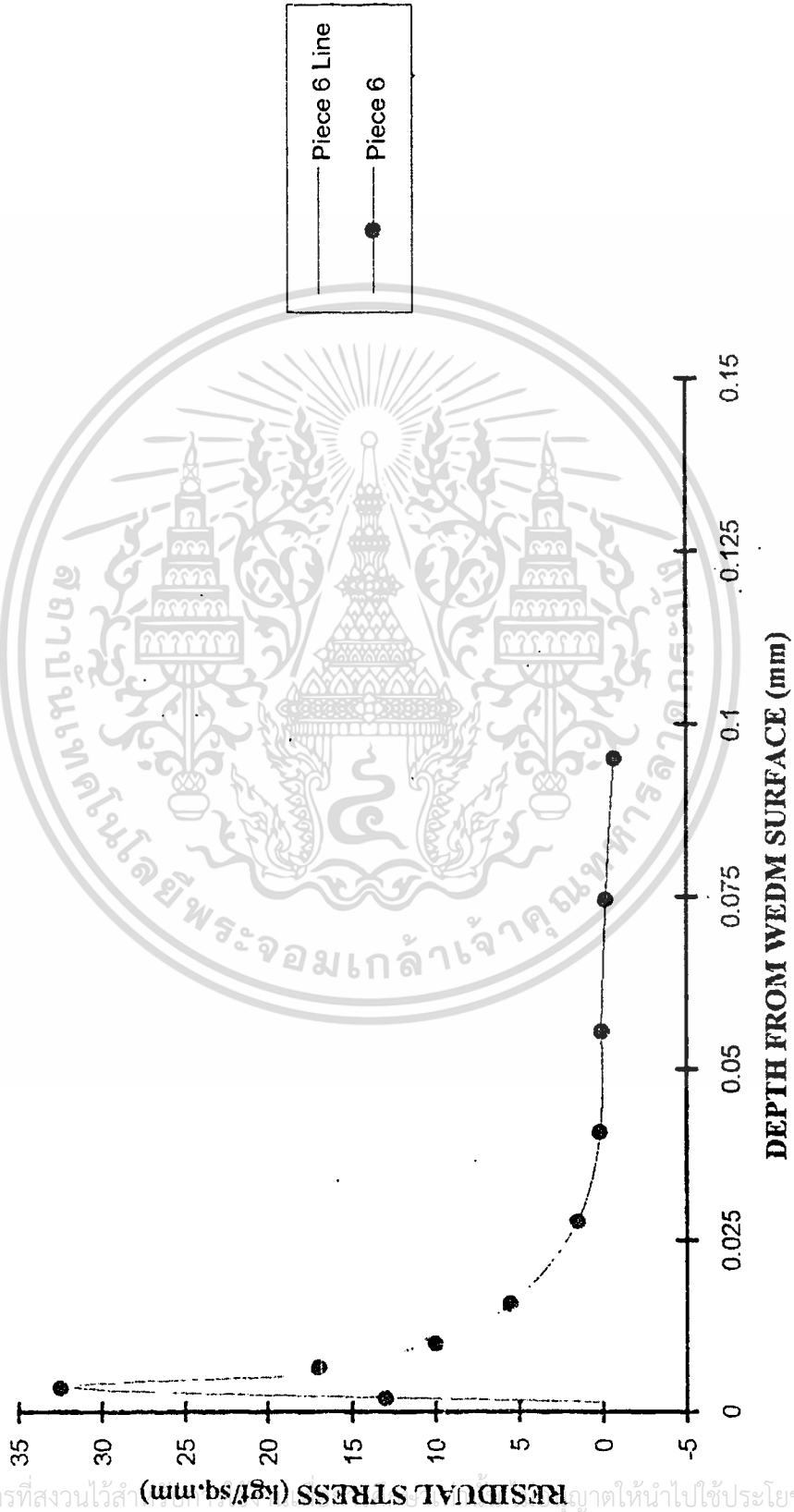
Piece 4 Ip 16 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 5 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 5



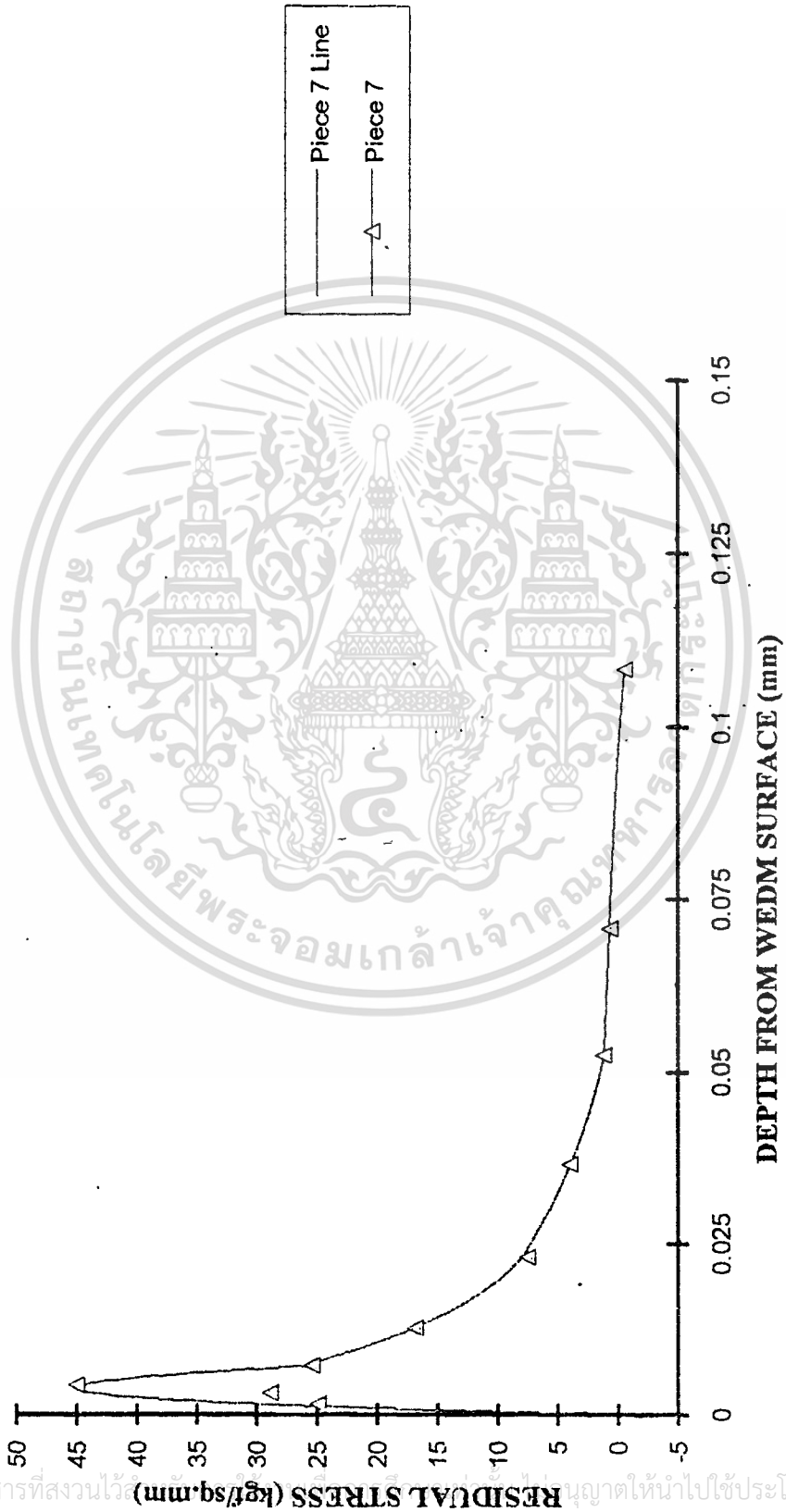
Piece 5 Ip 15 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 6 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 6



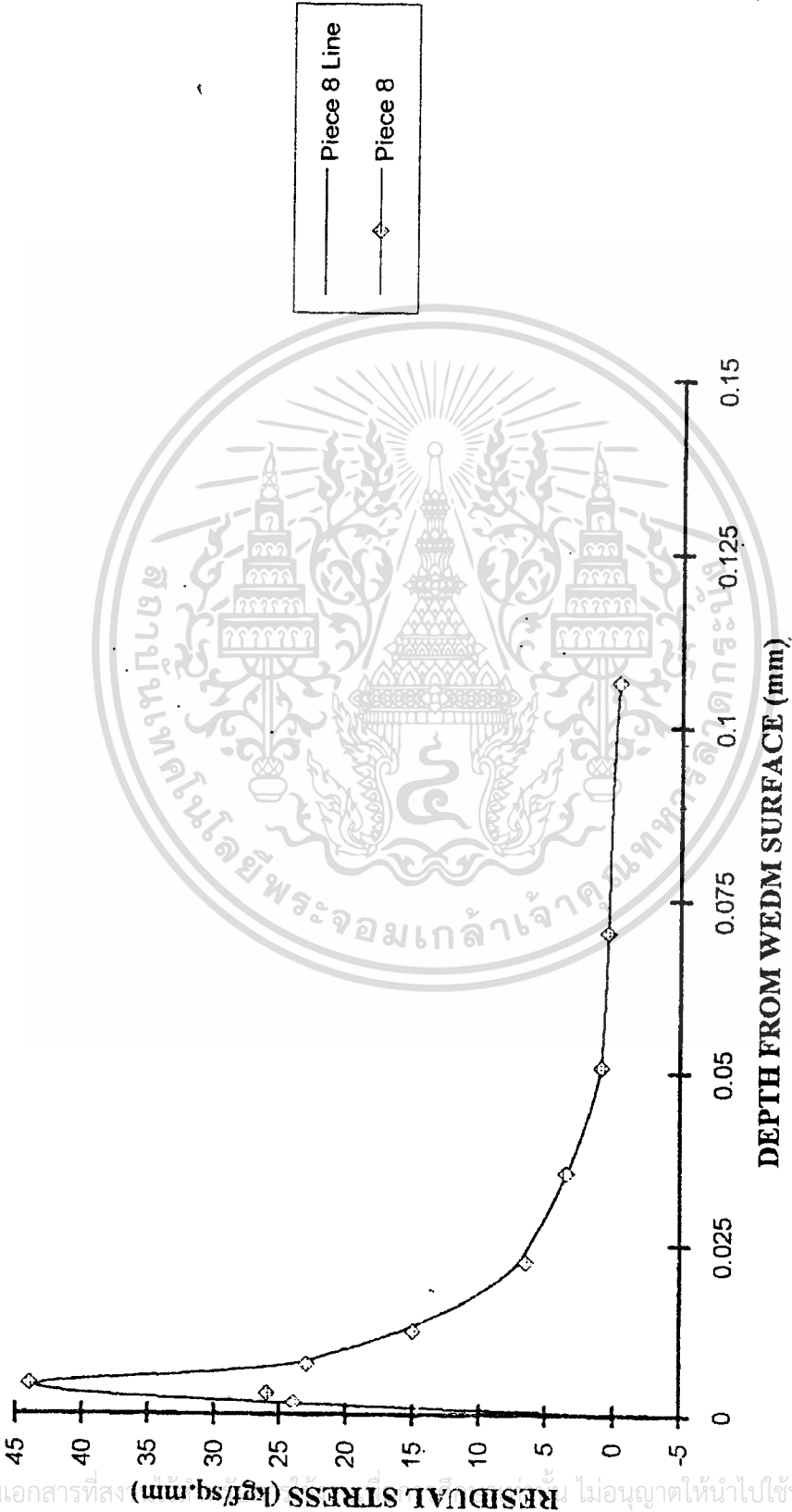
Piece 6 Ip 14 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 7 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 7



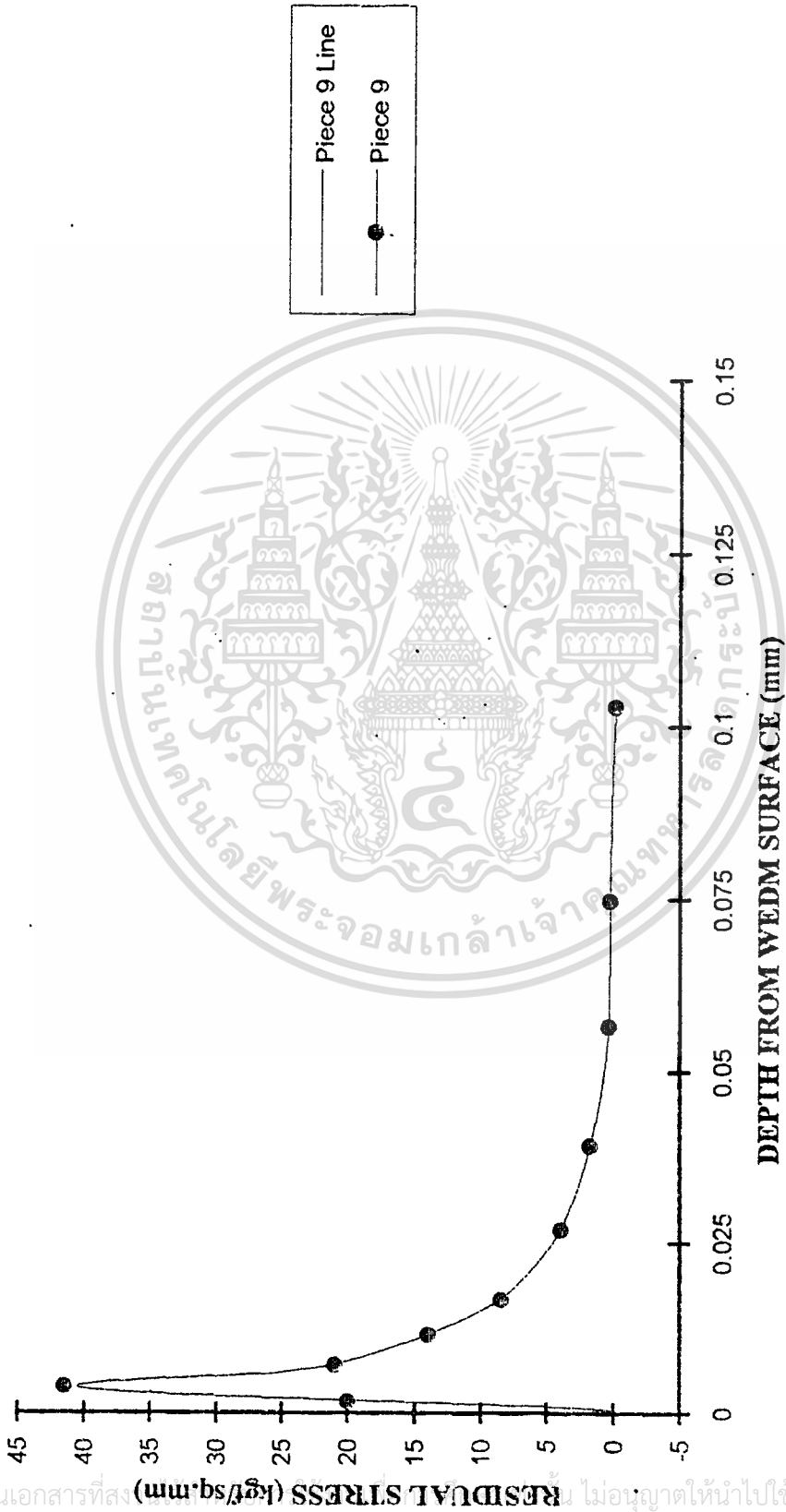
Piece 7 Ip 16 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 340 gf

ภาพที่ 8 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 8



Piece 8 Ip 16 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 390 gf

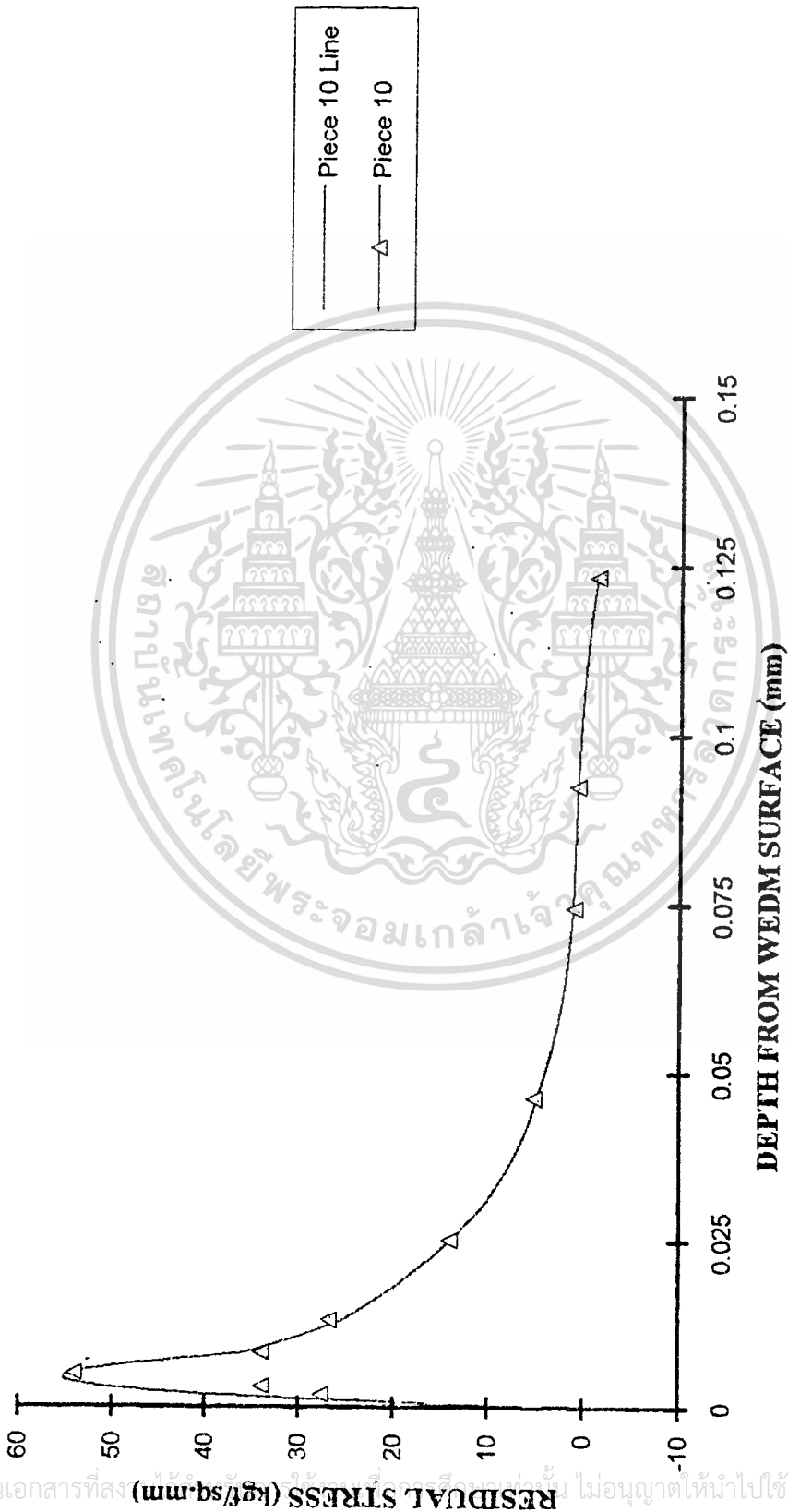
กราฟที่ 9 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 9



Piece 9 Ip 16 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 740 gf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

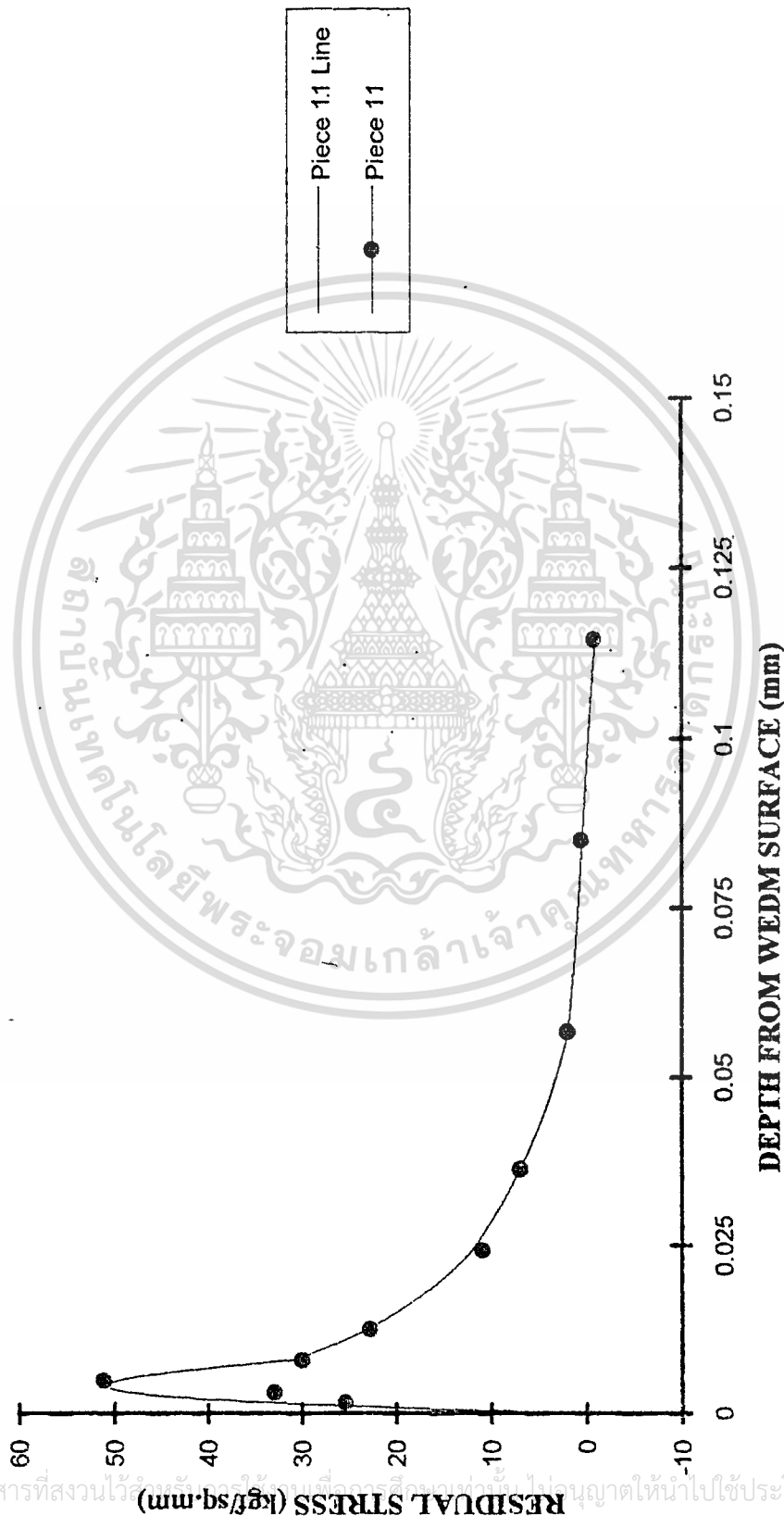
กราฟที่ 10 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 10



Piece 10 Ip 17 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 390 gf

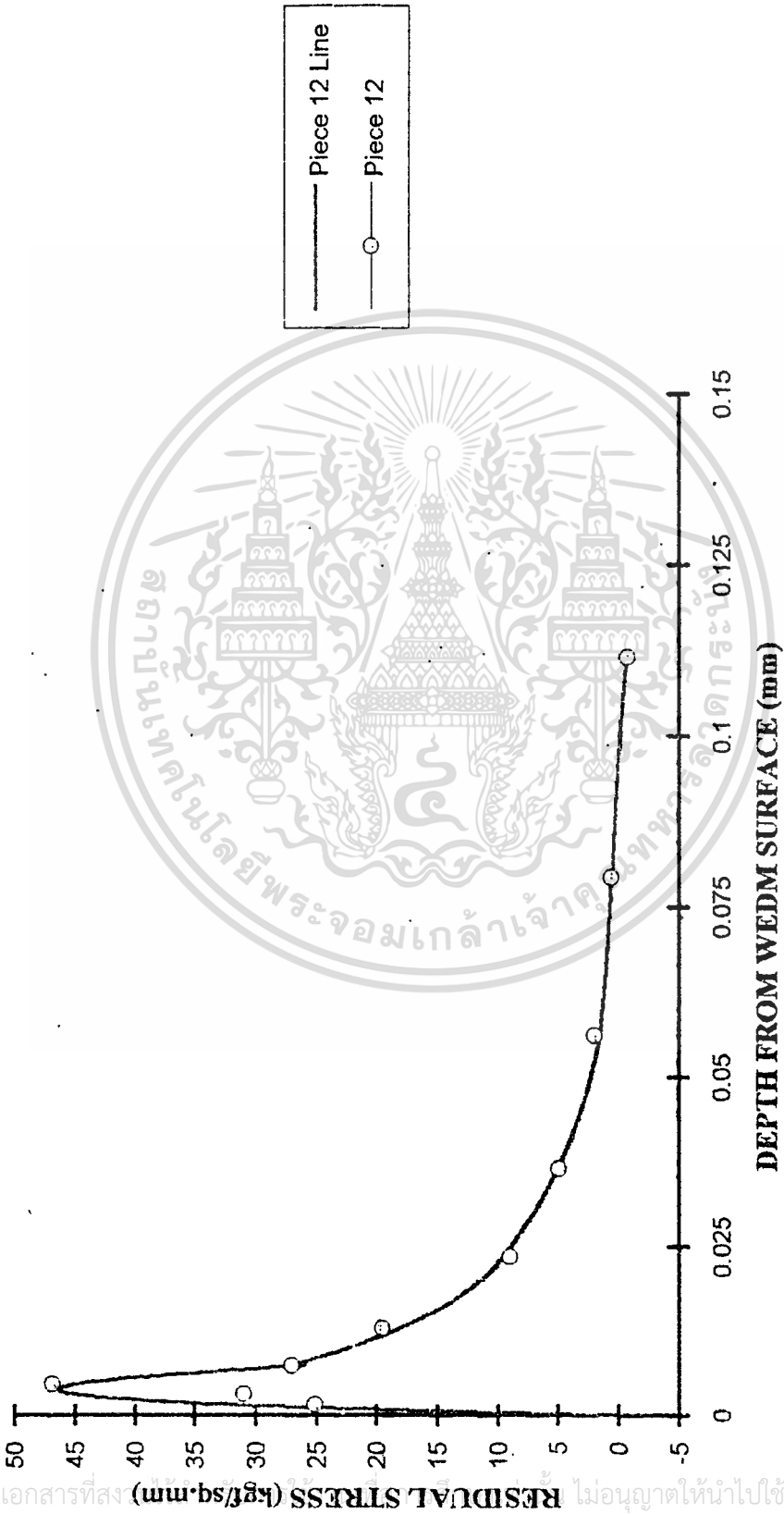
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (สงวนลิขสิทธิ์) ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 11 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 11



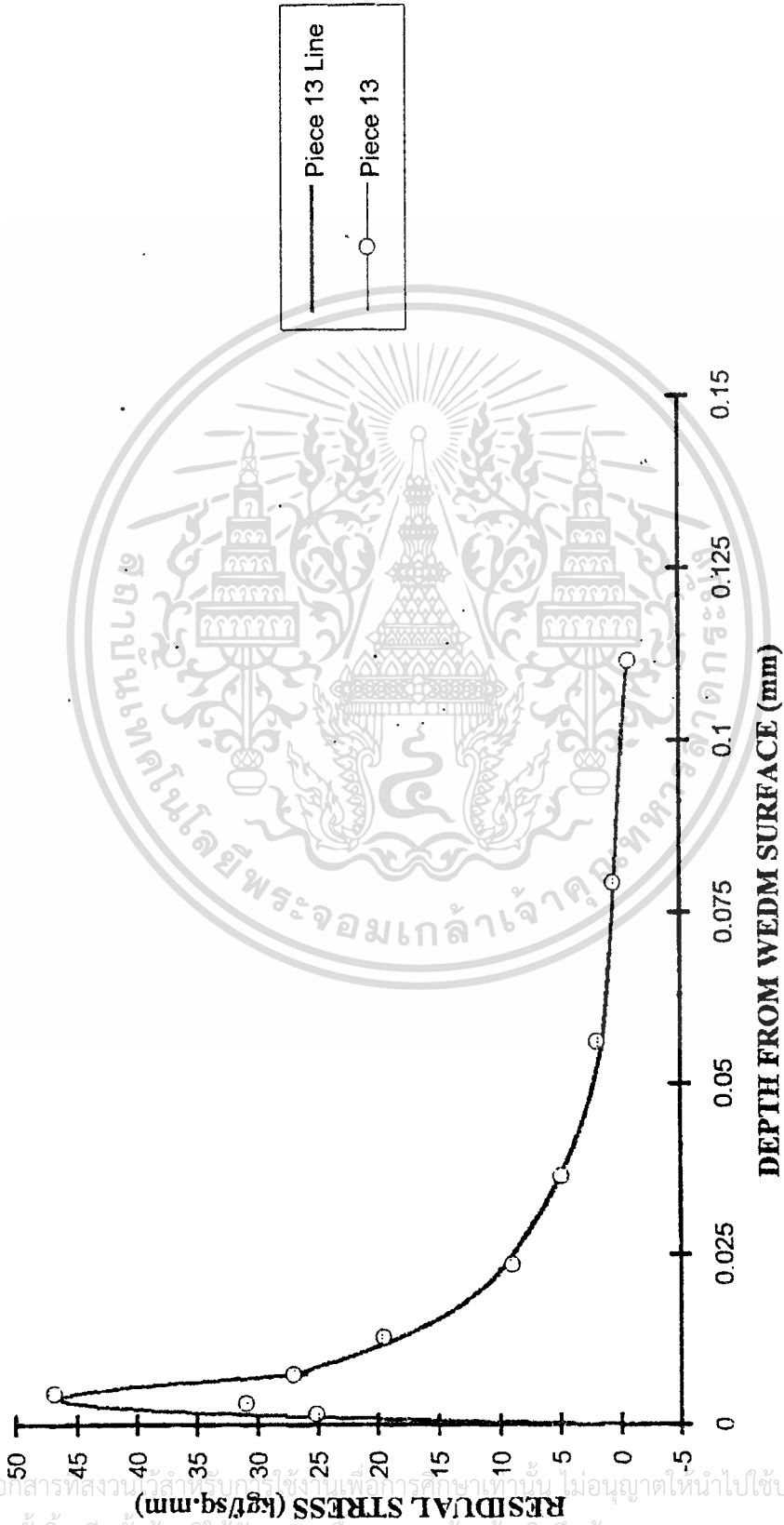
Piece 11 Ip 17 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 740 gf

กราฟที่ 12 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 1,2



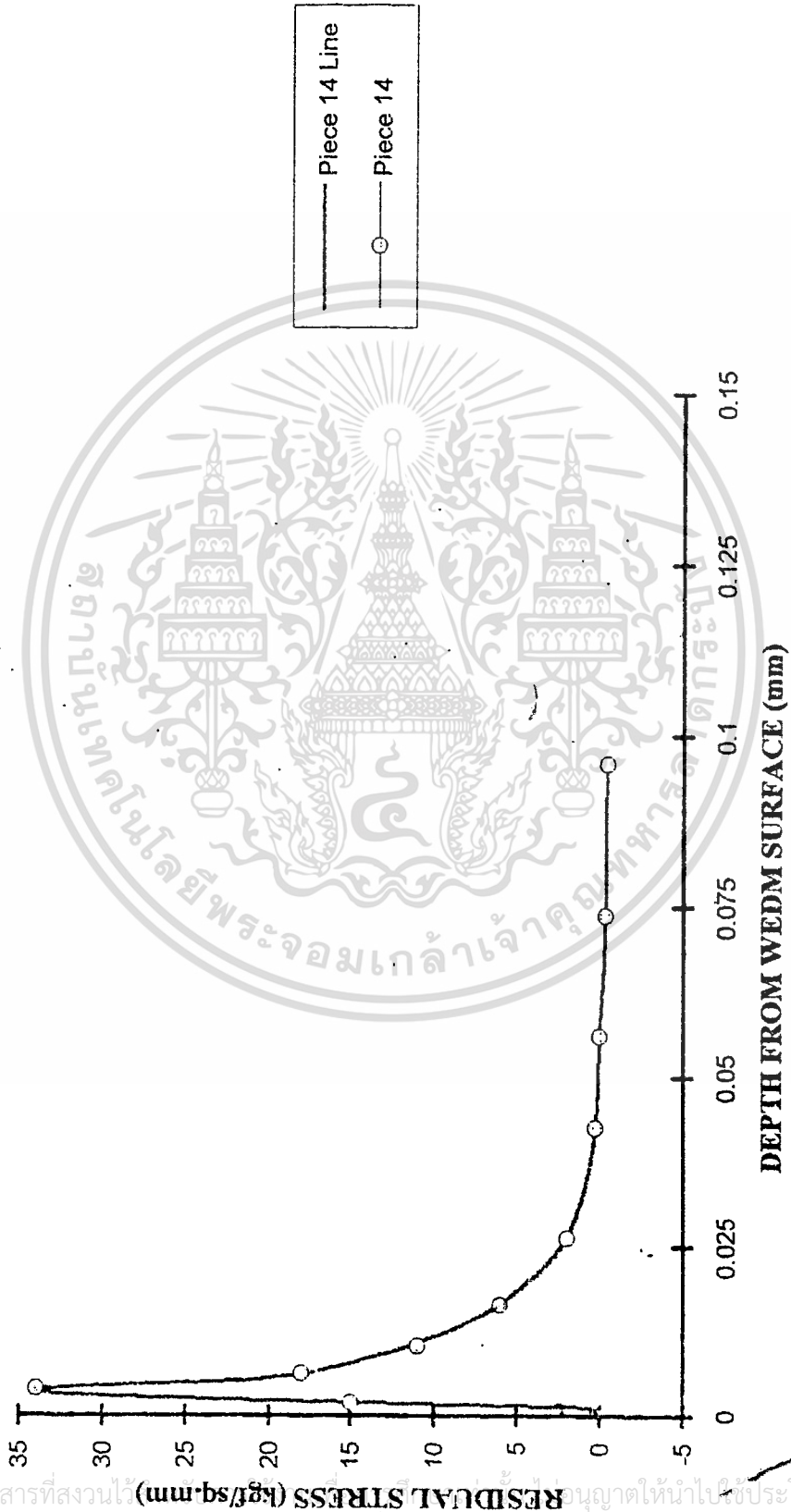
Piece 12 Ip 16 Amp. ON-OFF 6-16 thsec. Tension 500 gf

กราฟที่ 13 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 13



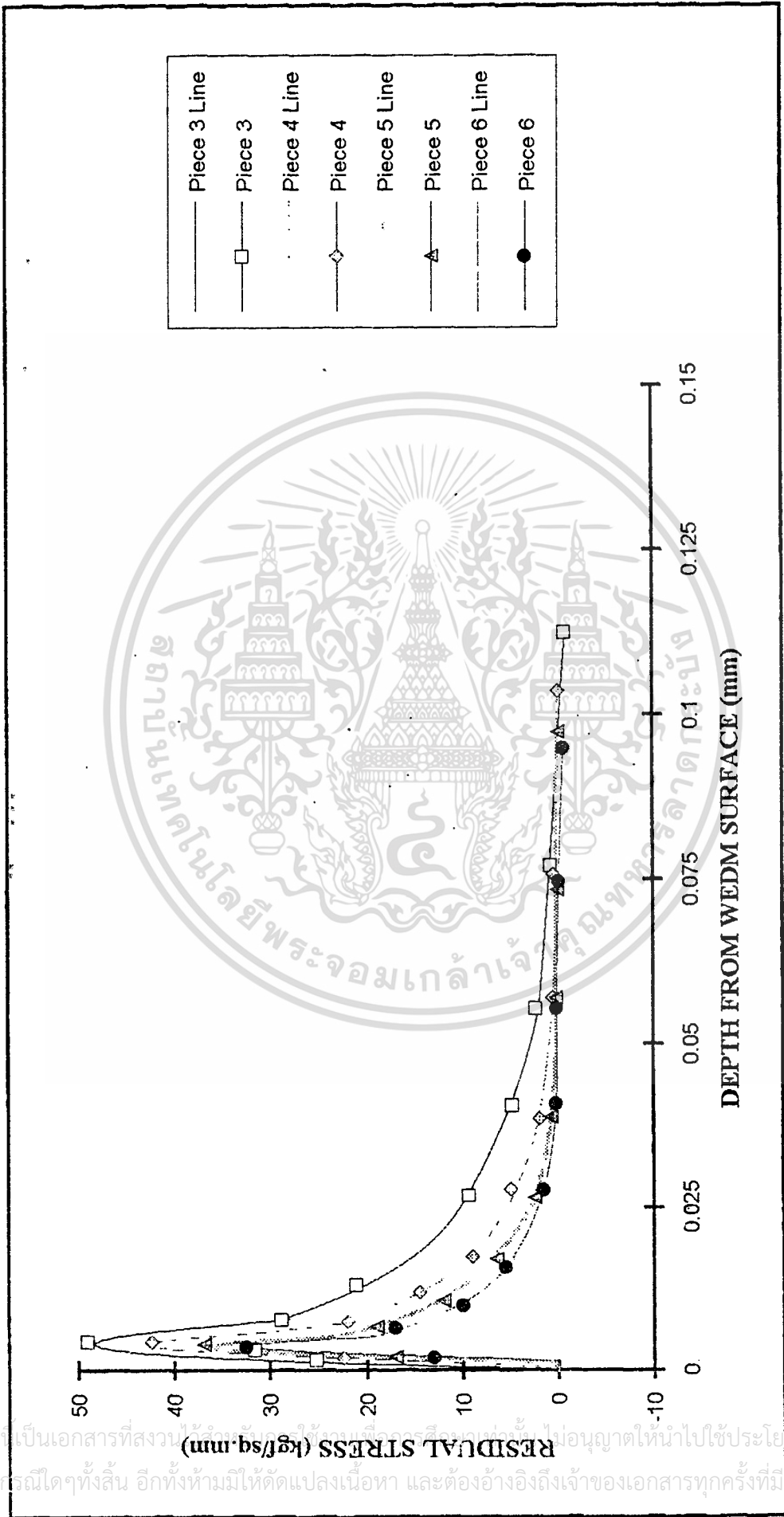
Piece 13 Ip 15 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 14 แสดงค่า RESIDUAL STRESS ของ PIECES No. 14



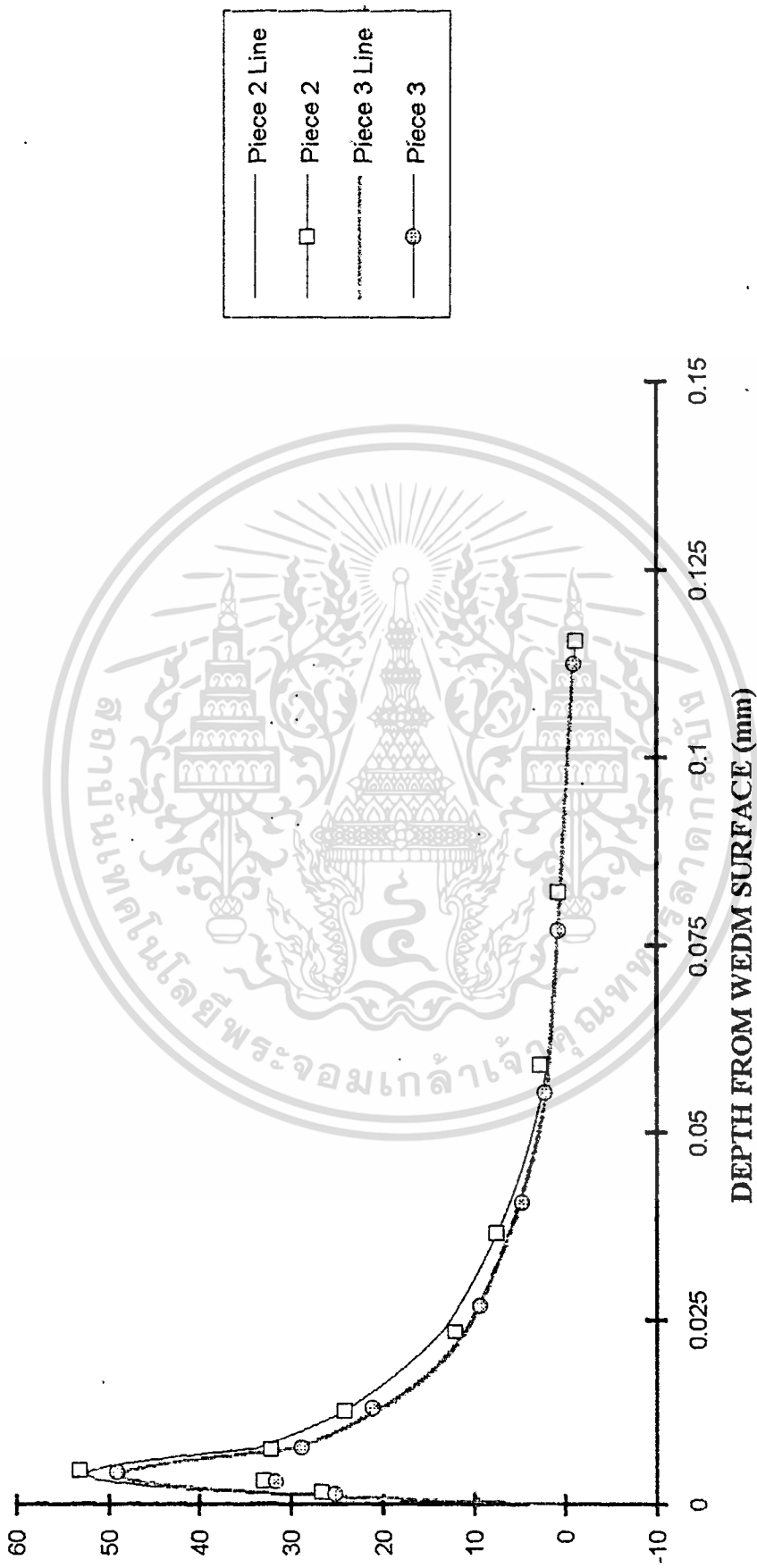
Piece 14 Ip 14 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 15 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า Ip ( Piece 3, Piece 4, Piece 5 และ Piece 6 ที่ ON-OFF 4-14 msec., Tension 500 gf )



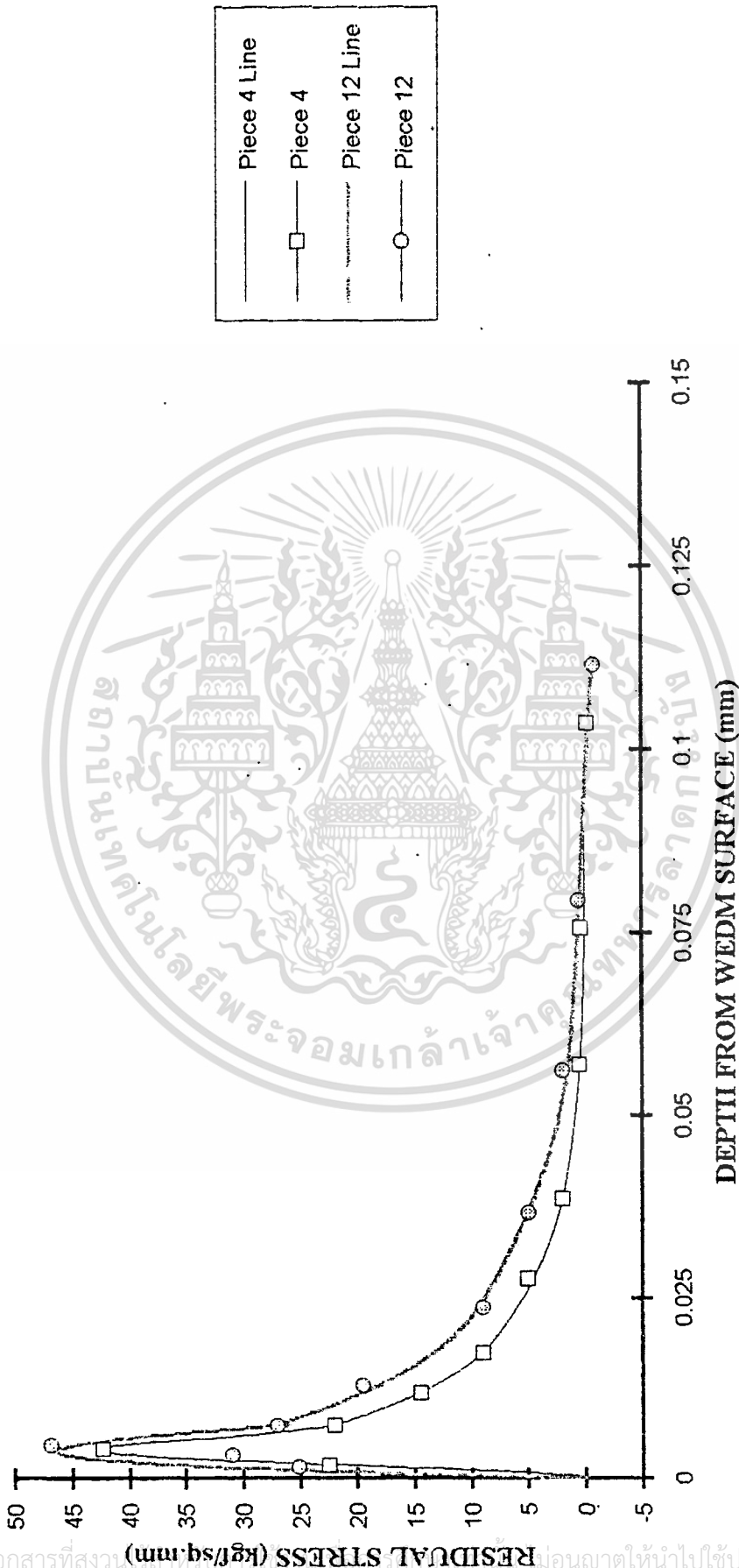
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 16 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า ON-OFF ( Piece 2 และ Piece 3 ที่ Ip 17 Amp., Tension 500 gf )



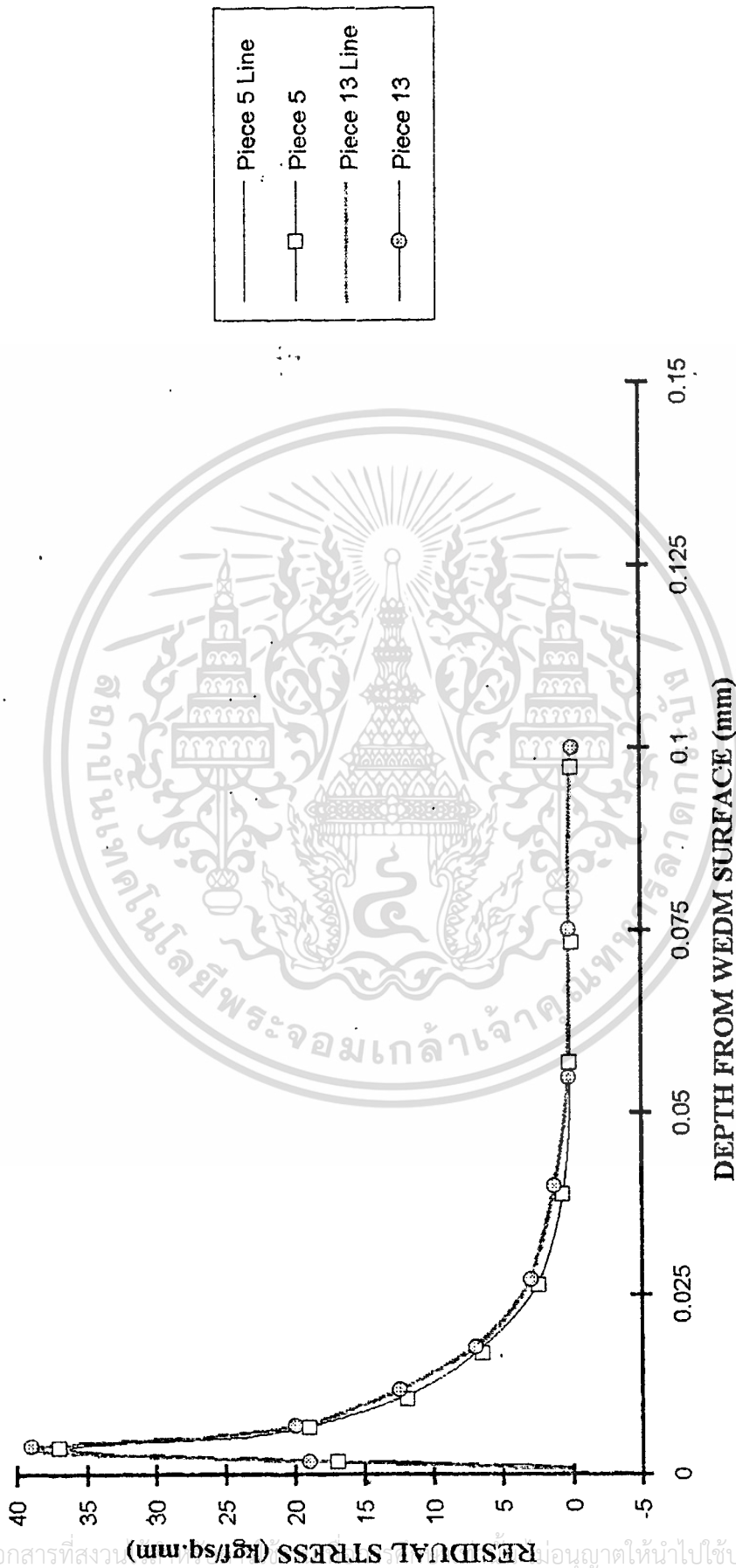
Piece 2 Ip 17 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf  
 Piece 3 Ip 17 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 17 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า ON-OFF ( Piece 4 และ Piece 12 ที่ Ip 16 Amp., Tension 500 gf.)



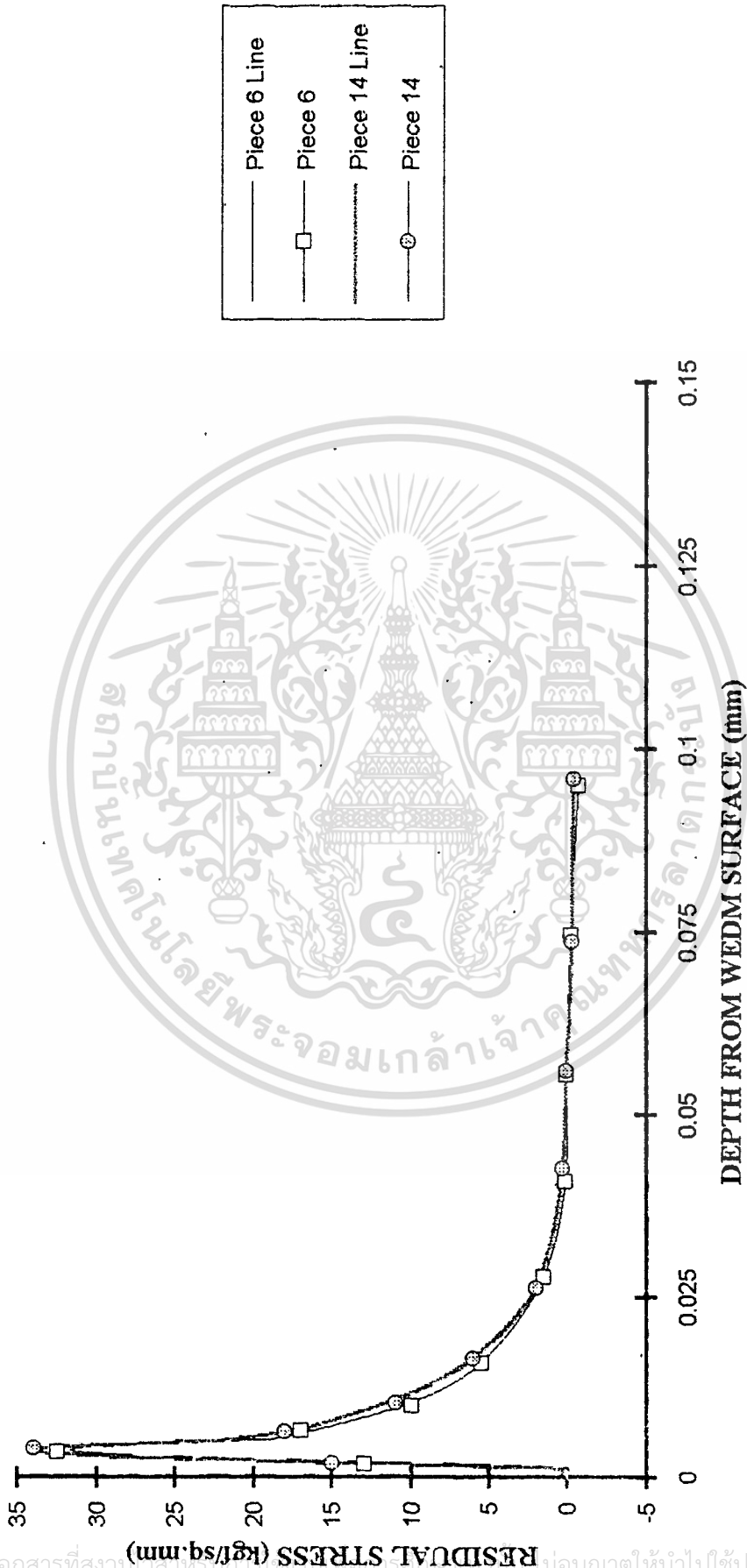
Piece 4 Ip 16 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf  
 Piece 12 Ip 16 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 18 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า ON-OFF ( Piece 5 และ Piece 13 ที่ Ip 15 Amp., Tension 500 gf )



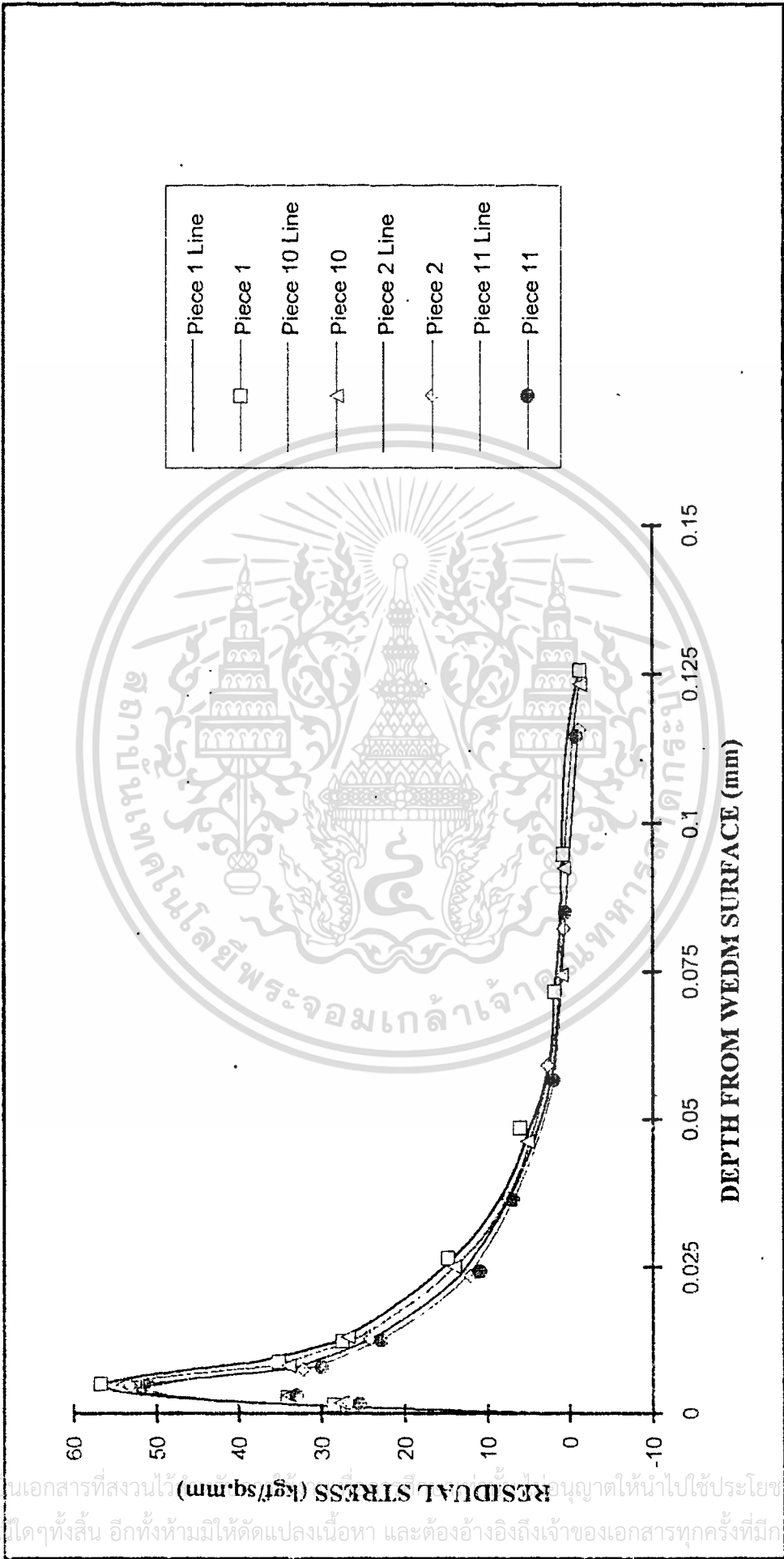
Piece 5 Ip 15 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf  
 Piece 13 Ip 15 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 19 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า ON-OFF ( Piece 6 และ Piece 14 ที่ Ip 14 Amp., Tension 500 gf )



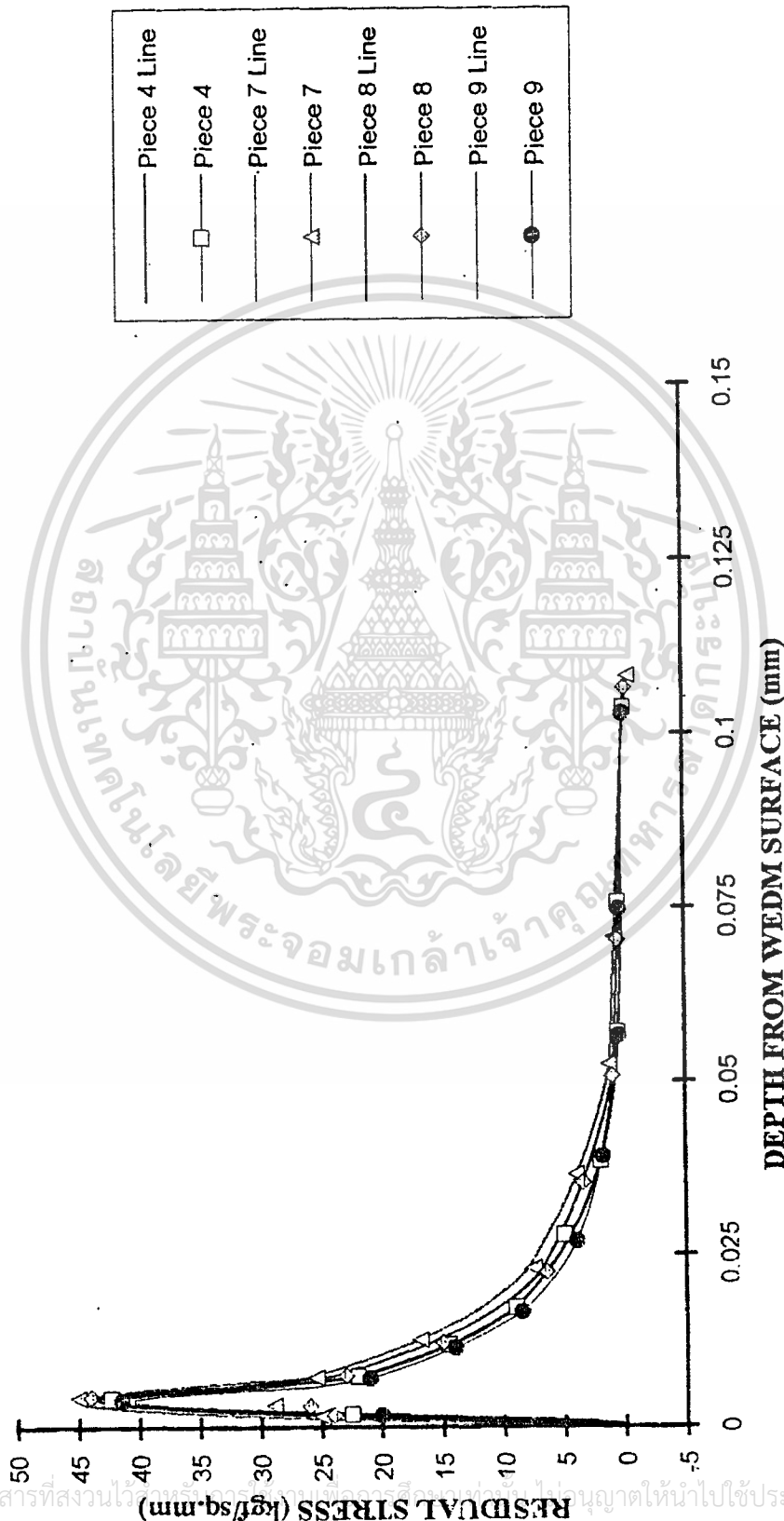
Piece 6 Ip 14 Amp. ON-OFF 4-14 msec. Tension 500 gf  
 Piece 14 Ip 14 Amp. ON-OFF 6-16 msec. Tension 500 gf

กราฟที่ 20 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า Tension ( Piece 1, Piece 2, Piece 10 และ Piece 11 ที่ Ip 17 Amp., ON-OFF 6-16 msec., )



Piece 1	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 340 gf
Piece 2	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 500 gf
Piece 10	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 390 gf
Piece 11	Ip 17 Amp.	ON-OFF 6-16 msec.	Tension 740 gf

กราฟที่ 21 แสดงผลของการเปลี่ยนค่า Tension ( Piece 4, Piece 7, Piece 8 และ Piece 9 ที่ Ip 16 Amp., ON-OFF 4-14 msec. )



Piece 4	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 500 gf
Piece 7	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 340 gf
Piece 8	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 390 gf
Piece 9	Ip 16 Amp.	ON-OFF 4-14 msec.	Tension 740 gf

#### 4.4 ผลของการวิเคราะห์

ก่อนที่จะมีการปรับแต่งค่า PARAMETER ต่าง ๆ เครื่อง wire Cut EDM ได้ถูกตั้งค่า PARAMETER ไว้ที่  $I_p = 17$  Amp ON - OFF 6 - 16 m-sec และค่า Tension 340 gf เมื่อตัดชิ้นทดสอบออกมา จะปรากฏว่ามีความเค้นตกค้างสูงถึง  $58 \text{ kgf/mm}^2$  และ มีความลึกจากผิวประมาณ  $50 \mu\text{m}$  ซึ่งผลอันนี้ เนื่องจากการปรับPARAMETER ยังไม่เหมาะสมทำให้แนวของชิ้นงานที่ตัดด้วย wire Cut EDM เกิดความร้อนสูงเกินไปเมื่อผิวชิ้นงานร้อนมากและทำการตัดในน้ำก็ทำให้ผิวของชิ้นงานมีความแข็งมากและเกิดความเค้นที่ตกค้างสูง ตามไปด้วย

ผู้วิจัยได้พยายามทำการปรับปรุงค่า PARAMETER ต่างก็พบว่า ถ้าค่า  $I_p = 14$  Amp ON-OFF 4 - 14 m-sec Tension 740 gf จะทำให้ความเค้นตกค้างน้อยที่สุด (ประมาณ  $33 \text{ kgf/mm}^2$ ) ความลึกจากผิวของชิ้นงานก็น้อยกว่า  $40 \mu\text{m}$  ซึ่งดูได้จากกราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นที่ตกค้างและความลึกที่ปรากฏ



## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาวิเคราะห์วิจัยได้พบว่า เรื่องความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานและความเค้นที่ตกค้างตลอดจนความลึกของความเค้นที่ตกค้างเนื่องมาจากการตัดชิ้นงานด้วย CNC wire Cut EDM จะมีความสัมพันธ์กัน คือต้องพยายามให้แนวตัดของ Wire Cut ได้รับความร้อนน้อยที่สุด การที่จะให้แนวตัดได้รับอุณหภูมิน้อยต้องศึกษาวิธีการปรับ PARAMETER ของเครื่อง Wire Cut EDM โดยปกติผู้สร้างเครื่อง Wire Cut EDM จะไม่ค่อยเข้าใจถึงเรื่องผลกระทบต่อผิวชิ้นงานเท่าที่ควร มุ่งแต่จะทำอย่างไร เครื่องที่ผลิตออกมาสามารถทำการตัดได้รวดเร็ว วิธีการวัดความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานต้องใช้เทคนิค การวัดที่ละเอียด เครื่องมือที่ใช้วัด ต้องมีความเที่ยงตรงสูง ผลที่ได้จึงมีความถูกต้องมาก ส่วนการวัดความเค้นที่ตกค้างของผิวชิ้นงาน ต้องใช้เทคนิคที่ละเอียดกว่าการคำนวณหาค่ามีความยุ่งยากลำบากมาก เวลาทำการทดลองต้องควบคุมความเข้มข้นของกรดไนตริก ให้มีความเข้มข้นเท่ากันตลอด จึงจะทำให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องมากขึ้น

จากผลของงานวิจัย เมื่อเปรียบเทียบการปรับ Parameter ถ้าตั้ง  $I_p$  17 Amp, ON-OFF 6-16 m-sec และค่า Wire Tension 340 gf. จะได้ผิวชิ้นงานค่อนข้างหยาบประมาณ 8  $\mu\text{m}$  ความเค้นที่ตกค้าง จุดสูงสุดประมาณ 56  $\mu\text{m}$  แต่เมื่อปรับ Parameter มาที่  $I_p$  14 Amp, ON-OFF 4-14 m-sec Wire Tension 740 gf. แล้ว ความหยาบของผิวชิ้นงานจะลดลงเหลือเพียง 3  $\mu\text{m}$  ความเค้นที่ตกค้างประมาณ 33  $\text{kgf}/\text{mm}^2$  ความลึกของความเค้นจุดสูงสุดอยู่ที่ 40  $\mu\text{m}$  ซึ่งพอสรุปได้ว่าถ้าตั้ง  $I_p$  สูงแนวที่ถูกตัดจะเกิด ความร้อนสูงผิวของชิ้นงานจะหยาบ ค่าความเค้นที่ตกค้างจะสูงมาก แต่ถ้าตั้ง  $I_p$  ให้ต่ำลง ความร้อนในแนวตัดจะต่ำลงด้วย ผลของแนวตัดจะดีกว่า คือผิวจะละเอียดกว่า ความเค้นที่ตกค้างก็จะลดลง แต่ต้องใช้เวลาดัดชิ้นงานเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ส่วน Parameter ON-OFF และ Wire Tension มีผลน้อยกว่า  $I_p$  .

#### 5.2 แนวทางวิจัยในอนาคต

เนื่องจากการปรับค่า PARAMETER ของ IP ปรับได้เพียง 4 ค่า ซึ่งบริษัทผู้ผลิตเครื่อง Wire Cut EDM ทำค่าการปรับไว้น้อยเกินไป ค่าสร้างเครื่องมือพิเศษมาปรับให้ละเอียดขึ้น ก็จะได้ผลดีมากขึ้น ควรจะศึกษาการสปาร์คเวลาเปิดปิดของกระแสไฟฟ้า (ON-OFF) เพราะมีผลกระทบเหมือนกันจะอย่างไรให้สปาร์คถูกต้องสมบูรณ์ การจะสร้างเครื่องมือมาตรวจจับการสปาร์คในระบบว่าถูกต้องเพียงใด ควรจะศึกษาน้ำที่ จะมาใช้ในการหล่อเย็น เพราะน้ำแต่ละแห่งในโลกค่าตัวนำไฟฟ้าจะแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อผิวชิ้นงานได้เหมือนกัน

## เอกสารอ้างอิง

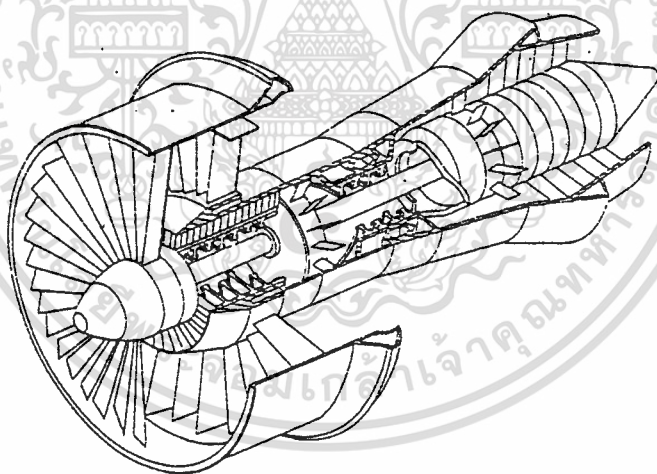
- [1] Wire Cut EDM A 280L Fine Sodick, machine condition table, Vol 1.
- [2] Fine Sodick Wire Cut EDM A 280L, Instruction manual and machine tool, Vol.1.0G.
- [3] Wire Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply, control syster, Fine Sodick, Vol.2.0u.
- [4] Wire Cut Electrical Discharge Machine NC Power Supply Unit MARK-EX, Code Instruction, Fine Sodick, Vol.1.0
- [5] Fine Sodick Wire Cut EDM, Fine API, Vol. 4.4
- [6] Operation manual. Surface Roughness Tester, Mitutoyo ; manual No.4366 and manual No.4339
- [7] Internation Standard ISO 4288, Rules and procedures for the measurment of surface roughness using stylus instruments, First edition, 1985
- [8] Inernational Standard ISO 4287/1 Surface Roughness, 1984
- [9] Zolotykn, B.N., and Korbova, J.P. Electro spark Machining of Metals, Vol.2, B.R. Lazarenko, ed., Consultants Bureau Enterprised, Inc., New York, p.79, 1964.
- [10] Beckwith, I.G., Buck, N.L. and Mangoni, R.D, Machanical Measurements, Addison-Wesely Pub. Company, p.329, 1982



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมสัมมนาวิชาการ  
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 7



21-22 ตุลาคม 2536

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยความเค้นตกค้างที่เกิดจากการตัดด้วย Wire Cut EDM

รศ. ทวี เทศเจริญ\*  
ผศ. อัครเดช ลินชุกต์\*

Prof. Kiyoshi Nishimoto\*\*  
Assoc.Prof. Masakazu Kagawa\*\*

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการตัดด้วย Wire cut EDM (Electrical Discharge Machine) เส้นลวดขุดด้วยโคบอลต์วิ่งผ่านชิ้นงานจะเกิดการสปาร์คที่อุณหภูมิ 2500-3000 °C ตัวควบคุมสัญญาณไฟฟ้าเป็นแบบ Pulse วัสดุชิ้นงานจะถูกแช่อยู่ในน้ำหรือน้ำมัน เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในเวลาตัด ประสิทธิภาพของการตัดขึ้นกับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความตึงในเส้นลวด ระยะเวลาเปิดปิดกระแสขนาดของกระแส ความเร็วของเส้นลวด ชิ้นงานตัดใช้เหล็ก SKD11

ผลของการตัดชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานถูกตัดด้วยอุณหภูมิสูงและถูกหล่อเย็นในทันทีทันใด ผิวของชิ้นงานจึงมีความเค้นตกค้างอยู่เล็กน้อย ความลึกไม่เกิน 30  $\mu\text{m}$ .

\* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research on Residual Stress of Wire Cut DEM

Assoc.Prof. Thavee Teschareon\*

Prof. Kiyoshi Nishimoto\*\*

As'sit.Prof. Akradach Sindhuphak\*

Assoc.Prof. Masakazu Kagawa\*\*

Abstract

The metal piece was cut using Wire Cut Electrical Discharge Machine. Cobalt coated wire passing through the piece work was sparked at temperature around 2500-3000°C by an electric pulse generator. During the cut, the piece work was kept cool in water or oil bath. The efficiency of the cut depends on many factors: wire tension, speed of wire fed and magnitude of electric current. Steel SKD11, was the metal used for study.

As the sample was cut at high temperature and immediately cooled down, the residual stress was created but not deeper than 30 μm from the surface.

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ของประเทศไทยเช่น อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก ได้พัฒนาไปมากซึ่งการผลิตชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล่านี้ต้องมีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้นการผลิตชิ้นงานด้วยการตะไบ การไสหรือการกลึง จึงลดความสำคัญลงไป เพราะกรรมวิธีเหล่านี้ให้ความเที่ยงตรงน้อยและใช้ได้กับเหล็กที่มีความแข็งไม่มากนัก ในกรณีที่เป็นเหล็กที่มีความแข็งมาก ๆ ซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมา ก็ไม่สามารถผลิตด้วยวิธีนี้ได้ wire cut EDM สามารถเข้ามาแทนในจุดนี้ได้เพราะสามารถตัดชิ้นงานที่มีความแข็งมาก ๆ ได้และให้ความเที่ยงตรงสูงเนื่องจากควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ผ่านการตัดด้วย wire cut EDM นี้จะมี Residual stress ในเนื้อโลหะบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากการตัดและได้พบว่า Residual stress ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละค่า parameter ของการตัด ด้วยเหตุนี้ทำให้สนใจที่จะศึกษาถึงค่า parameter ที่เหมาะสมสำหรับการตัดเหล็ก SKD 11 ที่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาเพราะเหล็กชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นแม่แบบในงานอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์

หาว่า parameter ที่เหมาะสมสำหรับการตัดชิ้นงานที่ทำจากเหล็ก SKD 11 ที่ผ่านการทำ tempering มาแล้ว โดยจะหาว่าปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวด (I<sub>p</sub>) ก็ทำให้เกิด residual stress ในเนื้อโลหะน้อยที่สุด

3. หลักการทำงานของ Wire Cut EDM.

Wire Cut EDM เป็นเครื่องมือที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูป ด้วยวิธีสปาร์ค (Spark) ดังนั้นถ้าเป็นชิ้นงานที่เป็นสื่อไฟฟ้า เราสามารถขึ้นรูปได้แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะมีความแข็งเพียงไร อีกทั้ง การขึ้นรูปยังใช้แรงกระทำน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปที่ต้องการความละเอียดสูง นอกจากนี้ เครื่อง EDM ยังสามารถขึ้นรูปรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนได้ ซึ่งการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่นไม่สามารถที่จะทำได้ ในปัจจุบันจึงมีการใช้ในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

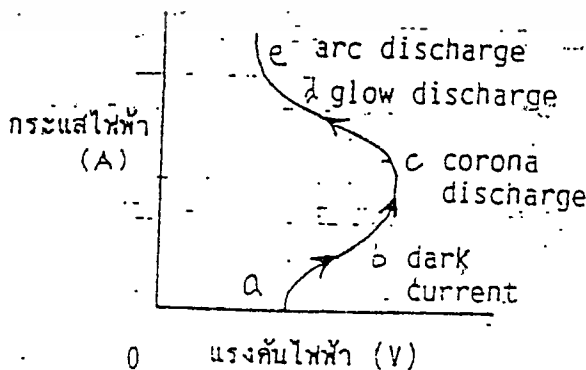
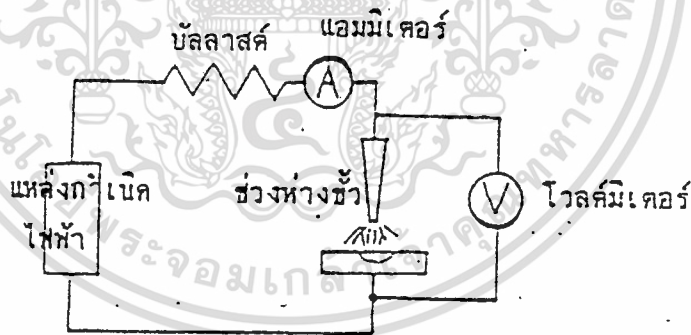
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ปราบปรามการสปาร์ค

ปราบปรามการสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปราบปรามการต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ใส่แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีฉนวนไฟฟ้า ประเภทของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซกั้นกลางอยู่ จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้นปราบปรามการดังกล่าวนี้จะหมายถึง การฝืนบังคับ ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้านขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน

สำหรับปราบปรามการสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั้น คือ "ฟ้าผ่า" นอกจากนั้นแล้วการทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้งานนั้น ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์หรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปราบปรามการสปาร์คในสุญญากาศ และนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค (เครื่อง EDM)



รูปที่ 1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ของการสปาร์ค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษ แรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์ระดับพื้นฐานที่สุดอันหนึ่ง โดยการสร้างวงจรสปาร์ตแบบง่ายาดังในรูปจะทำให้เกิดการสปาร์ตขึ้นในอากาศ

4. การคำนวณหาความเค้นที่ตกค้าง

ซึ่งจะสามารถคำนวณโดยใช้สูตร

$$\sigma_n = \frac{E}{L^2} \left[ \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^n \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i)} \frac{\Delta f_n}{\Delta t_n} - 4(T - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i) \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta f_i}{\Delta t_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^i \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_k)} \Delta f_i \right) + \sum_{i=1}^{n-1} (4 \cdot \Delta f_i \cdot \sum_{k=i+1}^{n-1} \Delta t_k) \right]$$

- $\sigma_n$  : stress of  $n_{th}$  removed thin layer (kgf/mm<sup>2</sup>).
- T : thickness after WEDM (mm).
- L : guage length (mm).
- $\Delta t_n$  : thickness of  $n_{th}$  removed thin layer (mm).
- $\Delta f_n = f_n - f_{n-1}$  : variation of deflection (mm).
- E : elastic modulus (2.1x10<sup>4</sup> kgf/mm<sup>2</sup>).

$\sigma_n$	1 (+)	2 (-)	3 (+)	4 (-)
$\sigma_1 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^3}{T} \frac{\Delta f_1}{\Delta t_1}$	0	0	0
$\sigma_2 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i)^3}{(T - \Delta t_1)} \frac{\Delta f_2}{\Delta t_2}$	$4(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i) \cdot \Delta f_1$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^1 \Delta t_k = 0$
$\sigma_3 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i)^3}{(T - \sum_{i=1}^2 \Delta t_i)} \frac{\Delta f_3}{\Delta t_3}$	$4(T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^2 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1$ $+ \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k)^2}{(T - \Delta t_1)} \Delta f_2$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^2 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^2 \Delta t_k = (\Delta f_1 \Delta t_2) \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_4 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^3 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_4}{\Delta t_4}$	$4(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta f_i$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \Delta t_1)^2}{T} \cdot \Delta f_1 + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k)^2}{(T - \Delta t_1)} \cdot \Delta f_2 + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^2 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_3$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^3 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^3 \Delta t_k + \Delta f_3 \sum_{k=4}^3 \Delta t_i - (\Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3) + \Delta f_2 \Delta t_3) \cdot 4$
$\sigma_5 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^4 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_5}{\Delta t_5}$	$4(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^4 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^3 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_4$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^4 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^4 \Delta t_k + \Delta f_3 \sum_{k=4}^4 \Delta t_k + \Delta f_4 \sum_{k=5}^4 \Delta t_k - (\Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4) + \Delta f_3 \Delta t_4) \cdot 4$
$\sigma_6 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^5 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_6}{\Delta t_6}$	$4(T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^5 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^5 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^4 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_5$	$\Delta f_1 \sum_{k=2}^5 \Delta t_k + \Delta f_2 \sum_{k=3}^5 \Delta t_k + \Delta f_3 \sum_{k=4}^5 \Delta t_k + \Delta f_4 \sum_{k=5}^5 \Delta t_k + \Delta f_5 \sum_{k=6}^5 \Delta t_k - (\Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5) + \Delta f_4 \Delta t_5) \cdot 4$
$\sigma_7 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^6 \Delta t_i)} \cdot \frac{\Delta f_7}{\Delta t_7}$	$4(T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^6 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^6 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^5 \Delta t_k)} \cdot \Delta f_6$	$\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6) + \Delta f_5 \Delta t_6 \} \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_8 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^7 \Delta t_i)} \frac{\Delta f_8}{\Delta t_8}$	$4(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^7 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^6 \Delta t_k)} \Delta f_7$	$\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7) + \Delta f_6 \Delta t_7 \} \cdot 4$
$\sigma_9 = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^8 \Delta t_i)} \frac{\Delta f_9}{\Delta t_9}$	$4(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^8 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^7 \Delta t_k)} \Delta f_8$	$\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_6 (\Delta t_7 + \Delta t_8) + \Delta f_7 \Delta t_8 \} \cdot 4$
$\sigma_{10} = \frac{E}{L^2}$	$\frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i)^2}{(T - \sum_{i=1}^9 \Delta t_i)} \frac{\Delta f_{10}}{\Delta t_{10}}$	$4(T - \sum_{i=1}^{10} \Delta t_i) \cdot \sum_{i=1}^9 \Delta f_i$	$\text{above value} + \frac{4}{3} \frac{(T - \sum_{k=1}^9 \Delta t_k)^2}{(T - \sum_{k=1}^8 \Delta t_k)} \Delta f_9$	$\{ \Delta f_1 (\Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_2 (\Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_3 (\Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_4 (\Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_5 (\Delta t_6 + \Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_6 (\Delta t_7 + \Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_7 (\Delta t_8 + \Delta t_9) + \Delta f_8 \Delta t_9 \} \cdot 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. การเตรียมชิ้นงาน

- 5.1 นำเหล็ก SKD 11 มาทำการ Machine ให้ได้ขนาด 6x10x90 มม.
- 5.2 นำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชม. แล้วปล่อยให้เย็นในเตาอบ
- 5.3 ตัดชิ้นงานแต่ละชิ้นด้วยเครื่อง wire cut EDM ของ Sodick รุ่น A280 โดยตัดผ่าครึ่งชิ้นงานตามความยาว ด้วยค่า  $I_p$  ต่าง ๆ กัน จะได้ชิ้นงานขนาด 3x10x90 มม.

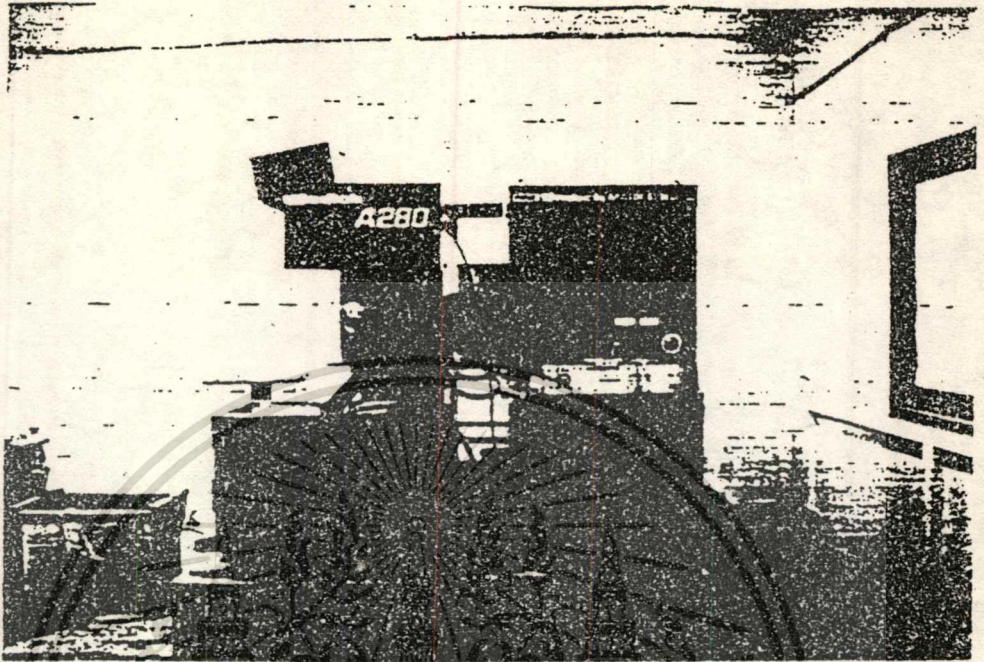
ตารางที่ 1 ส่วนผลทางเคมีของเหล็ก SKD 11 เป็นเปอร์เซ็นต์

เหล็ก	C	Se	Mn	P	Cr	Mo	S	V
SKD 11	1.40	0.4	0.6	0.03	11.00	0.80	0.03	0.20
	1.60	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	13.00	1.20	น้อยกว่า	0.50

ตารางที่ 2 ค่า Parameter ที่ใช้ในการตัด

ON-OFF ( $\mu$ sec.)	$I_p$ (a)	WIRE SPEED (cm/min)	TENSION (gf)
4 - 14	17	170	500
4 - 14	16	170	500
4 - 14	15	170	500
4 - 14	14	170	500

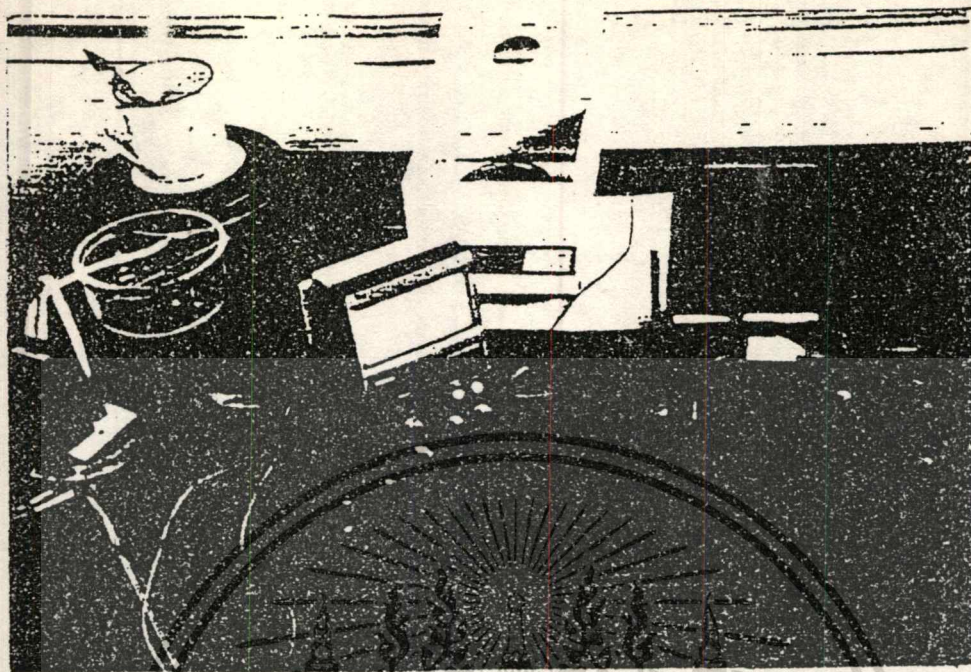
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 เครื่อง Wire Cut EDM

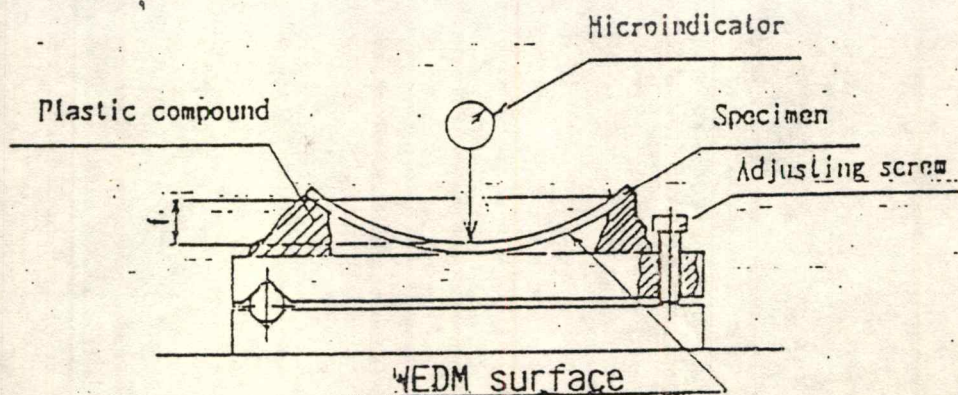
## 6. การทดสอบ

- 6.1 Lay out ตำแหน่งที่จะทำการวัดค่าความโก่ง (deflection)
- 6.2 ทำความสะอาดชิ้นทดสอบไม่ให้มีคราบน้ำมันเคลือบติดอยู่
- 6.3 ทำการวัดขนาดความกว้าง ความยาวและความหนาของชิ้นทดสอบ โดยขนาดต่าง ๆ ที่ได้จากค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 จุด
- 6.4 นำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนักและวัดค่าความโก่ง



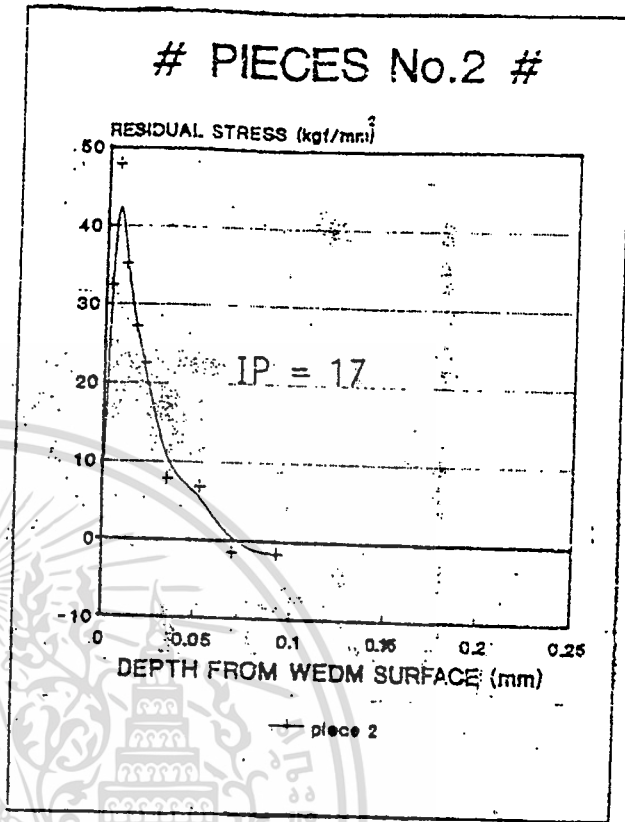
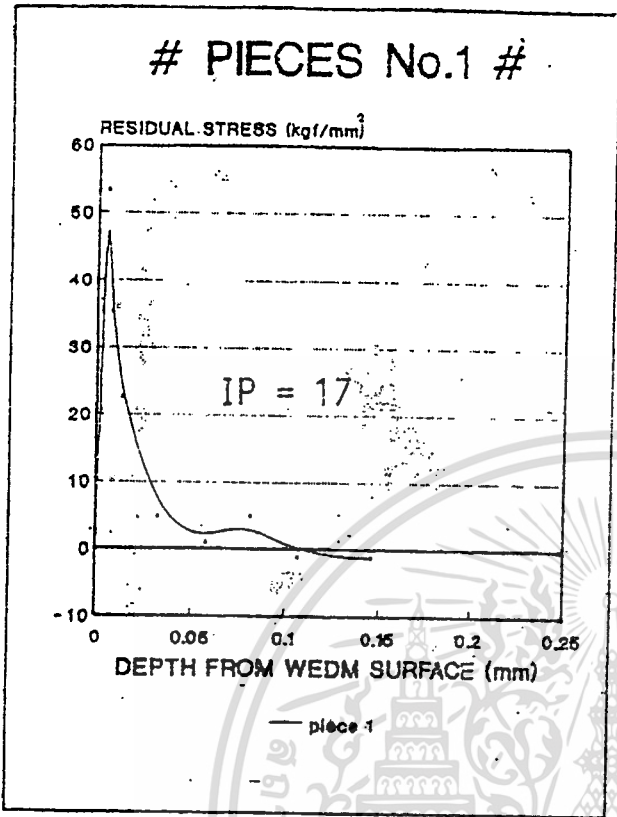
รูปที่ 3 ชุดเครื่องมือที่ใช้หา Defection

- 6.5 Coat ชั้นทดสอบด้วย parafin ทุกด้าน ยกเว้นด้านที่ผ่านการตัดด้วย wire cut EDM
- 6.6 กัดชั้นทดสอบที่ coat เรียบร้อยแล้วด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 20% ซึ่งได้จากกรดไนตริกเข้มข้น 100% ปริมาตร 8 ส่วนกับ methyl alcohol 2 ส่วน
- 6.7 นำชั้นทดสอบมาล้างด้วยน้ำมันแกะ parafin ออกเพื่อนำไปชั่งน้ำหนักและวัดค่าความโค้ง
- 6.8 ทำการทดสอบเช่นนี้ (4-6) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่าความโค้งที่วัดได้ไม่เปลี่ยนแปลงจึงจะหยุดทดสอบ



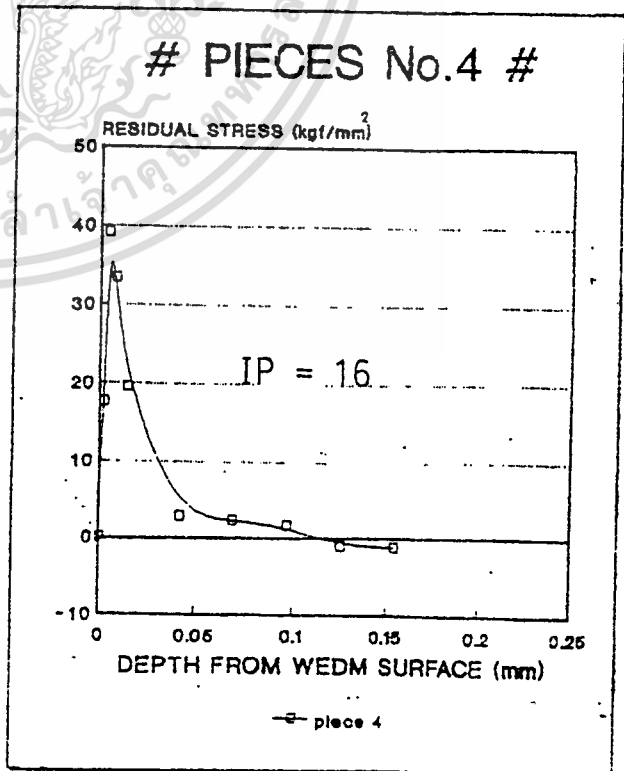
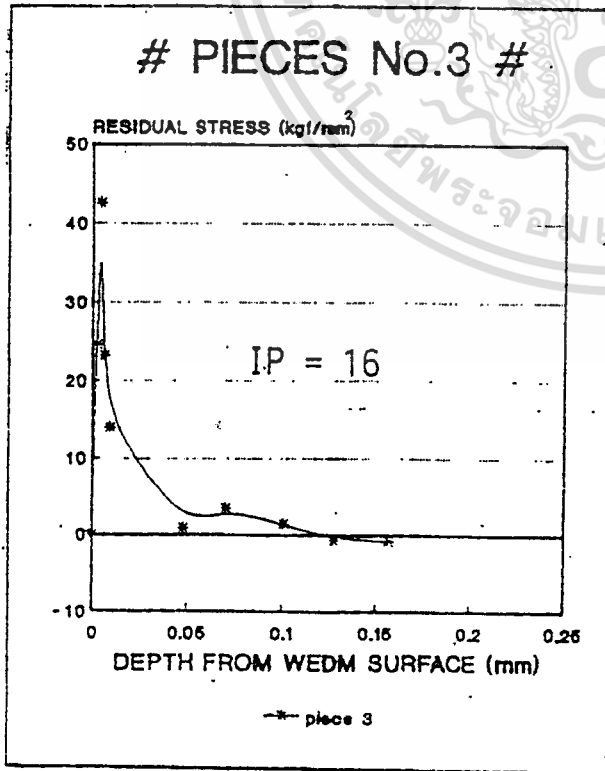
รูปที่ 4 การวัดความโค้งของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



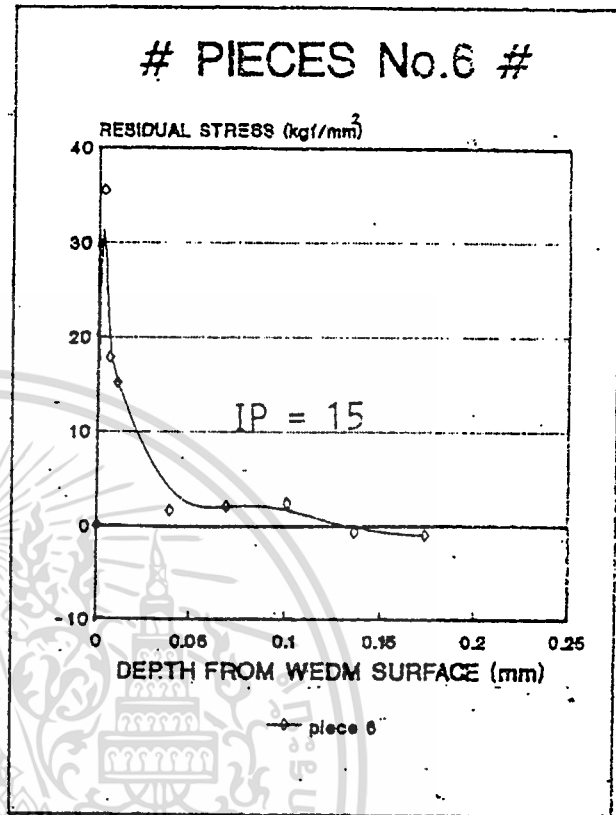
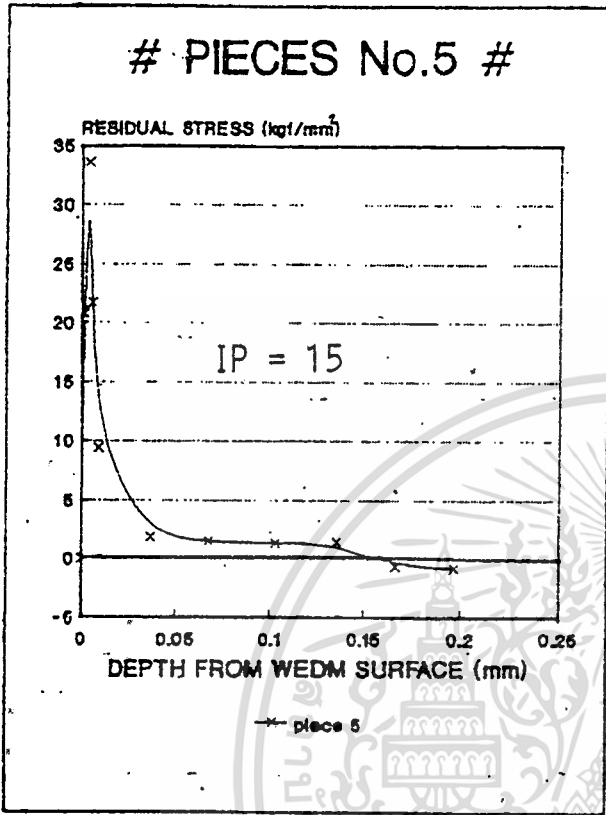
รูปที่ 5.1 ความเค้นตกค้าง

รูปที่ 5.2 ความเค้นตกค้าง



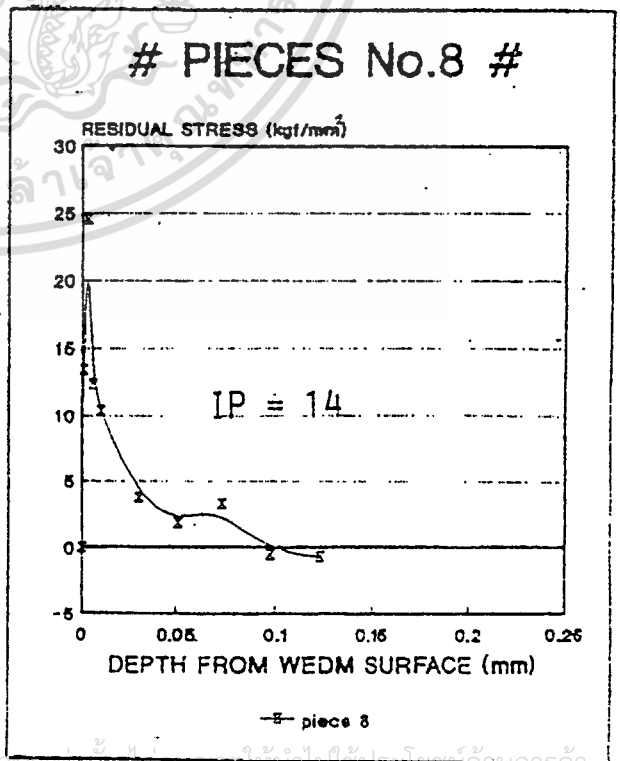
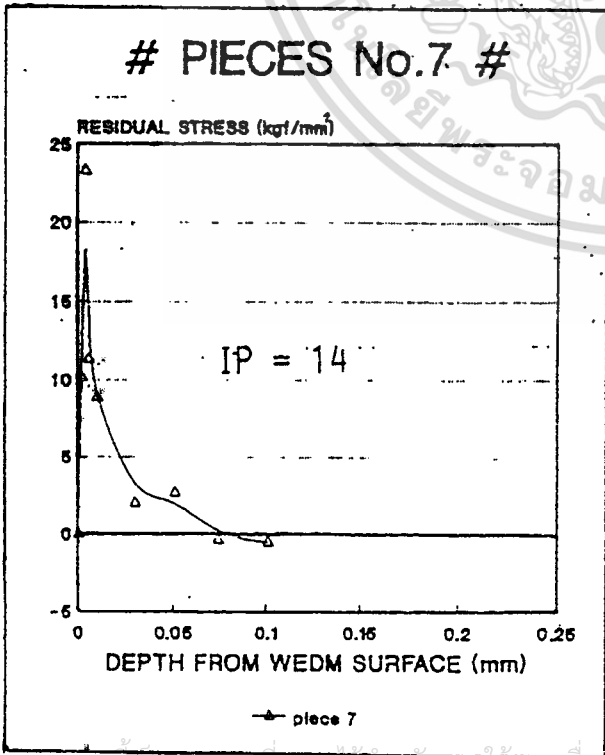
รูปที่ 5.3 ความเค้นตกค้างการใช้งานเพื่อการศึกษา รูปที่ 5.4 ความเค้นตกค้าง

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ความเค้นตกค้าง

รูปที่ 5.6 ความเค้นตกค้าง



รูปที่ 5.7 ความเค้นตกค้าง

รูปที่ 5.8 ความเค้นตกค้าง

## 7. สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 จะใช้กระแสไฟฟ้า 17 Amp. ระยะเวลาในการเปิดปิดกระแส 4-14 วินาที ความเค้นที่ตกค้างสูงสุดประมาณ  $45 \text{ Kgf/mm}^2$  และความลึกตำแหน่งความเค้นตกค้างสูงสุด  $30 \text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเค้นที่ตกค้างค่อนข้างสูง

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะใช้กระแสไฟฟ้า 16 Amp. ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า รูปที่ 5.1 และ 5.2 ระยะเวลาในการเปิดปิดกระแส 4-14 วินาที ความเค้นที่ตกค้างประมาณ  $38 \text{ Kgf/mm}^2$  ความลึกของตำแหน่งความเค้นตกค้างสูงสุดประมาณ  $25 \text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเค้นที่ตกค้างเริ่มลดความลึกลงมา

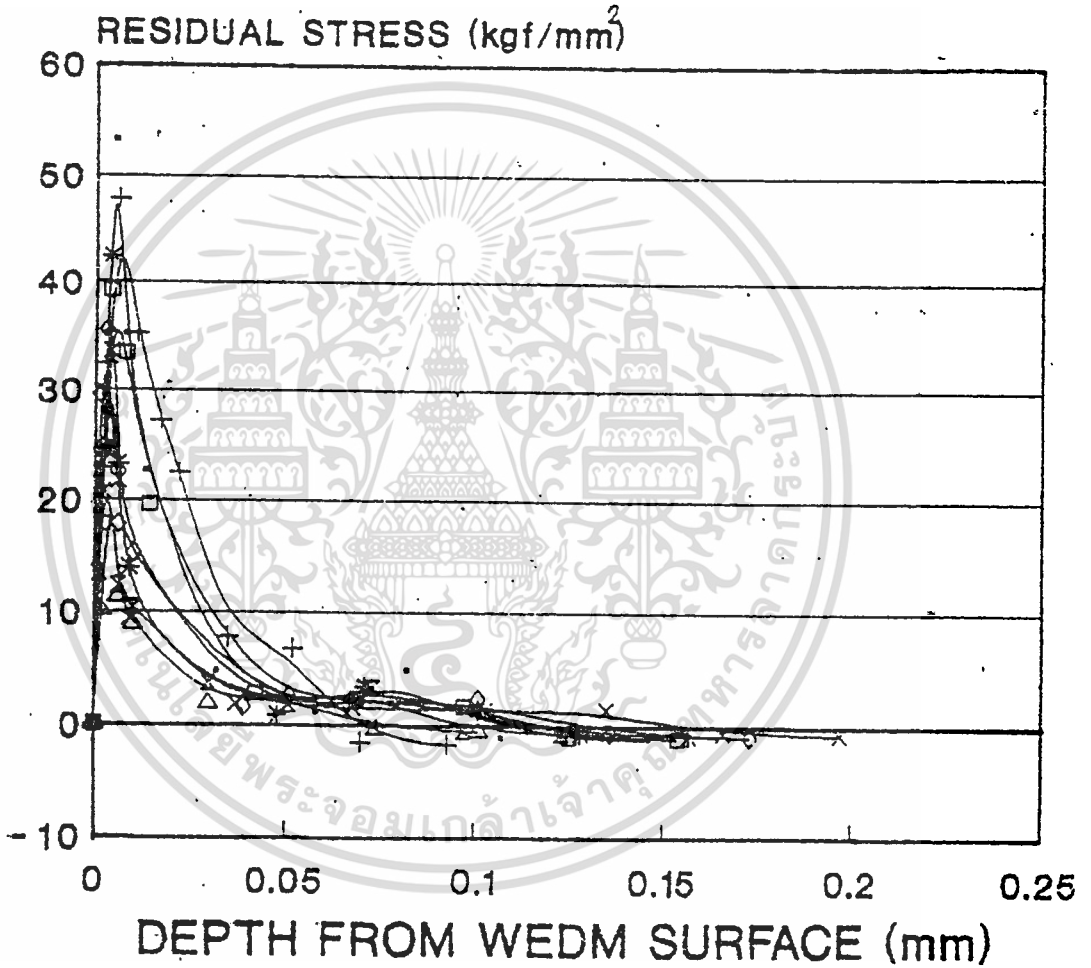
จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 ใช้กระแสไฟฟ้า 15 Amp. เวลาเปิดปิดกระแส 4-14 วินาที ความเค้นตกค้าง  $30 \text{ Kgf/mm}^2$  ความลึกสูงสุดของตำแหน่งที่ความเค้นตกค้างประมาณ  $18 \text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งใช้กระแสไฟฟ้าต่ำลง

จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 ใช้กระแสไฟฟ้า 14 Amp. เวลาในการเปิดปิดกระแส 4-14 วินาที ความเค้นที่ตกค้าง  $20 \text{ Kgf/mm}^2$  ความลึกประมาณ  $15 \text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าอื่น ๆ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ พบว่าค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในเนื้อเหล็กที่ผ่านการตัดด้วยเครื่อง Wire Cut EDM จะแปรผันตรงกับปริมาณของกระแสที่ผ่านเส้นลวด ( $I_p$ ) ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อลดปริมาณของกระแสที่ผ่านเส้นลวด ค่าความเค้นตกค้างสูงสุด (Maximum Residual Stress) จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ลึกของผิว EDM Surface มากกว่าการใช้ปริมาณกระแสที่ต่ำกว่า

ข้อสังเกตถ้าใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ จะต้องใช้เวลาในการตัดชิ้นงานมาก

# RESIDUAL STRESS FROM WIRE CUT EDM.



- |         |         |   |         |         |         |   |         |
|---------|---------|---|---------|---------|---------|---|---------|
| —       | piece 1 | + | piece 2 | *       | piece 3 | □ | piece 4 |
| ×       | piece 5 | ◇ | piece 6 | △       | piece 7 | ⊗ | piece 8 |
| IP = 17 | ◆       | + |         | IP = 16 | *       | □ |         |
| IP = 15 | ×       | ◇ |         | IP = 14 | △       | ⊗ |         |

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท โชติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบเครื่อง Wire Cut DEM รุ่น A280 และเงินทุนทำวิจัย จนทำให้ผลงานวิจัยเกี่ยวกับความเค้นที่ตกค้างที่เกิดจากการตัดด้วย wire cut DEM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

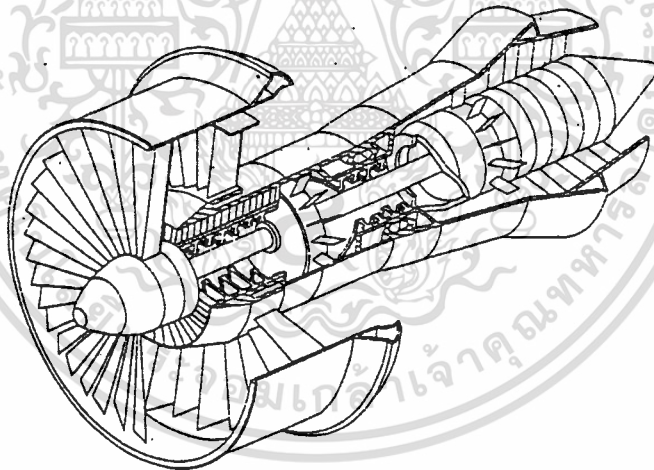
เอกสารอ้างอิง

1. Wire-cut DEM A280L Fine Sodick, machine condition table, Vol 1.
2. Fine Sodick Wire-Cut DEM A280L , instruction manual and machine tool, Vol.1.0G
3. Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply , control system, Fine Sodick , Vol. 2.0U.
4. Wire-Cut Electrical-Discharge Machine NC Power Supply Unit MARK-EX , Code Instruction, Fine Sodick , Vol. 1.0
5. Fine Sodick Wire Cut-EDM , Fine APT, Vol. 4.4
6. Material and manufacturing Processes Vol.4 No.3 PP. 411-423 (1989) Gadalla , A.M., Tsai, W " Machining of WC-CO Composites."
7. Tooling and Production Vo.34 No.10 PP. 53-56 (1989 Jan) Dobbins, Donald B. "Wire Cut EDM-How many Faxes?"



การประชุมสัมมนาวิชาการ

# เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 7



21-22 ตุลาคม 2536

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานที่เกิดจากการตัดด้วย Wire Cut EDM

รศ. ทวี เทศเจริญ\*

Prof. Kiyoshi Nishimoto\*\*

ผศ. อัครเดช สินธุภัค\*

Assoc.Prof. Masakazu Kagawa\*\*

บทคัดย่อ

วิธีการขึ้นรูปวัสดุให้เป็นชิ้นงาน โดยใช้ Wire Cut Electrical Discharge Machine (EDM) เส้นลวดที่ขูดด้วยโคบอลจะถูก spark ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Pulse การทำงานของระบบถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ การตัดสามารถตัดได้ทั้งวัสดุอ่อนและแข็ง เช่น โลหะคาร์ไบด์

ผลของการตัดจะได้รูปร่างและขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรง ผิวของชิ้นงานจะราบเรียบมีความหยาบไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$

\* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\*\* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research on Surface Roughness of wire cut EDM

Assoc.Prof. Thavee Teschareon\*

Prof. Kiyoshi Nishimoto\*\*

Assit.Prof. Akradech Sindupak\*

Assoc.Prof. Masakazu Kagawa\*\*

Abstract

Wire Cut Electrical Discharge Machine was used for cutting piece work. Cobalt coated wire was spark by an electric pulse generator. The system was in turn controlled by a computer. The method can be used to cut both mild and hard metal such as metal carbide.

The piece work could be cut into desired shape of high accuracy. The surface roughness of the cut was less than 5 $\mu$ m.

## 1. บทนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันนี้มีความเจริญก้าวหน้าไปมาก มีการนำเอาความรู้ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับความรู้ทางด้านเครื่องกล โดยได้มีการนำความรู้ทางด้าน CNC (Computer Numerical Control) ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างคอมพิวเตอร์และเครื่องจักร

ผลของการทำงานของเครื่อง CNC จะทำให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงและละเอียดตรงตามที่เราต้องการ เป็นที่ต้องการของงานอุตสาหกรรมในอนาคต ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องศึกษาการใช้งานและผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานของเครื่อง CNC

เครื่อง Wire Cut EDM ก็เป็นเครื่อง CNC ชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการของความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานที่เพียงพอที่จะใช้ในการตัดโลหะ โดยใช้เส้นลวดโลหะที่เป็นเสมือนขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่ง การตัดผ่านของเส้นลวดจะมีผลต่อผิวของชิ้นงาน ซึ่งเราสามารถกำหนดตัวแปรที่ใช้ควบคุมความหยาบและความละเอียดที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อผิวชิ้นงาน เพื่อจะใช้เป็นลู่ทางในการใช้เครื่อง wire cut EDM ในอนาคต

## 2. ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งขาดเสถียรภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบวิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือนการใส่ไฟฟ้าเข้าไปในช่องว่างแคบ ๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป

สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำขึ้นภายในสวารละลายโดยใช้ทองแดง, กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้นจะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง (EDM) นั้นจะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกันเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ค แต่ต้องใช้วิธีการเปิด-ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายมากเกินไปจนเสียรูปทรง

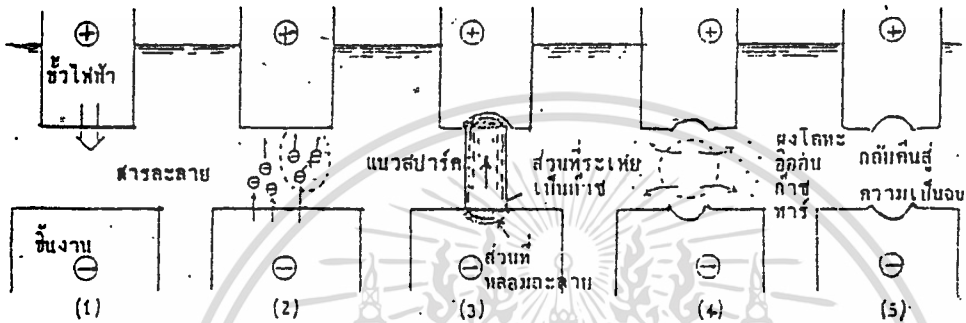
วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้อาศัยการใช้พลังงานที่ระดับสูง ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง

ในกรณีใช้งานจริงนั้น จะใช้ระบบ NC (Numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ละลูกของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 สภาพของการสปาร์คแต่ละครั้ง

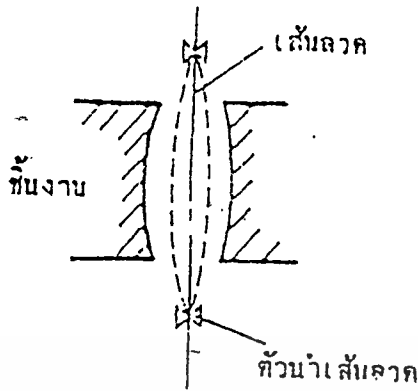
### 2.1 แรงดึงของเส้นลวด

เส้นลวดที่ใช้ในการขึ้นรูปดังกล่าวนี้ต้องมีความดึงที่เหมาะสม ตามรูปที่ 2 ถ้าเส้นลวดซึ่งเป็นเครื่องมือของเครื่อง EDM ประเภท wire cut หย่อน จะทำให้ความละเอียดในการขึ้นรูปต่ำลง และควบคุมระยะห่างการสปาร์คได้ยาก ในระหว่างการขึ้นรูปนั้นแรงดันการสปาร์คที่เกิดขึ้นจะถ่ายทอดสู่เส้นลวดซึ่งถูกขึงยึดไว้กับตัวนำเส้นลวดบนล่าง ทำให้เส้นลวดเกิดการสั่นไปด้วย ถ้าแรงดึงในเส้นลวดต่ำเกินไป จะทำให้ช่วงระยะการสั่นกว้างมากขึ้น จะมีอิทธิพลต่อความละเอียดของงาน ซึ่งผลเสียที่ตามมาคือ จะเกิดปรากฏการณ์ที่ว่าผิวชิ้นงานจะเว้าเข้า เป็นลักษณะแฉ่งที่มีก้นอยู่ตรงกลางชิ้นงาน ดังในรูป 2

ในทางกลับกัน ถ้าใช้แรงดึงกับเส้นลวดมากจนตึงเกินไป โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์นี้จะน้อยลง แต่เวลาที่สภาพการสปาร์คเกิดการเปลี่ยนแปลงจนมีกระแสไฟฟ้าไหลมากเกินไป อาจทำให้เส้นลวดขาดได้

นอกจากนั้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเส้นลวด ก็มีผลต่อความละเอียดในการขึ้นรูปด้วย ดังนั้นเครื่อง EDM ประเภท wire cut รุ่นที่มีระดับเกรดสูง บางรุ่นจะมีกลไกระบบ tensio servo ประเภทตัดไว้เพื่อควบคุมให้แรงดึงคงที่อยู่ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 การสั้นของเส้นลวดระหว่างหัวนำ

2.2 ความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวด

เส้นลวดที่ใช้ในเครื่อง EDM ดังกล่าว จะมีขนาดเล็ก (โดยปกติ 0.2) ซึ่งถ้าเกิดการสปาร์คขึ้นหลาย ๆ ครั้ง ที่ตำแหน่งเดียวกัน ก็จะทำให้สึกหรอจนขาดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการส่งป้อนเส้นลวดความเร็วคงที่ระดับหนึ่ง เพื่อสำหรับส่งจ่ายเส้นลวดใหม่มาใช้งานอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่มีความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวดที่ช้าเกินไป ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบ ซึ่งมีกระแสไฟมีขนาดใหญ่ เส้นลวดก็อาจจะขาดได้ แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ก็จะมีผลเสียต่อความละเอียดของงาน ในทางกลับกันถ้าเร็วเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง (เส้นลวดใช้แล้วทิ้ง) ซึ่งถ้าปริมาณขนาดของเส้นลวดที่เตรียมไว้มีไม่มากพอ ก็อาจจะไม่สามารถทำงานขึ้นรูปที่ใช้เวลานานได้

3: อุปกรณ์และเครื่องจักรในการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการตัด

ใช้เหล็ก SKD 11 ซึ่งมีส่วนผสมตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก SKD 11

เหล็ก	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	S	V
SKD 11	1.40	0.40	0.60	0.03	11.00	0.80	0.03	0.20
	1.60	น้อยกว่า	น้อยกว่า	น้อยกว่า	13.00	1.20	น้อยกว่า	0.50

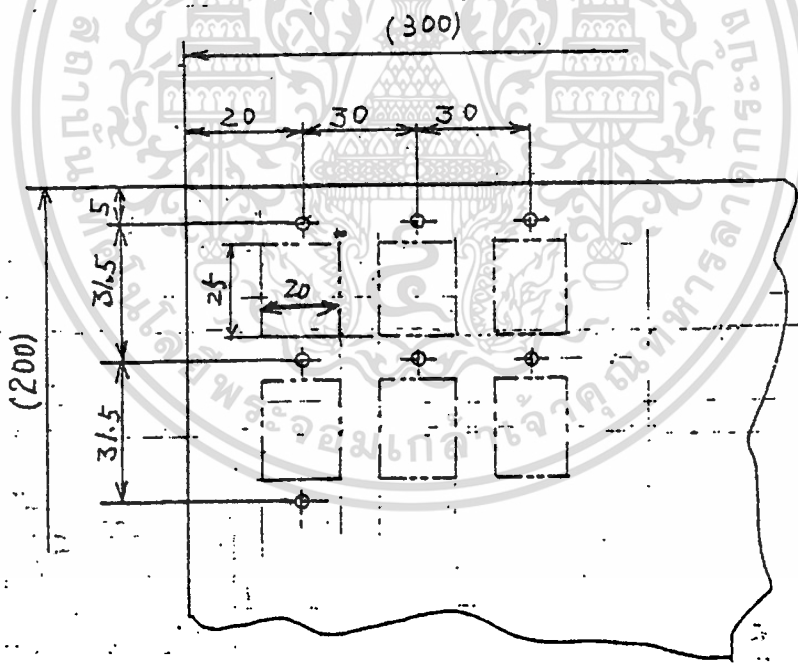
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2 เครื่อง Wire Cut EDM เป็นเครื่องของ Sodick รุ่น A280
- 3.3 เครื่องตรวจสอบความหยาบละเอียดใช้เครื่อง Surf-test Analyzer ของ Mitutoyo รุ่น 402
- 3.4 ลวดที่ใช้ต้องขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.2 มิลลิเมตร ชุบด้วยโคบอล

4. ขั้นตอนในการทดลอง

- 4.1 นำเหล็ก SKD 11 ขนาด 10 มิลลิเมตร ไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600 °C เพื่อคายความเค้นที่ตกค้าง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นลงในเตาอบ
- 4.2 นำเหล็กที่อบแล้วมาตัดด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ตามรูปที่ 3 โดยตั้งตัวแปรตามตารางที่ 2



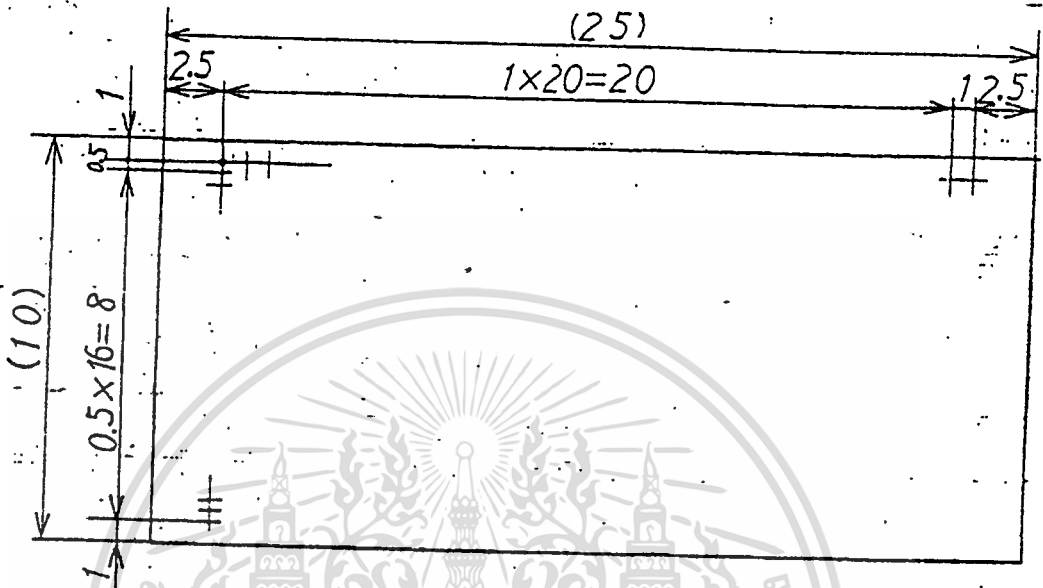
รูปที่ 3 ชิ้นงานที่ตัดด้วย wire cut EDM

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ตัดชิ้นงาน

IP	P	SV	SF	MA	ON	OFF	Speed	Tension
14-17	1	5	6	4	4	14	1	5

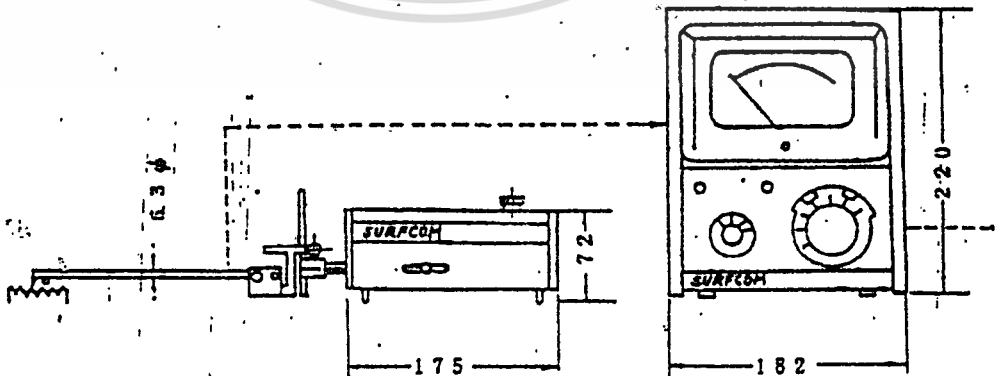
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 นำชิ้นงานที่ตัดจากเครื่อง wire cut EDM มา Lay out ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานที่ Lay out เพื่อจะวัดค่าความหยาบละเอียดของผิว

4.4 นำชิ้นงานที่ Lay out เสร็จแล้วมาวัดด้วยเครื่องตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิว Surf test Analyzer ตามรูปที่ 5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 5 รับเครื่องตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิวระโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.5 นำค่าความหนาแน่นเฉียดที่ได้ไปป้อน program ซึ่งใช้ภาษา C เป็นตัว program จะได้รูปค่าความหนาแน่นเฉียดของชิ้นงานตามรูปที่ 6-13
- 4.6 นำค่าความหนาแน่นเฉียดที่ได้จากรูปที่ 6-13 มาเขียนรูปเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเฉียดของผิวกับค่า IP ตามรูปที่ 14

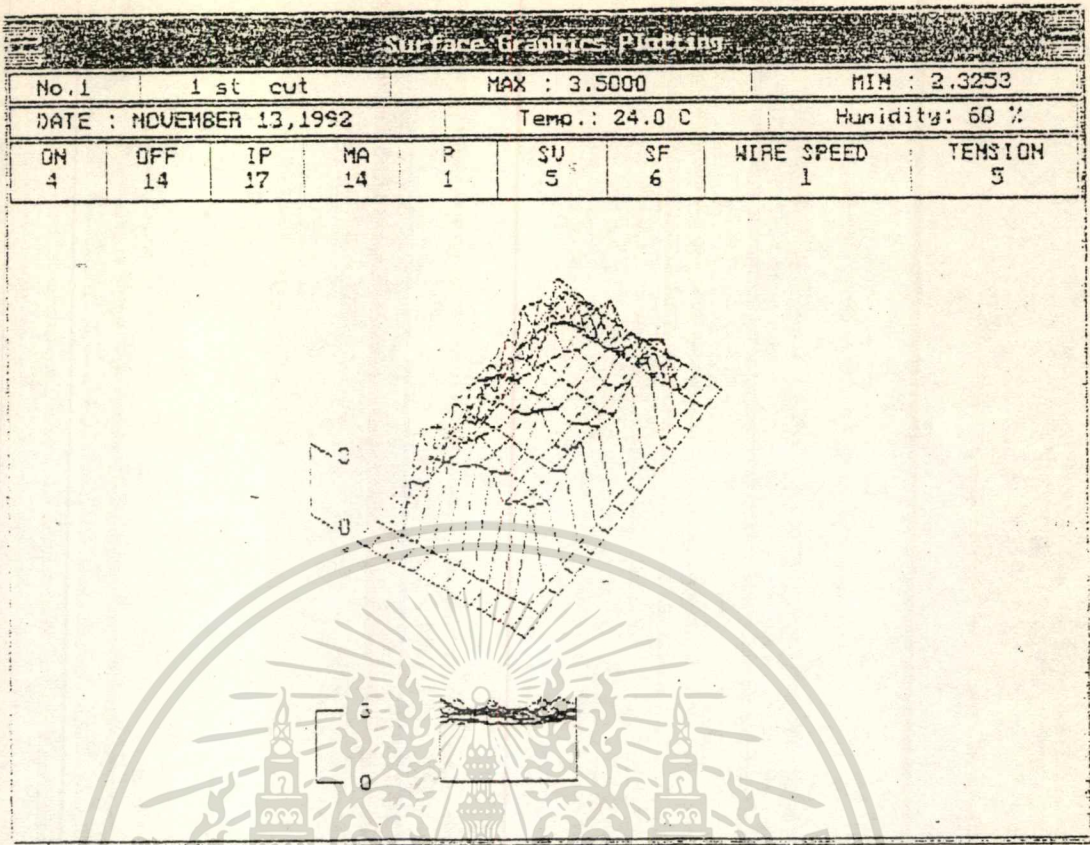
#### 5. สรุปผลการทดลอง

จากกราฟ รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเฉียดของผิวกับค่า IP ค่า ON ที่มากกว่าจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหนาแน่นมากกว่า เนื่องจากการเพิ่มค่า ON จะทำให้พลังงานการสปาร์ค (Discharge Energy) เป็นผลให้ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) เพิ่มขึ้นด้วย ความหนาแน่นจึงมากกว่า

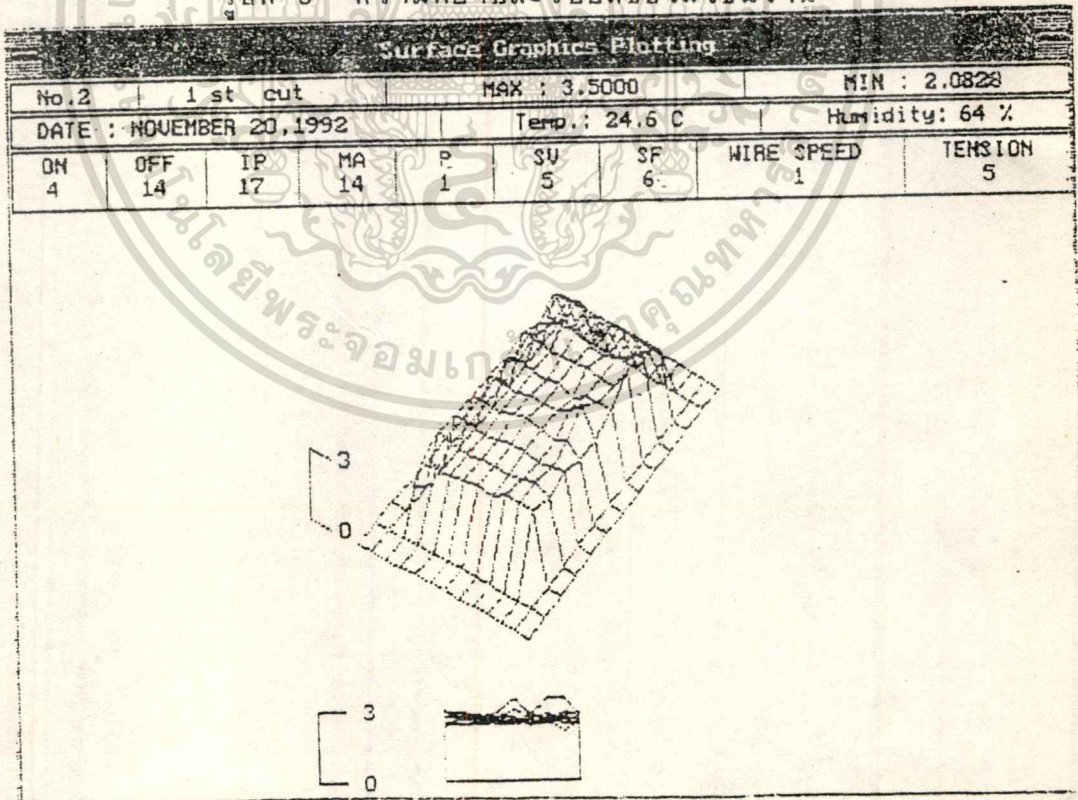
ค่า OFF จะไม่มีผลกระทบมากเท่ากับค่า ON เนื่องจากค่า OFF เป็นเพียงตัวควบคุมพลังงานการสปาร์คเท่านั้น แต่ค่า ON เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

ค่า IP ถ้ามีมากกว่าจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหนาแน่นมากกว่า เนื่องจากการเพิ่มค่า IP จะทำให้พลังงานการสปาร์คเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจึงมากกว่า เช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่า ON

นั่นคือ ค่า IP กับค่า ON เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

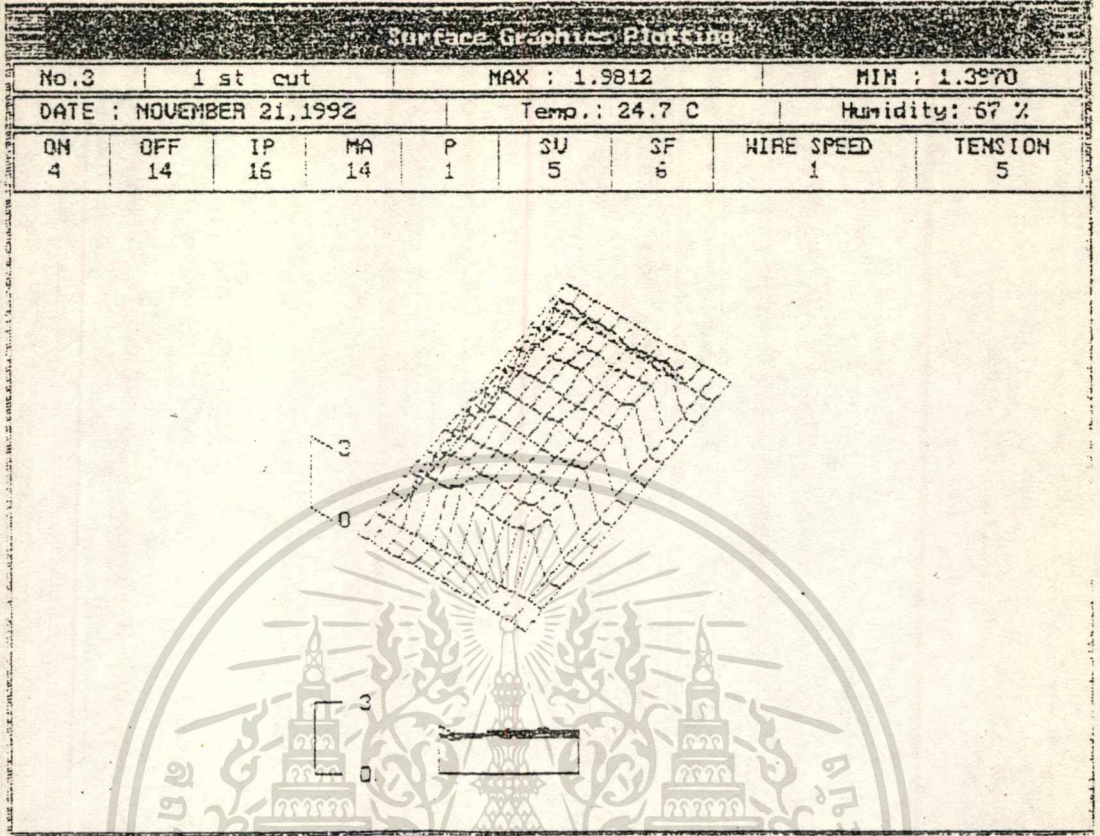


รูปที่ 6 ความหนาของละเอียดของผิวชิ้นงาน

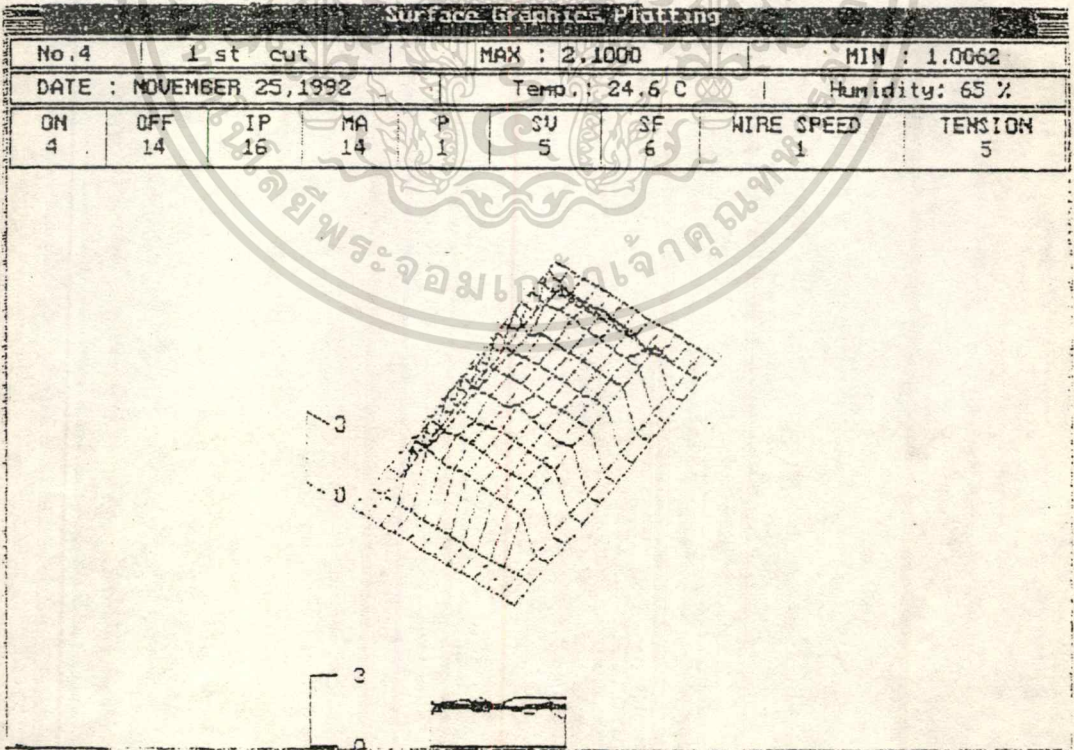


รูปที่ 7 ความหนาของละเอียดของผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

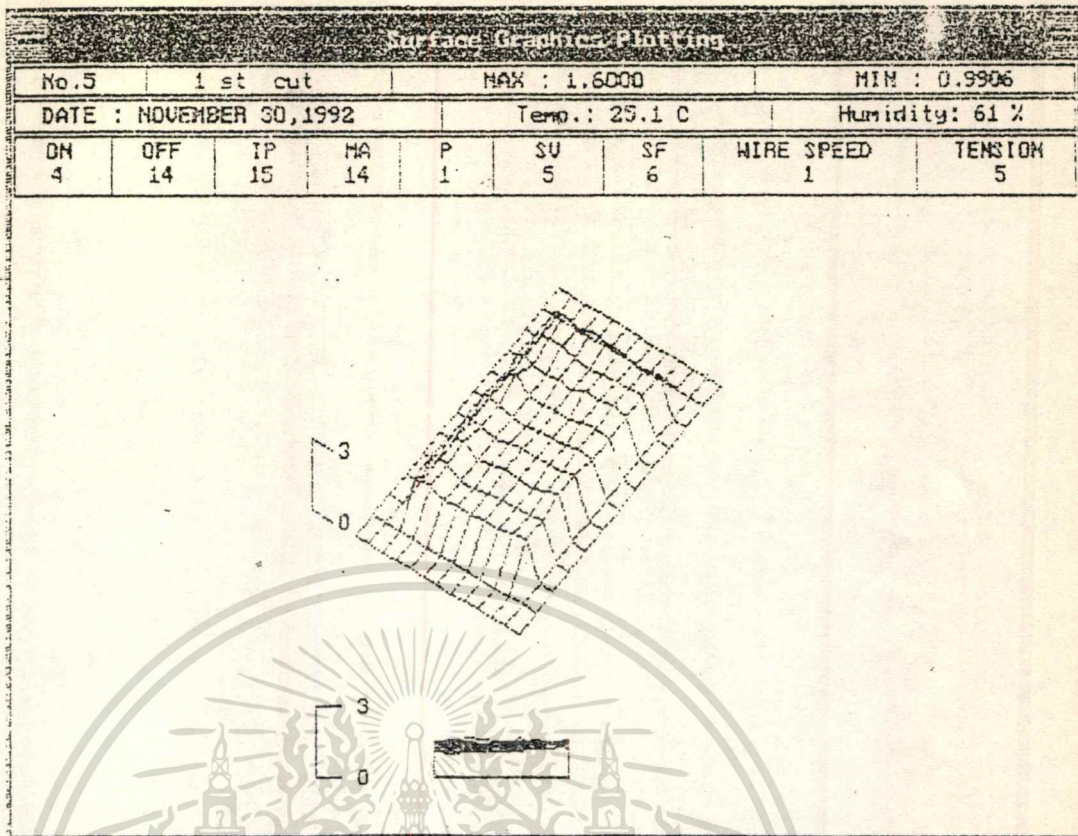


รูปที่ 8 ความหยาบละเอียดของผิวที่งาน

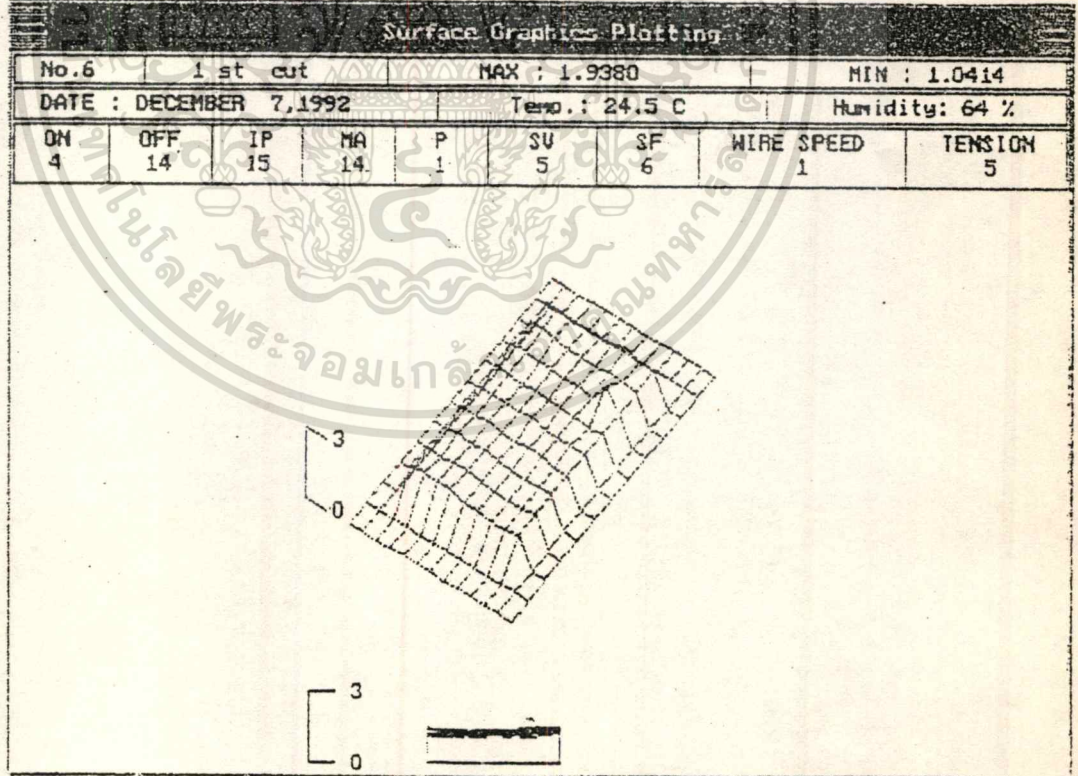


รูปที่ 9 ความหยาบละเอียดของผิวที่งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



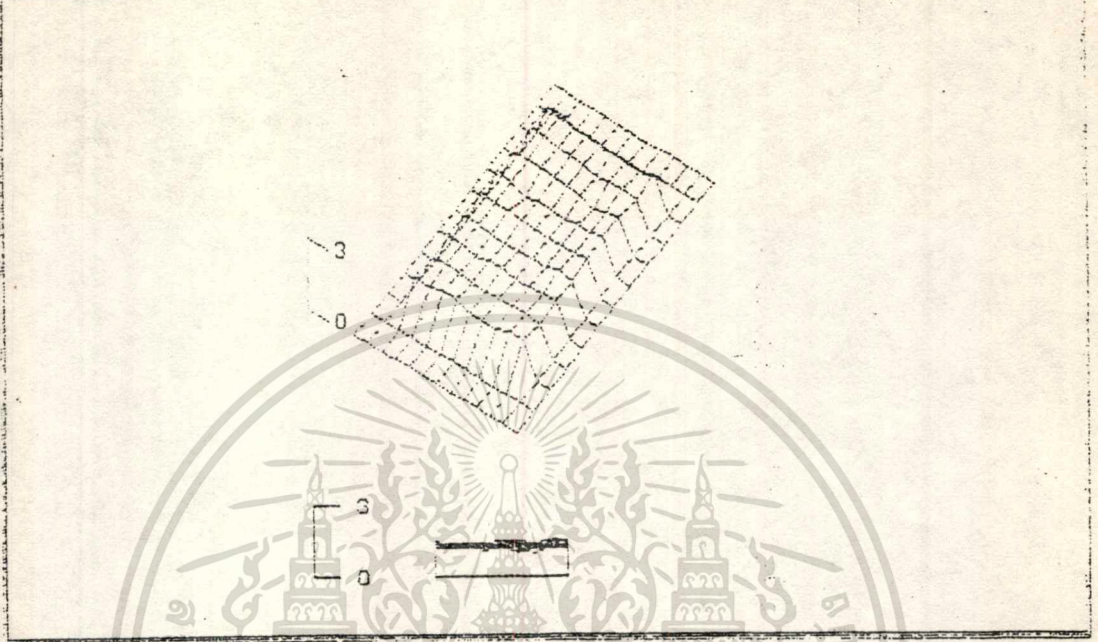
รูปที่ 10 ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน



รูปที่ 11 ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

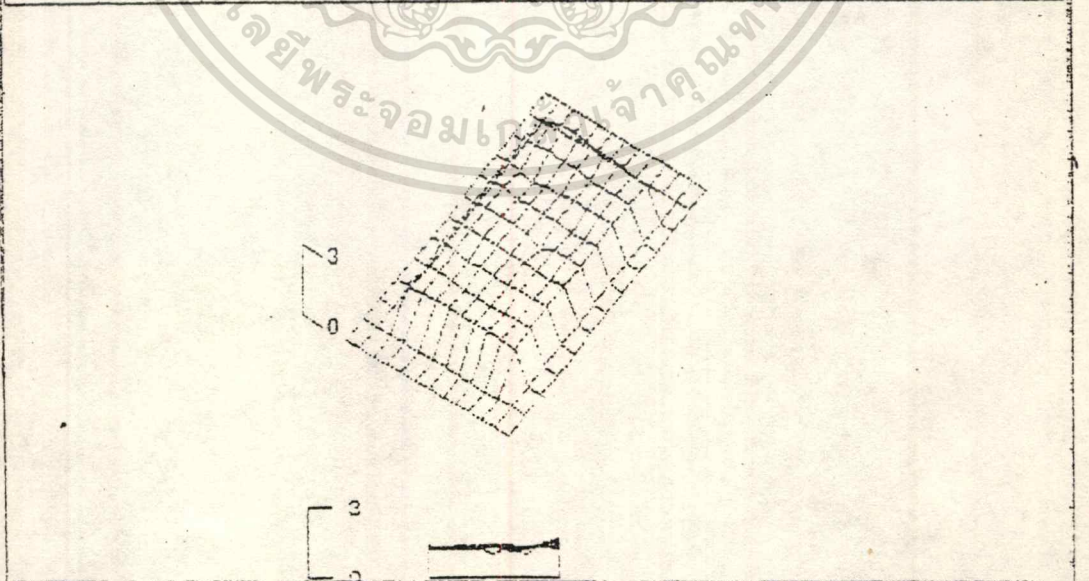
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่อาจกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

No.7									
1 st cut			MAX : 1.5702				MIN : 0.9781		
DATE : DECEMBER 11, 1992					Temp.: 24.3 C			Humidity: 69 %	
ON	OFF	IP	MA	P	SU	SF	WIRE SPEED	TENSION	
4	14	14	14	1	5	6	1	5	



รูปที่ 12 ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

Surface Graphics Plotting									
No.8									
1 st cut			MAX : 1.6223				MIN : 0.9457		
DATE : DECEMBER 16, 1992					Temp.: 24.8 C			Humidity: 63 %	
ON	OFF	IP	MA	P	SU	SF	WIRE SPEED	TENSION	
4	14	14	14	1	5	6	1	5	

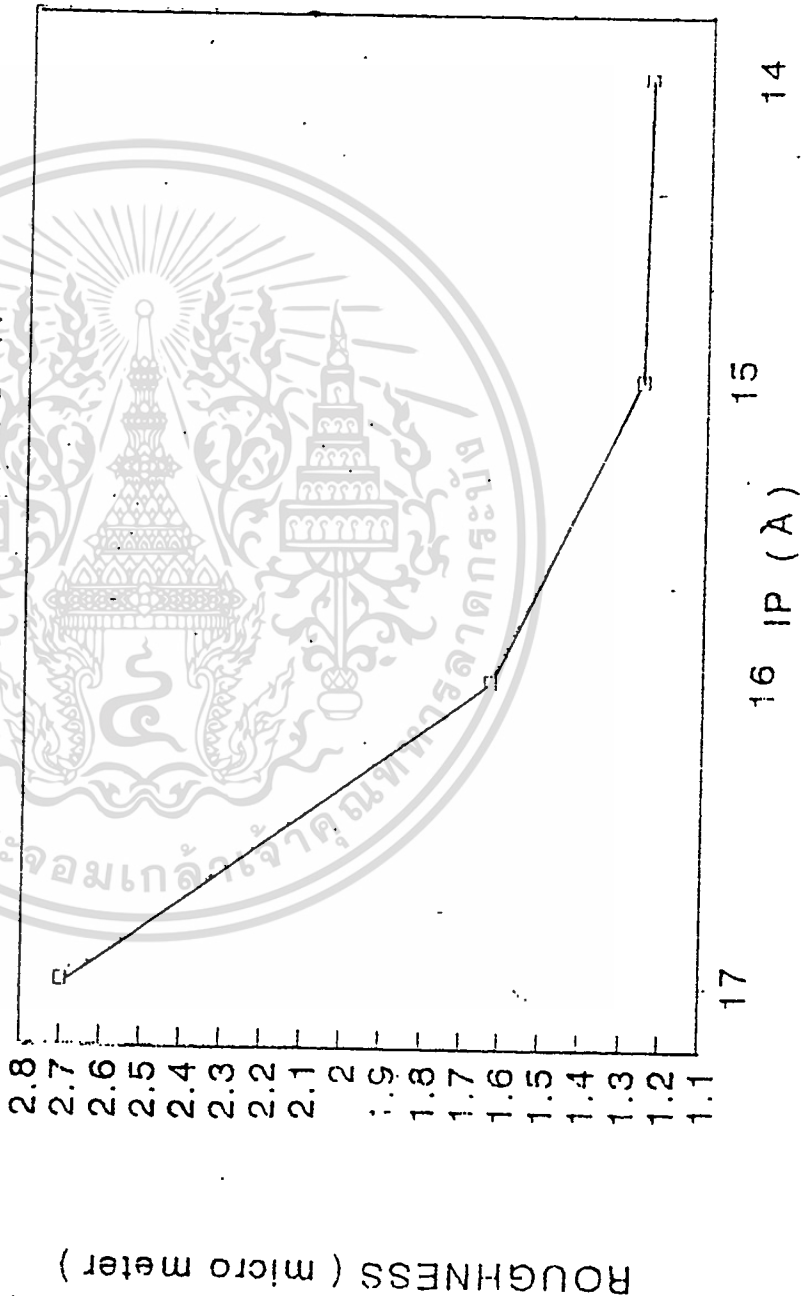


รูปที่ 13 ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TENSION	ON	OFF	MA	P	SV	SF	WIRE SPEED
5	4	17	14	1	5	6	1
IP	17	16	15	14			
ROUGHNESS	2.8088	2.5890	1.6087	1.6533	1.2683	1.2517	1.2496
AVR. ROUGHNESS	2.6989	1.6310	1.2600				1.2491

RELATION BETWEEN ROUGHNESS & IP  
FROM IP = 14 TO 17



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าความหยาบละเอียดของผิวกับค่า IP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท Sodick ประเทศไทย ที่ให้เครื่อง wire cut EDM รุ่น A280 และเงินทุนในการทำวิจัยแก่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จนได้ผลวิจัยเป็นที่น่าพอใจ อย่างดียิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. บริษัท โซดิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด : การประยุกต์ใช้เครื่อง EDM ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์โลหะแข็ง
2. Sodick Co., Ltd. : Wire Cut EDM A280 (Machining Condition Table)
3. Sodick Co., Ltd. : Code Instruction
4. Sodick Co., Ltd. : Control System
5. Petrofes, N.F., and Gadalla, A.M., Advanced Materials and Manufacturing Processes, 3 (1), p. 127, 1988.
6. Oel, H. J. and Fechette, V.D., Journal of The American Ceramic Society, 50 (10) , p. 542, 1967.
7. Beckwith, T.G., Buck, N.L., and Maangoni, R.D., Mechanical Measurements : Addison-Wesely Pub. Company, p. 329, 1982.
8. Zolotykn, B.N., and Korbova, J.P., Electrosark Machining of Metals, Vol.2, B.R. Lazarenko, ed., Consultants Bureau Enterprised, Inc., New York, p. 79, 1964.
9. Bormann, R., The Carbide and Tool Journal, 16, p. 9, 1984.
10. Quinlan, J.C., Tool and Production, 52 (12), p. 40, 1978.
11. Zelwer, O., and Malkin, S., Jorunal or Engineering for Industry, 120, p. 209, 1980.



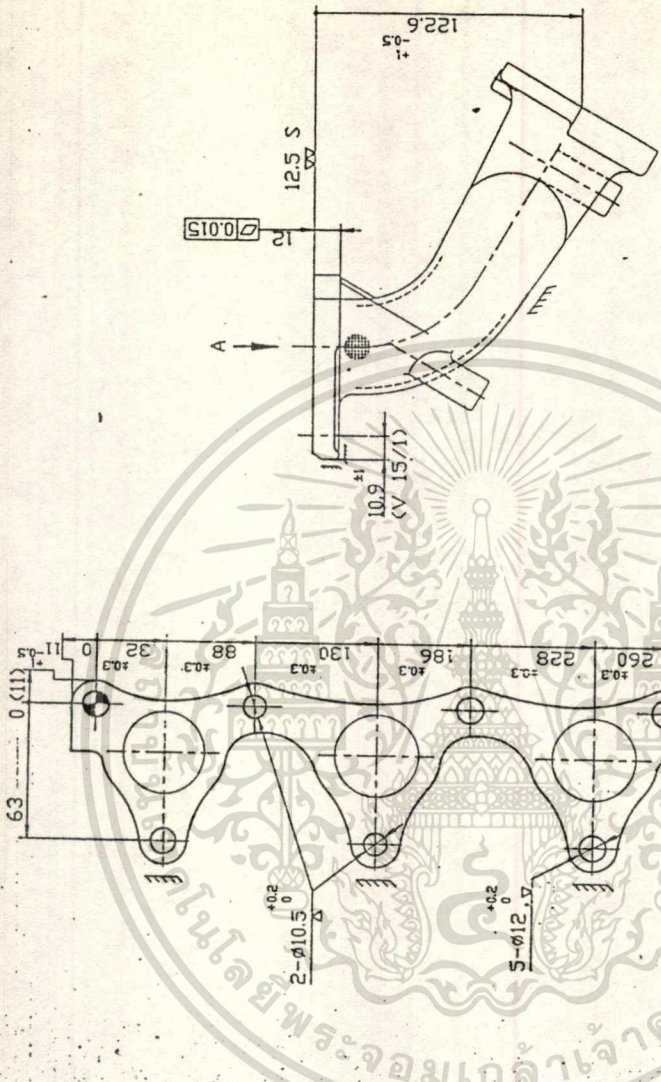
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COORDINATE SETTING		
G	X	Y
54		Z
55		
56		
57		
58		
59		

หมายเหตุ (REMARK)

- = REFERENCE POINT FOR MACHINE
- = SUPPORT AND STOPPER WORK PIECE
- = STOPPER WORK PIECE






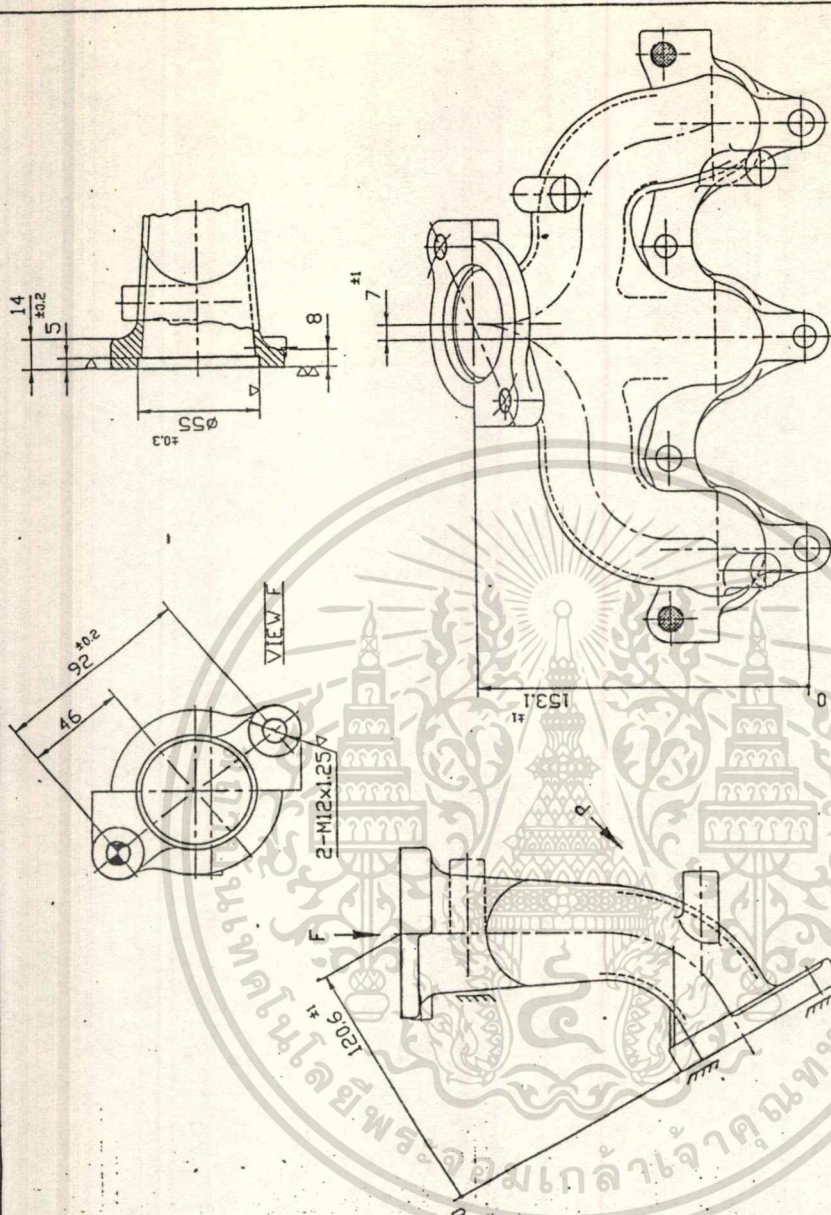
TOOLING / TOOL HOLDERS No.	DIMENSIONS	INSERT	
		STANDARD	PIECES PER CHANGE
4	TAPER SHANK DRILL	φ10.5	HSS 250
3	TAPER SHANK DRILL	φ12	HSS 100
2	CENTER DRILL	φ20	HSS 1430
1	FACE MILLING	φ160	KM1 75
0005	TOOLING / TOOL HOLDERS	SEAN1203 AF IN	GRADE

MATERIAL	FCD560-HS	FOR	EXHAUSE MANIFOLD	DRAWN	28/1/36
MACHINE TOOL	OKK1		F-CAR J RH	CHECKED	28/1/36
STEP	1 / 3	DWG. NO.	MD 189857	APPROVED	
PROGRAM NO.	00228	CUSTOMER		MITSUBISHI	
OPERATION STANDARD					
S.B.M. CO., LTD.					

COORDINATE SETTING			
G#	X	Y	Z
54			
55			
56			
57			
58			
59			

หมายเหตุ (REMARK)

-  = REFERENCE POINT FOR MACHINE
-  = SUPPORT AND STOPPER WORK PIECE
-  = LOCATION PIN



VIEW P

Tools No.	TOOLING / TOOLHOLDERS	DIMENSIONS	INSERT		PIECES PER CHANGE
			STANDARD	GRADE	
5	BORING BAR (EB 53)	Ø55	TPGD 630	G10E	600
4	TAP	M12x1.25		HSS	375
3	TAPER SHANK DRILL	Ø10.75		HSS	250
2	CENTER DRILL	Ø20		HSS	5000
1	FACE MILLING	Ø160	SEAN1203AFTN	KM1	150

MATERIAL	FCD500-HS	FOR	EXHAUSE MANIFOLD	DATE	28/4/36
MACHINE TOOL	DKK1		F-CAR / RH	CHECKED	28/4/36
STEP	2 / 3	DWG. NO.	MD 189857	APPROVED	
PROGRAM NO.	0 022B	CUSTOMER MITSUBISHI		S.B.M. CO., L.TD.	
OPERATION STANDARD					



MACHINE : OSAKA KIKO(OKK)  
PART NAME : EXHAUST F-CAR (MD.189857)  
MATERIAL : FCD  
OPERATION TIME : 14.83 MIN  
UPDATE : 03-11-1994

%

: 0228 ( E X H A U S T F- C A R MD.189857)

G91 G28 X0. Y0. Z0.

T1

M6

N1 ( F A E C. M I L L I N G. 160)

G92 Z347. 85

G54 G90 G0 X-53. Y95. Z150. S450 M3

Z10. MB

Z1.5

G1 Y-235. F160

G0 Z25.

Y95

Z0.

G1 Y-235. F100

G0 Z100. M9

G91 G28 Z0.

G90

G92 Z320.1 ( S T E P2)

G55 G90 G0 X-140. Y0. Z150. S480 M3

Z10. M8

Z1.5

G1 X-15. F140

G0 Z25.

X-140.

Z0.

G1 X-15. F140

G0 Z100. M9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G91 G28 X0. Y0. Z0. M5

M1

M6

T2

M6

N2 ( C E N T E R. D R I L L D20.)

G92 Z258 ( S T E P1)

G54 G90 G0 X0. Y0. Z150. S800 M3

Z10. M8 T3

G82 G98 Z-6.R2. F200 P200

X-63. Y-32.

X0. Y-88. Z-5.4 R2.

X-63. Y-130.

X0. Y-186. Z-6. R2.

X-63. Y228.

X0. Y-260.

G0 Z100. M9

G91 G28 Z0.

G90

G92 Z273.7 ( S T E P3)

G56 G90 G0 X-180. Y-11.5 Z150. S800 M3

Z10.M8

G82 G98 Z-3. R2. F200 P200

X0. Y0. Z-9. R-3.

X0. Y-185.5

G0 Z100. M9

G91 G28 Z0.

G90

G92 Z231. ( S T E P2)

G55 G0 G90 X-28.949 Y35.749 Z150. S800 M3

Z10. M8

G82 G98 Z-5. R2. F200 P200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X28.949 Y-35.749

GO Z100. M9

G91 G28 XO. YO ZO.M5

M1

M6

N3 ( D R I L L D.12)

G92 Z312.3 (S T E P1)

G54 G90 GO XO. YO. Z150. S530 M3

Z10. M8 T4

G81 G98 Z-18.5 R2. F100

X-63. Y-32.

XO. Y-186.

X-63. Y-228.

XO. Y-260.

GO Z100.M9

G91 G28 XO. YO. ZO. M5

M1

M6

N4 (D·R I L L10.5)

G92 Z270.4

G54 G90 GO XO. Y-88. Z150. S600 M3

Z10. M8 T5

G81 G98 Z-18. R2. F120

X-63. Y-130.

GO Z100. M9

G91 G28 XO. YO. ZO. M5

M1

M6

N5 ( B O R I N G55)

G92 Z264.3 ( S T E P2)

G55 G90 GO XO. YO. Z150. S460 M3

Z10. M8 T6 เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G76 G98 Z-5. R2. Q.5 F55 P300

G0 Z100. M9

G91 G28 X0. Y0. Z0. M5

M1

M6

N6 ( D R I L L D10.8)

G92 Z237. (S.T E P2)

G55 G90 G0 X-28.949 Y35. 749 Z150. S580 M3

Z10. M8 T7

G81 G98 Z-25. R2. F115

X28.949 Y-35.749

G0 Z100. M9

G91 G28 X0. Y0. Z0. M5

M1

M6

N7 < T A P M12 X 1.25>

G92 Z218.4.

G55 G90 GOX-28.949.Y35.749 Z150 S268 M3

Z10. M8 T8

G84 G98 Z-22. R2. F 335

X28.949 Y-35.749

G0 Z100. M9

G91 G28 X0. Y0. Z0. M5

M1

M6

N8 ( D R I L L D9.)

G92 Z314. ( S T E P3)

G56 G90 G X-108. Y-11.5 Z150. S650 M3

Z10. M8 T9

G81 G98 Z-5.5 R2. F120

X0. Y0. Z-10.2 R-3.

X0. Y-185.5

G0.Z100. M9

สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G91 G28 X0. YO. ZO. M5

M1

M6

N9 ( D R I L L D6.8)

G92 Z316.5 ( S T E P3)

G56 G90 G0 X-108. Y-11.5 Z150. S930 M3

Z10. M8 T10

G81 G98 Z-19.5 R2. F186

X0. YO. Z-25.5 R-3.

X0. Y-185.5

G0 Z100. M9

G91 G28 X0. YO. ZO. M5

M1

M6

N10 ( T A P. M81.25)

G92 Z242.3 ( S T E P3)

G56 G90 G0 X-108. Y-11.5 Z150. S400 M3

Z10. M8 T99

G84 G98 Z-14.R2. F500

X0. YO. Z-20. R-3.

X0. Y-185.5

G0 Z100. M9

G91 G28 X0. YO. ZO. M5

M1

M6

T1

G54 G0 X200.

M30

G54 X142.85 Y-176.7

G55 X767.458 Y-359.926

G56 X442.5 Y-229.95

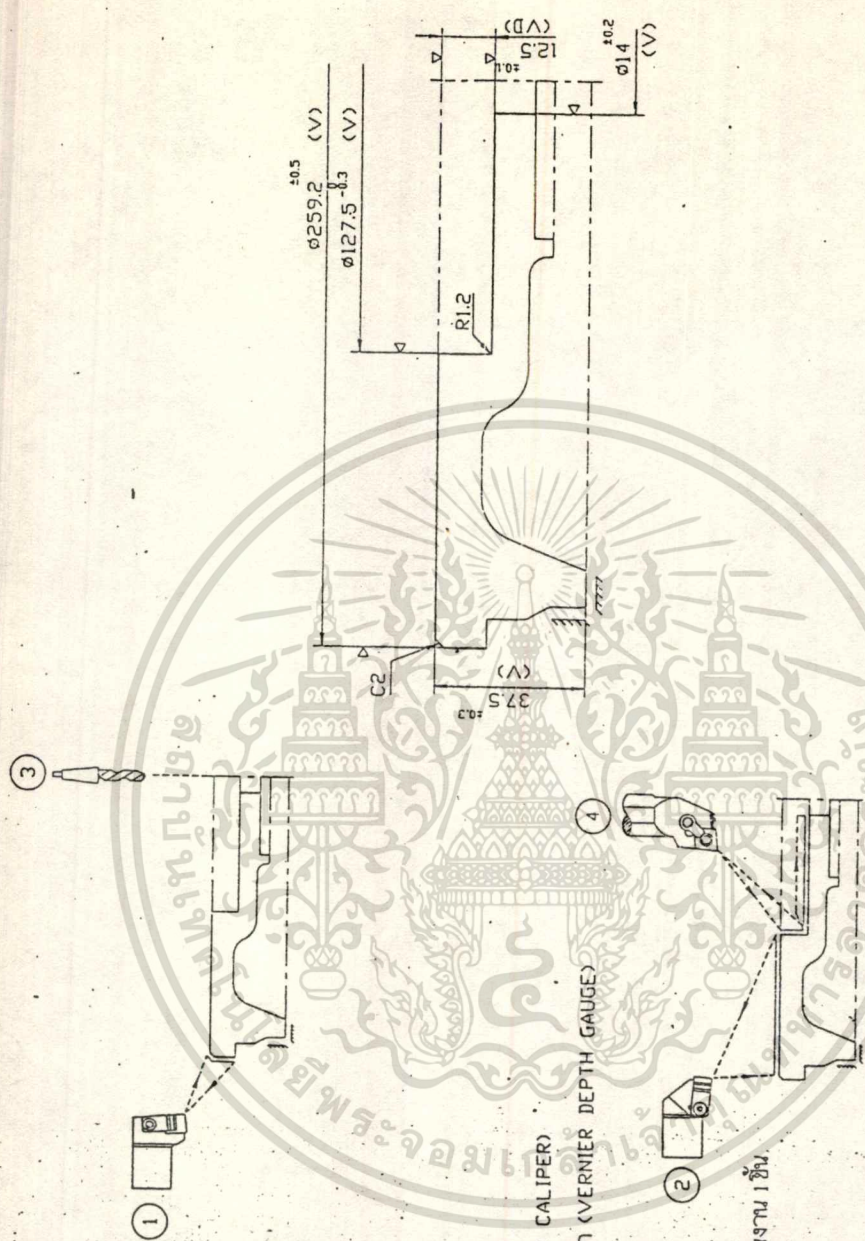
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CHUCKING PRESSURE		10	Kg/cm <sup>2</sup>
WORK SHIFT			
SHIFT VALUE		MEASUREMENT	
X		X	± 0.05
Z		Z	± 0.05
OFF-SET / GEOMETRY			
No	OFF-SET	Z	
G01			
G02			
G03			
G04			
G05			
G06			
G07			
G08			



หมายเหตุ (REMARK)  
 V = เวอร์เนีย (VERNIER CALIPER)  
 VD = เวอร์เนียวัดความลึก (VERNIER DEPTH GAUGE)  
 การตรวจสอบ  
 30 นาที ให้มีการตรวจสอบชิ้นงาน 1 ชิ้น

1.4	S32S MCLNL	CNMG 433	KC 990	93	
1.3	TAPER SHANK DRILL	Ø14	HSS	500	
1.2	CSYNL 2525	SNMG 433	KC 990	83	
1.1	CS-NL 2525	SNMG 433	KC 990	166	
Tools	TOOLING / TOOL HOLDERS	STANDARD	GRADE	PIECES	PER CHANGE
No.	DIMENSIONS	INSERT			

MATERIAL	FC 25	FOR	FLY WHEEL "E-CAR 94"	DRAWN	PISIT	24/1/94
MACHINE TOOL	TK-2	DWG. NO.	MD 030645	CHECKED	SAK	26-1-99
STEP	1 / 7	CUSTOMER	MITSUBISHI	APPROVED	SAK	22/1/91
PROGRAM NO.	D 6451	OPERATION STANDARD		S.B.M. CO., LTD.		

CHUCKING PRESSURE	
10	Kg/cm <sup>2</sup>
WORK SHIFT	
SHIFT VALUE MEASUREMENT	
X	X
Z	-Z
OFFSET / GEOMETRY	
No.	X Z
G01	
G02	
G03	
G04	
G05	
G06	
G07	
G08	

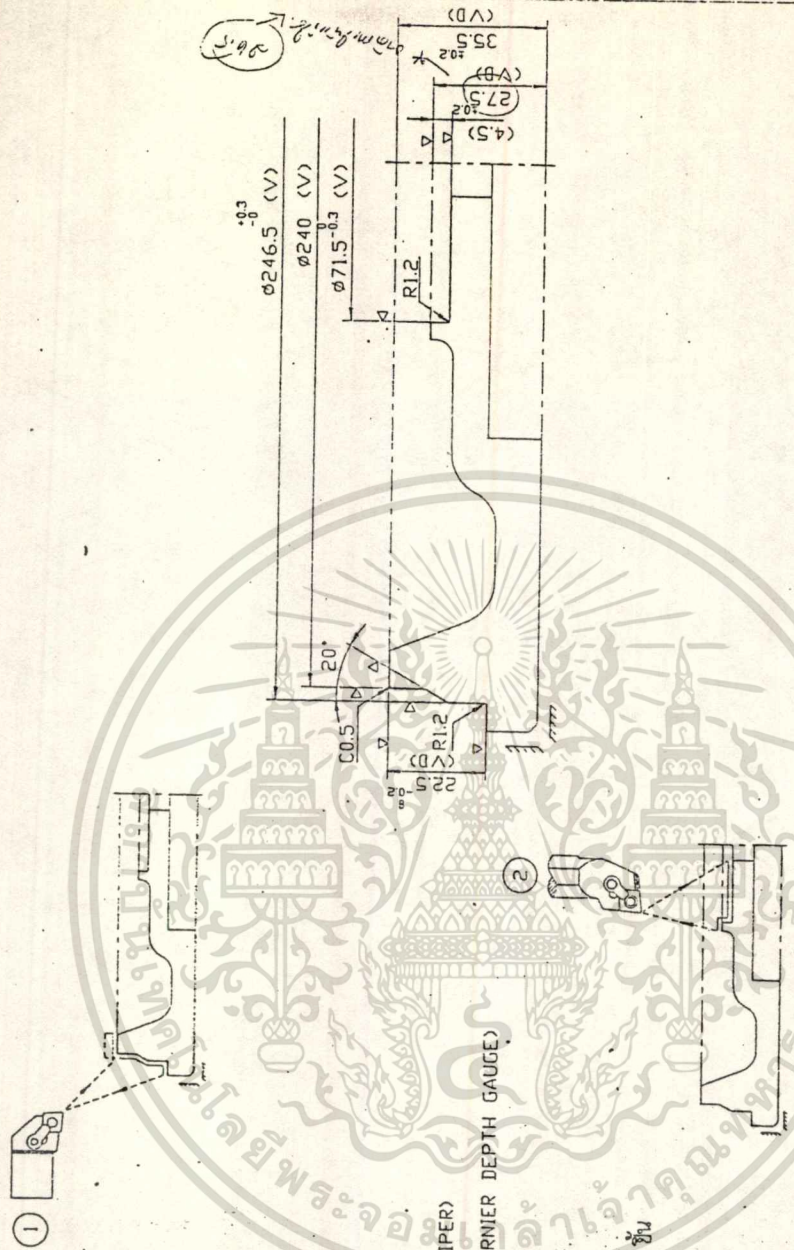
หมายเหตุ (REMARK) ;

V = เวอร์เนีย (VERNIER CALIPER)

V.D = เวอร์เนีย วัดความลึก (VERNIER DEPTH GAUGE)

การตรวจสอบ ;

30 นาที, ให้มีการตรวจสอบชิ้นงาน 1 ชิ้น



F2	S25R MCLNL								
F1	MCLNL 2525	CNMG 433	KC 990	142					
Tools	TOOLING / TOOL HOLDERS	CNMG 433	KC 990	54	GRADE				
No.	DIMENSIONS	STANDARD		INSERT		PIECES	PER	CHANGE	

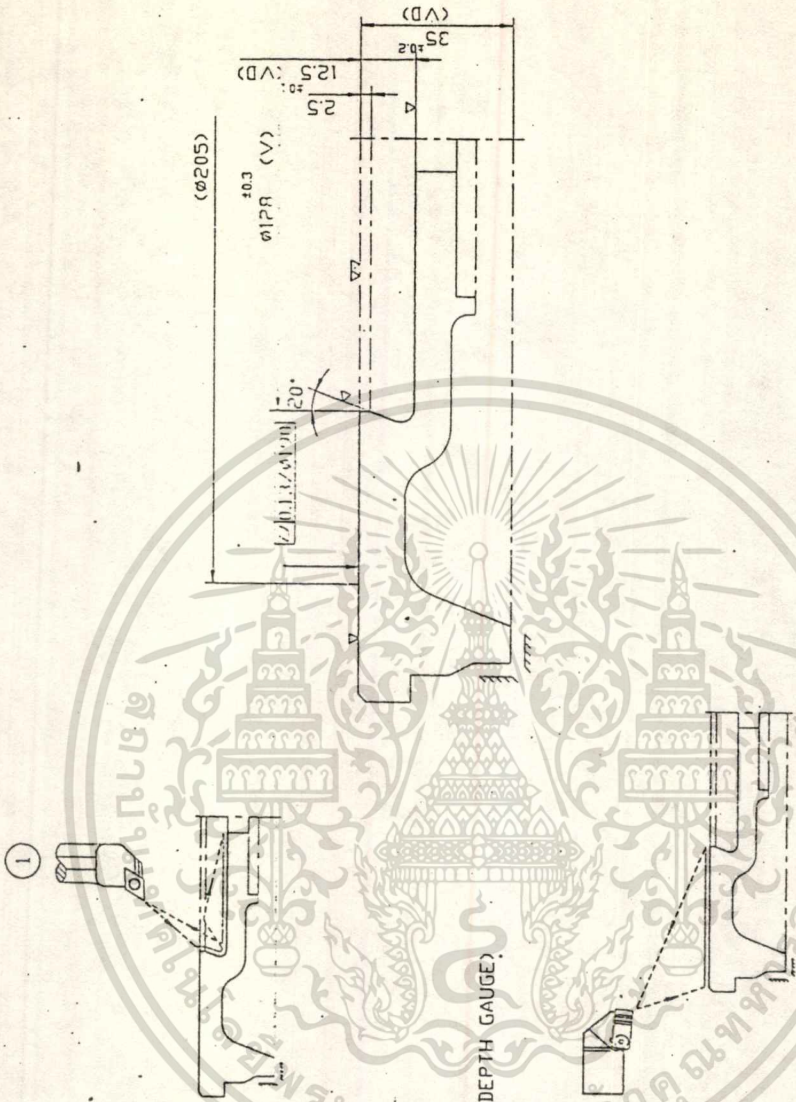
MATERIAL	FC 25	FDR	FLY WHEEL	DRAWN	PISIT	24/1/92
MACHINE TOOL	TK-2		'E-CAR 94'	CHECKED		26-1-99
STEP	2 / 7	DWG. NO.	MD 030645	APPROVED		28/1/97
PROGRAM NO.	0 6452	OPERATION STANDARD		CUSTOMER MITSUBISHI		
S.B.M. CO., LTD.						

CHUCKING PRESSURE	
kg/cm <sup>2</sup>	10
Kg/cm <sup>2</sup>	
WORK SHIFT	
SHIFT-VALUE MEASUREMENT	
X	X
Z	Z
OFFSET / GEOMETRY	
No	X Z
G01	
G02	
G03	
G04	
G05	
G06	
G07	
G08	

หมายเหตุ (REMARK)

V = เวอร์เนีย (VERNIER CALIPER)

VD = เวอร์เนีย วัดความลึก (VERNIER DEPTH GAUGE)



การตรวจสอบ /  
30 นาที ให้มีการตรวจสอบชิ้นงาน 1 ชิ้น

Tools	TOOLING / TOOL-HOLDERS	DIMENSIONS	INSERT		PIECES PER CHANGE
			STANDARD	GRADE	
2	CSYNL 2525		SNG 455	NB90S	117
1	S40T SVXBL		VBMT 160408	CM2	46

MATERIAL	FC 25	FOR	FLY WHEEL 'E-CAR 94'	DRAWN	PJSIT	24/1/94
MACHINE TOOL	TK-2	DWG. NO.	MD 030645	CHECKED	W.K.	28-1-99
STEP	3 / 7	CUSTOMER	MITSUBISHI	APPROVED	W.K.	27/1/99
PROGRAM NO.	D 6453	OPERATION STANDARD		S.B.M. CO., LTD.		





MACHINE : TK2  
PART NAME : FLYWHEEL LA  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-17-1994

%

:6454 ( F L Y W H E E L . L A , S T E P 4 )

M22

M25

N1 (DNS27L TNMA 332)

GO X320. Z200.

G50 S500

G96 S180 M4 T100

GO X246. Z70. T1

Z25.

G1 Z13. FO.2

G1 Z12. FO.01

GO4 U0.2

G1 X257.264 FO.15

X256.2 Z11.035 FO.35

GO Z100. M9

.GO X320. Z200. TO

M1

N2 (FSTU 110L TGPD 731)

GO X320. Z200.

G50 S750

G96 S150 T400 M4

GO X72. Z60. T4

Z28.

G1 Z23. FO.2

Z22. FO.1

GO X70. Z24.

X13.5 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G1 Z22. F0.25  
X72. F0.3  
G04 U0.2  
G0 X71.5 Z25.35  
G1 X73.3 Z26.3 F0.25  
G0 Z50. M9  
X320. Z200. T0  
M1  
N3 (S20Q SCLCL 09 CCMT 09T304)  
G0 X320. Z200.  
G50 S750  
G96 S150 M4 T600  
G0 X15. Z60. T6  
Z23.  
G1 Z9. F0.25  
G0 X14. Z20.5  
G1 X18. Z22.5 F0.25  
G0 Z50. M9  
X320. Z200. T0  
M5  
M1  
M16 T100  
M24  
M30  
%



MACHINE : TK2  
PART NAME : FLYWHEEL LA  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 01-15-1994

%

:6453 ( F L Y W H E E L L A , S T E P3)

M22

M25

N1 ( CSYNL 2525 SNG 455)

GO X320. Z200.

G96 S200 M3 T400

GO X259.2 Z70. T4

Z35.

G1 X190. FO.4

X123. FO.25

GO Z50. M9

X320. Z200. TO

M5

M1

N2 (S40T SVXBL VBNT 160408)

GO X320. Z200.

G50 S750

G96 S180 M4 T100

GO X126. Z90. T1

Z36.

G1 Z31.71 FO.2

G1 X132. Z28.25 FO.2

Z25.55

G3 X130. Z22.55 R1. FO.1

G1 X132. Z28.2 FO.5

X134.5 Z26.08 FO.25

Z25.55 เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G3 X129.5 Z22.5 R3. F0.1

G0 X126. Z23.5

Z37.

X133.8

G1 Z35.7 F0.45

G1 X128. Z34.1 F0.25

Z32.072 F0.2

X135.15 Z25.5 F0.25

G1 X82. F0.25

X12. F0.25

G0 Z50. M9

X320. Z200.TO

M5

M1

M16 T400

M24

M30

%



MACHINE : TK2  
PART NAME : FLYWHEEL LA  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-15-1994

%

:6452 ( F L Y W H E E L . L A , S T E P 2 )

M22

M25

N1 ( MCLNL 2525, CNMG 433)

G50 S500

G96 S170 M4 T100

G0 X263.2 Z40. T1 M8

Z13.

G1 X251.5 F0.2

Z35.5 F0.3

X217. F0.25

X240.

G1 Z28.752 F0.3

X246.5 Z21.5 F0.25

Z13.

X246.7

G0 Z33.297

X242.

G1 X236.594 Z36. F0.35

G0 Z100. M9

X320. Z150.T0

M1

N2 (S25T MCLNL CNMG 433)

G50 S600

G97 S180 M4 T200

G96 S200

G0 X13.5 Z50. T2 M8ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Z27.5

G1 Z23 F0.25

X68.5 F0.25

G0 Z27.0

G1 X85. F0.25

G0 Z29.5

X76.23

G1 X71.5 Z26.635 F0.25

Z22.9

X70.0

G0 Z100. M9

X320. Z150. T0

M5 T100

M24

M30

%





N3 ( D I L L .14)

G50 S450

G96 S200 M3

M16 T400

GO XO. Z100. T4

Z40. M8

G1 Z30. FO.45

Z10. FO.25

GO Z100. M9

GO X300. Z280. T0

M5

M1

N4 (S32S MCLNL R1.2)

G50 S700

G96 S180 M4

M16 T200

GO X127.5 Z100. T2

Z40. M8

G1 Z27.0 FO.3

Z26.25 FO.15

GO X126.5 Z35.797

G1 X130.906 Z38. FO.35

GO X13.

G1 Z30. FO.45

Z25. FO.1

X20.

X124. FO.3

X126. FO.1

GO Z100. M9

GO X300. Z280. T0

M5

M16 T100

M1

M24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



M12

M30

%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MACHINE : FANUC DRILL  
PART NAME : FLYWHEEL E-CAR 94  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-20-1994

%

:0133 (FLY E-CAR 94)

(MD 030645)

G90

M1

N1 ( CENTER DRILL )

G92 Z158.155

G55 GO G90 X-26. YO. Z100. S1000 M3

Z20. M8

G82 G98 Z-6.75 R2. F200 P200

M98 P0134

GO Z30.

X-118. YO.

G82 G98 Z8.2 R14. F200 P200

M98 P0135

GO XO. Y-118.

G82 G98 Z8.5 R14. F200 P200

M98 P0136

X-50. YO. Z-2.0 R2.0

GO Z100. M9

G91 G28 YO. ZO. M5

G90

M1

M6 T2

N2 ( DRILL12.6)

G92 Z109.

G55 GO G90 X-26. YO. Z45. S600 M3

Z20. M8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G81 G98 Z-13. R1. F150

M98 P0134

GO Z45. M9

G91 G28 YO. ZO. M5

G90

M1

M6 T3

N3 ( D R I L L7.5)

G92. Z64.

G54 G90 GO X-118. Z50. S1000 M3

Z10. M8

G81 G98 Z-17. R2. F200

M98 P0135

GO Z50.M9

G91 G28 YO. ZO. M5

M1

G90

T4 M6

N4 ( R E M M E R.8)

G92 Z178.5

G55 GO G90 X-118. YO. Z100. S650 M3

Z10. M8

G81 G98 Z12.0 R2. F400

M98 P0135

GO Z100. M9

G91 G28 YO. ZO. M5

M1

M6 T5

N5 ( D R I L L6.75)

G92 Z108.

G55 GO G90 XO. Y-118. Z100. S1000 M3

Z10. M8

G81 G98 Z-20. R1. F200

M98 P0136

GO Z100. M9 เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G91 G28 Y0. Z0. M5

M1

M6 T6

N6 ( T A P . M8 X1.25)

G92 Z89.5

G55 G90 G0 X0. Y-118. 270. S400 M3

Z10.

G84 G98 Z-15.3 R2. F500 M8

M98 P0136

G0 Z70. M9

G91 G28 Y0. Z0. M5

G90

M1

M6 T1

M30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MACHINE : FANUC DRILL  
PART NAME : FLYWHEEL E-CAR 94  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-20-1994

%

:0134 (SUB PRO FLYWHEEL E-CAR 94)

X-6.729 Y25.114

X19.731 Y16.931

Y-16.931

X-6.729 Y-25.114

M99

%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MACHINE : FANUC DRILL  
PART NAME : FLYWHEEL E-CAR 94  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-20-1994

%

:0135 (SUB PRO FLYWHEEL E-CAR 94)

X 59. Y-102.19

Y102.19 X59.

M99

%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MACHINE : FANUC DRILL  
PART NAME : FLYWHEEL E-CAR 94  
PART NUMBER : MD 030645  
MATERIAL : FC 25  
OPERATION TIME :  
UPDATE : 03-20-1994

%

:0136 (SUB PRO FLYWHEEL E-CAR 94)

X102.19 Y-59.

Y59. X102.19

X0. Y118.

X-102.19 Y59.

X-102.19 Y-59.

M99

%



### ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายทวี เทศเจริญ  
วันเดือนปีเกิด วันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2492  
สถานที่เกิด จังหวัดสมุทรสงคราม  
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องกล  
สถานที่สำเร็จการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปีที่สำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2516  
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Research on the Surface Roughness of Machine Surface fourth Mechanical Engineering Symposium 16/1-9P. KMITT, 17-18 May 1990.
2. Development of Simple Air-Micrometer. Fourth Mechanical Engineering Symposium 25/1-8P, 17-18 May 1990.
3. Research on the Surface roughness generated by turning Fifth Mechanical Engineering Symposium. 244-253 P, Chiangmai University, 17-18 Oct 1991.
4. Research on the Geometrical accuracy of Wire Cut EDM Surface Roughness and Surface Hardness. Sixth Mechanical Engineering Symposium, 6/1-11 P, Kasersart University, 15-16 Oct 1992.
5. Research on Residual Stress of Wire Cut EDM. Seventh Mechanical Engineering Symposium 31-44 P, KhonKaen University, 21-22 Oct. 1993.
6. Research on Surface Roughness of Wire Cut EDM. Seventh Mechanical Engineering Symposium 31-44 P, Khonkean University, 21-22 Oct 1993.

รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ 2522 ทุนทำวิจัยที่มหาวิทยาลัย Stuttgart ประเทศเยอรมัน  
2530 ทุน JICA ดุงานประเทศญี่ปุ่น  
2534 ทุน JSPS ทำวิจัยที่มหาวิทยาลัย Tokai ประเทศญี่ปุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2535 ทุน JSPS ทำวิจัยที่มหาวิทยาลัย Tokai ประเทศญี่ปุ่น
- ประสพการณ์การทำงาน 2534-2535 รองคณบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.  
2535 สร้างเครื่องจักร โรงงานน้ำผลไม้บรรจุกระป๋อง โครงการส่วน  
พระ องค์สวนจิตรลดา
- อาชีพปัจจุบัน 2517-2526 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สจล.  
2526-2535 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ระดับ 8  
2535-ปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

