

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็ง
ของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53



นายพร้อมสิน ยืนยง
นายวิรัช บอระเสม
นายสัญญา สุขพัฒนานกุล

รฟ
พช
2548

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **62781**

วัน,เดือน,ปี **22 ส.ค. 2549**

.b. **1130677**

.i.

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

**A STUDY ON EFFECTS OF MACHINING PARAMETER ON
HARDNESS OF EDMed DC 53 TOOL STEEL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2005**

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็ง
เหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53

A STUDY ON EFFECTS OF MACHINING PARAMETERS ON
HARDNESS OF EDMed DC53 TOOL STEEL

นักศึกษา

นาย พร้อมสิน ชื่นยง รหัสประจำตัว 46015719

นาย วีรชัย บอระเซม รหัสประจำตัว 46015727

นาย สัญญา สุขพัฒนา รหัสประจำตัว 46015734

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท

(ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ที่ผ่านกรรมวิธี EDM
นักศึกษา	นายพร้อมสิน ยืนยง นายวีรชัย บอระเซม นายสัญญา สุขพัฒนากุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาความแข็ง ที่เกิดจากการขึ้นรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) โดยมีตัวแปรในการตัดดังนี้คือ ช่วงเวลาในการจ่ายไฟในการสปาร์ก (ON) ค่าของกระแสไฟใช้ในการสปาร์ก (IP) ชนิดของอิเล็กโทรดซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้คือ ทองแดง และกราไฟท์ ส่วนตัวแปรที่คงที่ ในการทดลองได้แก่ ช่วงเวลาในการหยุดจ่ายไฟ (OFF) โดยตั้งไว้ที่ 100 μ sec แรงดันที่ใช้ในการสปาร์ก (V) ตั้งไว้ที่ 100 โวลต์ เวลาที่ใช้ในการสปาร์ก (Time) ตั้งไว้ที่ 30 นาที แรงดันที่ใช้ในการไล่เศษ (Q) ตั้งไว้ที่ 0.1 psi จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งคือ ON กับ IP และชนิดของอิเล็กโทรด โดยที่ตัวแปร ON กับ IP จะมีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวของชิ้นงานกับความแปรปรวนในแนวลึกจากรอยสปาร์ก ซึ่งกรรมวิธีฮีตติเอ็มทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวแปรอิเล็กโทรดทองแดง ทำให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์

Thesis Title A Study on Effects of Machining Parameters on Hardness of EDMed DC53 Tool Steel
Student Mr. Promsin Yuenyong
Mr. Werachai Borahem
Mr. Sanya Sukpattanakul
Degree Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Labkrabang
Academic Year 2005
Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Kannachai Kanlayasiri

ABSTRACT

Hardness of DC 53 tool steel machined by electrical discharge machining (EDM) was studied in this project. Investigated machining parameters included pulse-on time (ON), pulse-peak current (IP), and type of electrode. In this study, copper and graphite electrodes were employed. During the machining, three parameters were set at constant value; pulse-off time at 100 μ sec, voltage at 100 volts, machining time at 30 minutes, and dielectric fluid pressure at 0.1 psi. Results showed that ON, IP, and electrode type affected both surface and in-depth hardness of the workpiece. The EDM process increased the hardness of the specimen. Copper electrode created higher hardness than graphite electrode.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลการวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำทางแนวคิดและให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องปัญหาต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณต่อ ผศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ และอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่กรุณาเข้าร่วมเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งใจใคร่ขอขอบคุณอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอขอบคุณอย่างซาบซึ้ง สำหรับความร่วมมือและความช่วยเหลืออย่างยินดีที่ผู้วิจัยได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ พลชัย โชติปราชญ์กุล และบริษัท โชติค แห่งประเทศไทย ในการชี้แนะเกี่ยวกับการใช้เครื่องอีทีเอ็มวิธีการและระบบการใช้งานของเครื่อง อีทีเอ็ม ตลอดจนสิ่งต่างๆ ที่ให้การอนุเคราะห์ในเรื่องต่างๆ และขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นเรียน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างดีเสมอมา

ท้ายที่สุดขอขอบคุณผู้ปกครองที่เข้าใจและให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษาดังเช่นทุกวันนี้

นาย พร้อมถิ่น ยืนยง

นาย วีรชัย บอระเสม

นาย สัจญญา สุขพัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก.....	4
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม.....	6
2.3 อีเล็กโทรด.....	9
2.4 ระบบโคอีเล็กตริก.....	13
2.5 ระบบการไหลของโคอีเล็กตริก.....	15
2.6 ระบบเซอร์โว.....	20
2.7 Vickers Hardness Test.....	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.3 หลักการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	26
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง.....	31
4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบกราฟที่เนื่องใจการตัดแบบต่างๆ.....	85

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอสำหรับการวิจัยงานอีทีเอ็ม.....	86
หนังสืออ้างอิง.....	87
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. วิธีการใช้เครื่องอีทีเอ็ม.....	ผก 1
ภาคผนวก ข. ใบแสดงส่วนผสมของวัสดุ.....	ผข 1



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงระดับของพารามิเตอร์ในการทดลอง.....	26
ตารางที่ 3.2 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง.....	27
ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่ำสุดและสูงสุดและไม่ผ่าน EDM.....	31
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานจากการทดลอง.....	34
ตารางที่ ผข 1 ใบแสดงส่วนผสมอิเล็กทรอนิกส์โทรคทองแดง.....	ผข 2
ตารางที่ ผข 2 ใบแสดงส่วนผสมเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53.....	ผข 3



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการคิซซาร์จ.....	4
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า – กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก.....	5
รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง.....	6
รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม.....	6
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม.....	9
รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก.....	15
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด.....	16
รูปที่ 2.9 ไดอิเล็กตริกไหลผ่านรูพกรากาไฟท์ออกที่บริเวณช่องว่าง.....	17
รูปที่ 2.10 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบดูด.....	17
รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง.....	18
รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด.....	19
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น.....	19
รูปที่ 2.14 การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น.....	20
รูปที่ 2.15 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test.....	21
รูปที่ 3.1 เครื่องอีดีเอ็ม.....	24
รูปที่ 3.2 เครื่องตัดโลหะ.....	24
รูปที่ 3.3 เครื่องขัด.....	25
รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน.....	26
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานก่อนการทดลอง.....	29
รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง.....	29
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่าน EDM.....	32
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งที่พารามิเตอร์ต่ำสุด.....	33
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่พารามิเตอร์สูงสุด.....	33
รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง	40
รูปที่ 4.5 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์	40
รูปที่ 4.6 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง	41
รูปที่ 4.7 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์	41
รูปที่ 4.8 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง	42
รูปที่ 4.9 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์	42

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ผก 10 แสดงหน้าจอพร้อมใช้งานหลังจากเปิดเครื่อง.....	ผก 7
รูปที่ ผก 11 แสดงหน้าจอ.....	ผก 7
รูปที่ ผก 12 แสดงระยะและตำแหน่งในการเซตศูนย์ชิ้นงานในแนวแกน Z.....	ผก 8
รูปที่ ผก 13 ชุดปุ่มควบคุมต่างๆ.....	ผก 8
รูปที่ ผก 14 แสดงหน้าต่าง EDIT.....	ผก 9
รูปที่ ผก 15 แสดงหน้าต่าง RUN.....	ผก 10
รูปที่ ผก 16 ปุ่มควบคุมต่างๆ.....	ผก 10



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้การเติบโตของอุตสาหกรรมใหม่มีมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับเทคโนโลยีใหม่ๆที่กำลังเกิดขึ้นมาอย่างมากมาย อุตสาหกรรมต่างๆทุกวันนี้ส่วนมากแล้วจะนำเอาเทคโนโลยีใหม่มาใช้เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพและสะดวกรวดเร็ว ฉะนั้นทำอย่างไรถึงจะนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด และสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นส่วนที่สำคัญต่ออุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง การเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมมีจำนวนมากที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความแข็งของวัสดุ ซึ่งความแข็งของวัสดุมีผลกระทบต่อความสามารถในการทนต่อการเสียดสี ดังนั้นการเลือกวัสดุที่มีความแข็ง ที่เหมาะสมกับการใช้งานก็จะเป็นการช่วยลดต้นทุนและช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นงานต่างๆ

อุตสาหกรรมในปัจจุบันมีมากมายและหลากหลาย ซึ่งแต่ละอย่างล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อความเป็นอยู่ในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ทั้งด้านการสื่อสาร โทรคมนาคม การขนส่งเครื่องอุปโภค บริโภค เป็นต้น ล้วนแล้วใช้เทคโนโลยีใหม่ๆทั้งสิ้น แต่สำหรับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตนั้น ส่วนมากจะเป็นชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้ประกอบในผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งจะมีความเหมือนและจะใช้วิธีการผลิตด้วยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถให้ปริมาณของงานออกมามากและเหมือนกันทั้งในด้านรูปร่าง และรูปทรง อีกทั้งเป็นการผลิตที่รวดเร็ว ให้คุณสมบัติที่เหมาะสม และง่ายต่อกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นกันเป็นส่วนใหญ่ในส่วนของได้จากการผลิตที่มาจาก การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ได้แก่ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนในเครื่องจักรต่างๆ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ดังนั้นกระบวนการผลิตและเครื่องมืออุปกรณ์จึงต้องมีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งการขึ้นรูปแม่พิมพ์เป็นการขึ้นรูปวัสดุที่มีความแข็งสูง ซึ่งเราจะตัดวัสดุนั้นโดยใช้ วิธีธรรมดาไม่ได้ เนื่องจากวัสดุมีความแข็งใกล้เคียงกับมีดตัด ทำให้เกิดการสึกหรอของมีดตัดอย่างรวดเร็วในขณะที่ทำการตัด ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องใช้กระบวนการอื่นเข้ามาทำการขึ้นรูป ซึ่งกรรมวิธีการตัดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining : EDM) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กับการตัดวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยกระบวนการ EDM จะขึ้นรูปวัสดุโดยการทำให้เกิดความร้อนที่สูงมาก จนวัสดุเกิดการหลอมละลายในตำแหน่งที่เราต้องการ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัด อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของจุลโครงสร้างของวัสดุ ณ ตรงบริเวณที่ทำการตัดซึ่งการเปลี่ยนแปลงของจุลโครงสร้างนี้ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานนั้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการตัดด้วยเครื่อง EDM กับการเปลี่ยนแปลงของความแข็งของชิ้นงานบริเวณใกล้รอยตัด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกรรมวิธี EDM ที่มีสาร ไดออกไซด์ทริคเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน
2. ทำการทดสอบเฉพาะความแข็งของชิ้นงานด้วยวิธี Vickers Microhardness Test
3. วิเคราะห์ผลความแข็งที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากกรรมวิธี EDM
4. ศึกษาเฉพาะเหล็กเครื่องมือ DC 53 ที่ผ่านกระบวนการ EDM
5. ใช้อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ในการขึ้นรูป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรในการขึ้นรูปด้วย EDM เช่น ON IP และชนิดของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงานทดสอบ
2. ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อความแข็งของวัสดุที่จะนำไปใช้งาน
3. สามารถนำผลของการศึกษาที่ได้ไปปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำการทดลองเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการนั้น จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมากมาย ทฤษฎีที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก
2. หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม
3. อิเล็กโทรด (Electrode)
4. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System)
5. ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก (Flushing)
6. ระบบเซอร์โว (Servo System)
7. Vickers Hardness Test

กรรมวิธี Electrical Discharge Machining เป็นประเภทหนึ่งของกระบวนการตัด วัสดุโดยไม่ใช้วิธีทางกล (Non – Mechanical Means) กระบวนการตัดวัสดุโดยไม่ใช้วิธีทางกล แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. วิธีทางความร้อน (Thermal)
2. วิธีทางเคมี (Chemical)
3. วิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical)

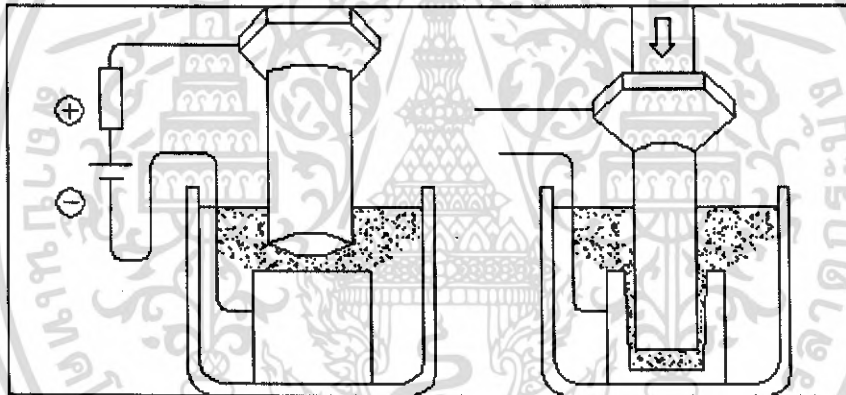
อีดีเอ็ม (EDM) คือกระบวนการตัดวัสดุโดยวิธีความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดจากการสปาร์กทางไฟฟ้าทำให้ อนุภาค วัสดุที่ถูกแยกออกมาซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส

การกัดเซาะทางไฟฟ้า (Electro Erosion) เป็นคำที่ใช้ครอบคลุมทุกกระบวนการที่แยกอนุภาคของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่อยู่ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กตริก หลักการทางฟิสิกส์ที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปีแล้ว นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ โจเซฟ พริสทลีย์ (Joseph Priestley) ค.ศ. 1733 – 1809 ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของการกัดเซาะเนื่องการปล่อยประจุไฟฟ้า จากการทดลองยังไม่สามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานโลหะได้ จนกระทั่ง Lazarenk ได้ทำการทดลองเป็นผลสำเร็จในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์สวิตซ์ไฟฟ้ามาเป็นแนวทางในการพัฒนา

หลังความร้อนที่เกิดจากการปล่อยประจุไฟฟ้าออกมา จะหลอมละลายพื้นผิวของอิเล็กโทรดและชิ้นงานที่บริเวณช่องแคบของการปล่อยประจุไฟฟ้า โลหะหลอมเหลวจะถูกแรงหนีศูนย์กลางขับออกมา ในขณะที่พลังงานที่จัดให้ถูกขัดจังหวะหรือถูกตัด ความดันในบริเวณเส้นทางคิสซาร์จะขับอนุภาคที่หลอมเหลวออกมา และยังขับอนุภาคของแข็งออกมาด้วยโดยวิธีกระแทกทางกล

กระบวนการปล่อยประจุไฟฟ้า (The Discharge Process)

หลักการของการกัดเซาะไฟฟ้า ชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่พร้อมจะทำงานแต่ไม่สัมผัสกัน กระบวนการทั้งหมดจะเกิดในของเหลวที่เป็นฉนวนให้กับชิ้นงานและอิเล็กโทรด ชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้านี้จะถูกตัดหรือขัดจังหวะด้วยสวิตช์ปิดเปิด เมื่อสวิตช์ปิด ศักย์ไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดกับแคโทดเองจากตัวกลางไดอิเล็กตริกเป็นฉนวน จึงไม่มีกระแสไหลในตอนเริ่มต้น จากระบบความก้าวหน้าของเครื่องจักรทำให้อิเล็กโทรดและชิ้นงานเคลื่อนเข้าหากัน ดังนั้นจึงเกิดการสปาร์กที่จุดที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุด การเกิดสปาร์กนี้เรียกว่า การปล่อยประจุไฟฟ้า กระบวนการนี้กระแสไฟฟ้าแปรผันเป็นความร้อน ทำให้พื้นผิวรอบๆ เส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้ามืดลงอย่างเร็วถึงสูง 8000°C ถึง 12000°C ถ้ากระแสที่ไหลอยู่ถูกขัดจังหวะให้หยุดโดยการปิดสวิตช์ เส้นทางสปาร์กจะยุบตัวลง การใช้สวิตช์ให้หยุดจ่ายพลังงานจะเป็นสาเหตุทำให้ความดันที่บริเวณเส้นทางที่ปล่อยประจุไฟฟ้าลดลงอย่างทันทีทันใด มีผลทำให้โลหะหลอมเหลวเกิดการแตกกระจายเป็นไอ หลุดออกมาจากโลหะหลอมเหลว และของแข็งที่มีความลึกแน่นอน จึงเกิดเป็นหลุมบนพื้นผิวของการกัดเซาะไฟฟ้าของวัสดุ ดังรูปที่ 2.1 (ทวีป จิระประดิษฐ, 2538)

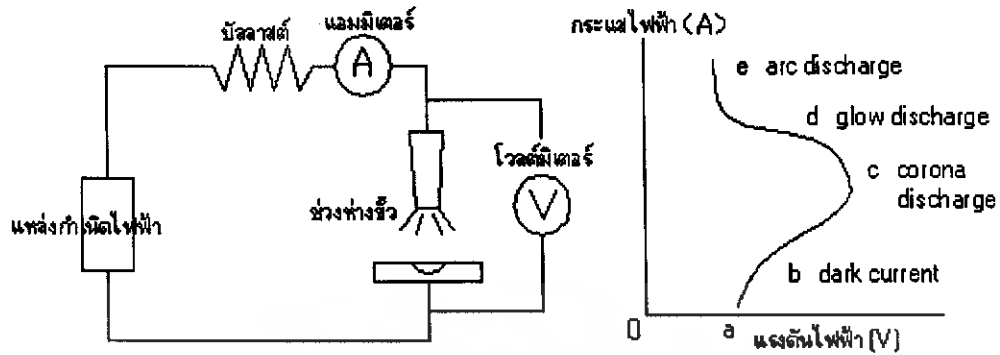


รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการดีสชาร์จ

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของการสปาร์ก

ปรากฏการณ์การสปาร์ก เป็นชื่อโดยรวมของการสปาร์กต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าประเภท ของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซตั้งอยู่ จนให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้สูญเสียความเป็นฉนวน (Dielectric Breakdown) และเกิดมีกระแสไหลอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงหมายถึง การฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การฝืนบังคับทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติ กระแสจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่การฝืนบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ไหลขึ้นมาอย่างกะทันหัน การนำเอาหลักการสปาร์กมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก เครื่อง EDM ดังรูปที่ 2.2 (Inoué, K., 1977)



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า - กระแสไฟฟ้าของการสปาร์ก

2.1.1 สภาพที่กระแสเริ่มไหล (Dark Current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือ ลดช่องว่างระหว่างสปาร์กลงมาเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งอากาศจะรวมตัวเป็นประจุไฟฟ้า และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดูดจากฝั่งขั้วลบไปยังขั้วบวก ซึ่งในช่วงเวลาขณะนี้จะมีการไหลมากประมาณ $10^{-8} - 10^{-11}$ A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกว่า สภาพกระแสเริ่มไหล

2.1.2 การสปาร์กแบบโคโรนา (Corona Discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันหรือลดช่องว่างลงอีกผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าบางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน เราเรียกสภาพนี้ว่าการสปาร์กแบบโคโรนา ซึ่งเป็นการสปาร์กที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

2.1.3 การสปาร์กแบบโกลว์ (Glow Discharge)

บริเวณที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้นอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบจะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้กระแสไฟฟ้ามียิ่งใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยสภาพการสปาร์กที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก เช่นนี้ เรียกว่า การสปาร์กแบบโกลว์

2.1.4 การสปาร์กแบบอาร์ค (Arc Discharge)

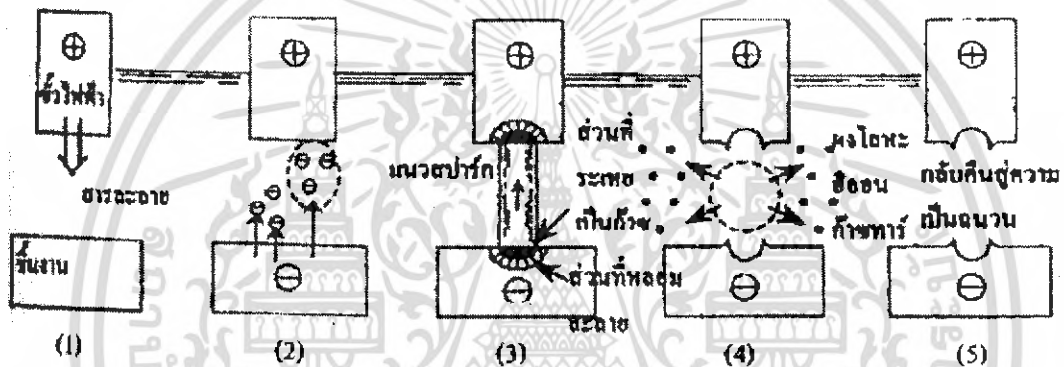
หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา และการสปาร์กแบบโกลว์ได้มีขนาดกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์กจะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้าย สภาพการสปาร์ก เช่นนี้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่เหมาะกับการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมพลังงานหรือระยะก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการสปาร์กแบบอาร์คนี้

การสปาร์กที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปแล้วนั้นเป็นการสปาร์กซึ่งเกิดขึ้นทุกชั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล จนถึงสภาวะสปาร์กแบบการอาร์ค ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

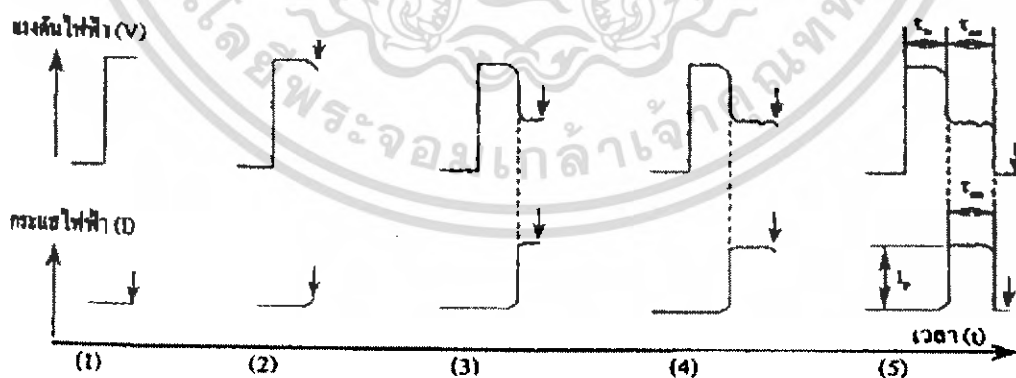
2.2 หลักการของกรรมวิธีขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

กรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม ในทางปฏิบัติจะทำงานในสารละลาย โดยใช้ทองแดง ทองเหลือง กราไฟท์ เป็นขั้วไฟฟ้าและวัตถุที่นำมาขึ้นรูปได้จะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านผ่านได้ จะไม่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องเหมือนกับการเชื่อมแต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากการสปาร์กหลอมละลายวัสดุมากเกินไปจนเสียรูปทรง เครื่องอีดีเอ็มอาศัยการใช้พลังงานระดับสูงซึ่งปลดปล่อยออกมาในช่วงสั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมาก คือทำอย่างไรจะทำให้เกิดการสปาร์กที่เป็นประกายไฟอย่างมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจะใช้ระบบ NC (Numerical Control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์กหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (Pulse) แต่ละลูกของการสปาร์กจะเป็น ดังรูปที่ 2.3 และ ดังรูปที่ 2.4 (Inonue, K., 1977)



รูปที่ 2.3 สภาพของลำดับการสปาร์กในแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.4 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่องอีดีเอ็ม

2.2.1 ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60 – 280 V) ที่ระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่าระหว่างขั้ว) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าใช้โหลด (No-load Voltage) ในสภาพเช่นนี้ระหว่างขั้วยังรักษาความต้านทานระหว่างขั้วให้มีค่าสูงเพื่อลดระยะระหว่างขั้ว และเป็นการระบายความร้อนของขั้ว ซึ่งการลดช่องว่างของขั้วไฟฟ้าที่เกิดการสปาร์กให้แคบลงจะส่งผลคือ ทำให้ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปมีความละเอียดสูง

2.2.2 การสูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่ออยู่ระยะระหว่างขั้วใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงระยะหนึ่ง (ระยะทางเป็นไมโครเมตร) สารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนอันเนื่องประจุลบจะถูกดึงไปอีกฝั่งที่เป็นบวก คือ เริ่มมีกระแสไหล

2.2.3 สปาร์กหลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือการสปาร์กนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์กขึ้นนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้น ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นจะมีกระแสตั้งแต่ 0.1 แอมแปร์ ไปจนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงนี้จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์กมีอุณหภูมิสูงมากขึ้นมาก (3,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์กก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซไป และเกิดความดันที่สูงมากเป็นบางส่วน

เมื่อการสปาร์กเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้วจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง $E = IR$ (ตามกฎของโอห์ม) แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าสปาร์ก (Discharge)

2.2.4 เย็นตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้าง ดูดความร้อนออกไปก็จะเริ่มออกไปก็จะเริ่มเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็กๆ ในช่วงที่เกิดการสปาร์กอยู่นั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลอยู่ในระดับค่าหนึ่งแต่ทว่าเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างนั้นถูกปลดปล่อยออกมาแรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

2.2.5 กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์กหนึ่งครั้งได้จบลงกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ และจะรองนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวนโดยไม่มีแรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์กแบบผิดปกติ เช่น การสปาร์กซ้ำหรือสปาร์กเป็นบางจุดอันเนื่องจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของอิเล็กตรอนที่ตกค้างระหว่างขั้วหรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ก ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์กเช่นเดิมอีก โดยเริ่มต้นที่ 1 ใหม่

2.2.6 ประโยชน์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. ความสามารถในการแปรรูปโลหะแข็งหรือโลหะผสม ซึ่งไม่สามารถทำได้โดยวิธีธรรมดา กรรมวิธีอีดีเอ็มจึงมีบทบาทสำคัญในการทำแม่พิมพ์ และเครื่องมือที่ทำจากโลหะแข็ง ทั้งสะเทคนคาร์ไบด์ สเตลไลท์

2. ความสามารถในการผลิตชิ้นรูปร่างใดๆก็ได้ เนื่องจากการกัดเนื้อโลหะอาศัยการสปาร์ก จึงไม่ต้องการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน นอกจากนี้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงมาในชิ้นงานเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะแปรรูปโลหะรูปร่างใดๆ โดยใช้เพียงหนึ่งอิเล็กโทรด

3. พื้นผิวจากกรรมวิธีอีดีเอ็มมีลักษณะเป็นหลุมเป็นจำนวนมาก จึงช่วยให้สามารถเก็บรักษาน้ำมันหล่อลื่นได้ดี จึงช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับการหล่อลื่นได้

4. ในระหว่างทำการแปรรูปชิ้นงานจะไม่มีมีการเปลี่ยนรูปร่าง เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัสของอิเล็กโทรดหรือไม่มีแรงทางกล ทำให้สามารถแปรรูปชิ้นงานที่บอบบางหรือเปราะได้

5. แม้กรรมวิธีอีดีเอ็มจะมีผลกระทบของความร้อน แต่เป็นผลกระทบเฉพาะที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อวัสดุส่วนใหญ่

2.2.7 การแบ่งประเภทของกรรมวิธีอีดีเอ็ม (Categories of EDM)

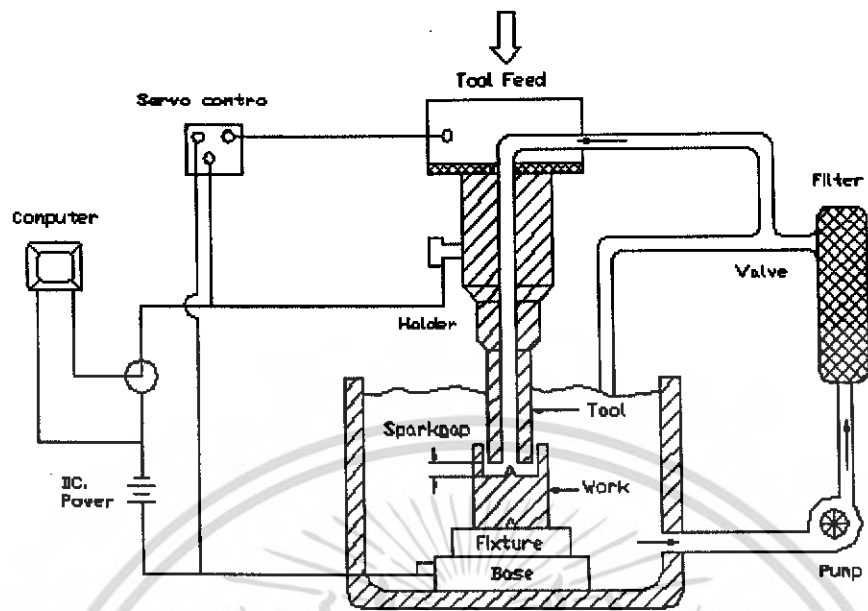
การแปรรูปโลหะ โดยอาศัยการสปาร์กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. การสร้างแม่พิมพ์ (Sinking by EDM)
2. การตัด (Cutting by EDM)
3. การเจียรระโน (Grinding by EDM)

2.2.8 อุปกรณ์ของกรรมวิธีอีดีเอ็ม

กรรมวิธีอีดีเอ็มจะเกี่ยวข้องกับการใช้ความร้อนที่มีความเข้มสูง ทำให้โลหะชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอเฉพาะที่ จะมีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ทำหน้าที่ผลิตพลังงานคิซาร์จเพื่อใช้ในการแยกอนุภาคโลหะ
2. ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System) ทำหน้าที่เป็นฉนวน ทัศนพิเศษอนุภาคโลหะและระบายความร้อนที่เกิดขึ้น
3. อิเล็กโทรด (Electrodes) ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแบบให้กับชิ้นงานหรือกัดเซาะโลหะงาน
4. ระบบเซอร์โว (Servo System) ทำการควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดเพื่อรักษาระยะช่องว่างของคิซาร์จให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานเฉลี่ยจะลดลงโดยตัวประกอบช่วงเวลาประวิง และสัมพันธ์กับการเกิดลัดวงจร และกำลังงานเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นกับตัวประกอบหน้าที่กระแสพัลส์ กระแสเฉลี่ยจะลดลง โดยตัวประกอบหน้าที่ช่วงเวลาประวิง



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของระบบอีดีเอ็ม

2.3 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรด (Electrode) ในกรรมวิธีอีดีเอ็มจะใช้กำหนดรูปร่างของชิ้นงานหรือรูที่ต้องการเจาะ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาส่วนประกอบของอิเล็กโทรดและชนิดของวัสดุที่ใช้ ประคตแล้วค่าใช้จ่ายในการทำอิเล็กโทรดจะประมาณเท่ากับหรือมากกว่า 50% ของค่าใช้จ่ายในการแปรรูปทั้งหมด จะเห็นว่าการเลือกจำนวนอิเล็กโทรดที่ใช้งานมีความสำคัญมาก

2.3.1 คุณสมบัติของอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. เป็นตัวนำความร้อนที่ดี
3. มีจุดหลอมละลายและมีจุดเดือดสูง
4. ต่อด้านการกัดเซาะจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอต่ำ
5. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ
6. มีความสามารถทำงานได้ดี ราคาควรจะประหยัด และความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีน้ำหนักเบาด้วย

2.3.2 วัสดุที่ทำอิเล็กโทรด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ

2.3.2.1 อิเล็กโทรดโลหะ

ทองแดง (Electrolytic Copper)

ความหนาแน่น : 8.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดเดือด : 1083°C

ความต้านทานไฟฟ้า : 0.0167 โอห์ม มม.²/ม.

ข้อดี ทองแดงสามารถใช้งานทั้งประเภททนกัดกร่อนและงานกัดละเอียด ให้อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง แต่การสึกหรอต่ำ

ข้อเสีย มีน้ำหนัก การขยายตัวทางความร้อนสูง รูปทรงไม่เสถียรเมื่อมีขนาดบาง
การผลิต การสร้างอิเล็กทรอนิกส์ อาจจะใช้การขึ้นรูปโดยวิธี Stamping และ Coining ทองแดงสามารถแปรรูปได้โดยการกลึงหรือการกัด เพื่อที่หลีกเลี่ยงรอยจากมีดกลึงหรือมีดกัด จะต้องมีกรหล่อเย็นด้วยน้ำมันหล่อเย็นชนิดพิเศษ หรือ Fat oil 50% ผสมกับ Petroleum 50% การเจียรระไนทองแดง จะใช้ใบเจียรระไนคือ

สารขัดถู	:	คาร์บอรัมดัม (Carborundum)
เกรน	:	46 ถึง 80 ตามผิวสำเร็จที่ต้องการ
โครงสร้าง	:	ความแข็ง H-K, รูพรุน 13-15
ความเร็วรอบ	:	30 เมตร/วินาที
สิ่งจำเป็น	:	มีการหล่อเย็นหรือใช้น้ำมันหล่อเย็น

ทองแดงผสมทั้งตะเเดน

ความหนาแน่น	15 - 18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด	2,500 °C
ความต้านทานไฟฟ้า	0.045 - 0.055 โอห์ม.มม. ² / ม.

ทองแดงผสมทั้งตะเเดนมีโครงสร้างเท่ากับทุกทิศทาง อัตราส่วนผสมของทั้งสองสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ ส่วนผสมของทั้งตะเเดนอยู่ระหว่าง 50% ถึง 80% ทองแดงอยู่ระหว่าง 50% ถึง 20% ถ้าโลหะมีทั้งตะเเดนผสมอยู่มากจะทำให้การแปรรูปยากกว่าโลหะที่มีทั้งตะเเดนผสมอยู่น้อย แต่ในการทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ การสึกหรอจะต่ำกว่า

ข้อดี คุณภาพผิวงานดี มีความต้านทานการกัดเซาะ และมีเสถียรภาพทางความร้อน อัตราการกัดเนื้อโลหะสูง

ข้อเสีย ราคาแพง, ขนาดจำกัด, กระบวนการจะยากกว่าทองแดง
การทำอิเล็กทรอนิกส์ใช้วิธีการธรรมดาคือ การกลึงหรือ การเจียรระไน

การกลึง		
มีดกลึง	คาร์ไบด์	เหล็กเครื่องมือ
ความเร็วตัด	60 - 100 เมตร/นาที	12 - 20 เมตร/นาที
มุมคายหลบ	6 - 8 องศา	8 - 10 องศา
มุมหลบ	4 - 6 องศา	4 - 6 องศา

การเจียรระไน

สารขัดถู	:	คาร์บอรัมดัมเขียว (Green Carborundum)
เกรน	:	60
ความแข็ง	:	J
โครงสร้าง	:	8

การใช้งาน ทองแดงผสมทั้งตะเเดนจะใช้งานดังต่อไปนี้

- การแปรรูปโลหะทั้งตะเเดนคาร์ไบด์
- การเจาะรูที่มีความลึก
- งานที่มีรายละเอียดสูง

- งานที่มีมุมขอบแหลม

- งานที่ต้องการปริมาณมาก ชิ้นส่วนเล็ก

อลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloys)

เมื่อแปรรูปชิ้นงานขนาดใหญ่ และเป็นสามมิติ ไม่ต้องการความเรียบของผิว จะใช้อลูมิเนียมผสมชื่อ ซิลูมิน (Silumin) เป็นอิเล็กโทรด โลหะชนิดนี้ประกอบด้วย Al 85% , Si 11%, Mg 0.4 – 0.6%, Zn 1%, Ti 1%, Mn, Fe, Copper 1%

ข้อดี ซิลูมินสามารถที่จะหล่อได้ง่าย เพื่อหลีกเลี่ยงรูพรุนผนังไม่ควรจะหนามาก (ประมาณ 10 – 15 มม.) การหดตัวประมาณ 1% และสามารถชดเชยด้วยการขึ้นรูปเย็น (Cold-Forming) ก่อนการอบอ่อน กระทำให้ความร้อนอิเล็กโทรดถึง 540°C ผสมด้วยให้เย็นตัวในน้ำ ใช้ระบบขับเคลื่อนโลหะแบบฉีด และใช้ความดันต่ำ

ทองเหลือง (Brass)

ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้ทองเหลืองเป็นอิเล็กโทรด เพราะมีการสึกหรอสูง แต่ลักษณะเด่นที่รับจากทองเหลืองคือใช้กับการแปรรูปไทเทเนียมผสม

เหล็ก (Steel)

เหล็กสามารถใช้เป็นอิเล็กโทรดได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่าทองแดงและกราไฟท์ สิ่งสำคัญของกรรมวิธีอีซีเอ็มบนเหล็ก จะได้เส้นแยกของแบบหล่อพลาสติก และแบบหล่อแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนบนของแบบหล่อหรือแม่พิมพ์ ก็คืออิเล็กโทรด

2.3.2.2 อิเล็กโทรดโลหะ

กราไฟท์ (Graphite)

ความหนาแน่น	:	1.6 – 1.85 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
ความต้านทานไฟฟ้า	:	8 – 15 โอห์ม.มม ² /ม.
จุดเดือด	:	3600°C
ความแข็งแรงแตกหัก	:	200 – 700 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
ขนาดของเกรน	:	0.01 – 0.045 มม.

ปกติแล้ว กราไฟท์จะถูกอัดมาเป็นก้อนใหญ่ในระหว่างการผลิตตามความดันที่ใช้ ความหนาแน่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ กราไฟท์ความหนาแน่นต่ำจะเป็นแอนไอโซทรอปิก ส่วนกราไฟท์ความหนาแน่นสูงจะเป็นไอโซทรอปิก ความหนาแน่นของกราไฟท์สามารถที่จะระบุลักษณะที่สำคัญของกรรมวิธีอีซีเอ็ม เช่น กราไฟท์ความหนาแน่นต่ำ (1.6 – 1.7) จะให้อัตราการกัดโลหะสูงกว่ากราไฟท์ความหนาแน่นสูง (1.8 – 1.85)

ส่วนอัตราการสึกหรอที่นุ่ม กราไฟท์ความหนาแน่นสูงจะให้ผลลัพธ์ดีกว่าขนาดเกรนของกราไฟท์จะมีผลโดยตรงกับผิวของกราไฟท์และบนผิวที่กัดเซาะด้วย กราไฟท์ที่มีเกรนละเอียดจะมีผิวเรียบกว่ากราไฟท์ที่มีเกรนหยาบ และผิวที่ถูกกัดเซาะก็จะมีคุณภาพดีกว่าด้วย

ข้อดี

- ไม่มีผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน และคงรักษาคุณสมบัติทางกลไว้ได้
- ไม่มีการบิดงอหรือการเบี่ยงเบน
- สามารถแปรรูปได้ง่ายด้วยวิธีธรรมดา
- ราคาถูกทำให้ประหยัด

ข้อเสีย

- วัสดุเป็นสารขัดถู จึงต้องระมัดระวังในการป้องกันการลื่นของเครื่องจักรจากผงกราไฟท์
- กราไฟท์มักจะเปราะ ดังนั้นในการผลิตต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ โดยเฉพาะที่บริเวณมุมต่างๆ
- ไม่เหมาะกับการหล่อและการขึ้นรูป
- ฝุ่นละอองของกราไฟท์ที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูป ต้องมีระบบกำจัดที่เหมาะสมกับโรงงานและเป็นสิ่งจำเป็น

ข้อสังเกต

- กราไฟท์ไม่สามารถใช้กับเครื่องกำเนิดพัลส์แบบรีแลกเซชัน (Relaxation) ได้
- การแปรรูปทั้งสะพานคาร์ไบด์จะทำได้ยาก และมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติของคิสซาร์จสูงกว่าการใช้โลหะเป็นอิเล็กโทรด
- กราไฟท์ความหนาแน่นสูงจะใช้เมื่อการสึกหรอและความแข็งแรงที่มุมเป็นวิกฤต ในขณะที่กราไฟท์อื่นๆ ใช้ในกรณีการสึกหรอมีความสำคัญรองลงไป และภายในของแบบไม่มีรายละเอียดมากนัก
- กราไฟท์ที่มีเกรนละเอียดจะใช้สำหรับการแปรรูปที่มีรายละเอียด เช่น ขอบ มุมต่างๆ

การผลิต ในการทำอิเล็กโทรดกราไฟท์จะใช้วิธีการแปรรูปแบบธรรมดา คือ การกลึง การเจียรระโน และการกัด

การกลึง การกลึงกราไฟท์จะใช้มีดกลึงทำด้วยเหล็กเครื่องมือ ทั้งสะพานคาร์ไบด์ หรือถ้าผลิตจำนวนมากอาจใช้มีดกลึงเพชร มีรายละเอียดดังนี้

	เหล็กเครื่องมือ	คาร์ไบด์	เพชร
มุมเพื่อ (Clearance Angle)	8 – 10 องศา	8 – 10 องศา	10 – 20 องศา
มุมคาย (Rake Angle)	16 – 20 องศา	16 – 20 องศา	10 องศา
ความเร็วตัด	80 เมตร/นาที	150 เมตร/นาที	250 – 400 เมตร/นาที

กราไฟท์เป็นสารขัด ดังนั้นมีดกลึงเหล็กเครื่องมือต้องลับบ่อยๆ

การเจียรระโน กราไฟท์สามารถทำการเจียรระโนได้โดยใช้ล้อหินเจียรระโนดังนี้

สารขัดถู	:	คาบอรั้นคัมเขียว
การยึดเหนี่ยว	:	สารเคลือบ
เกรน	:	60 สำหรับงานละเอียด 36 สำหรับงานหยาบ
ความแข็ง	:	J
โครงสร้าง	:	5

การกัด เป็นข้อได้เปรียบของกราไฟท์เมื่อผลิตอิเล็กโทรดสามมิติจากแบบจำลองเช่นใช้เครื่องกัดคัดลอก อาจควบคุมด้วยมือหรือควบคุมอัตโนมัติ ความเร็วกัดสูง (100 – 200 เมตร/นาที) และอัตราป้อน (100 – 200 มม./นาที) ซึ่งสามารถทำอิเล็กโทรดกราไฟท์ได้เร็วกว่าทองแดงหรือทองแดงเทลเลอร์ถึง 5 – 10 เท่า

2.3.2.3 โลหะและอโลหะผสมกัน

ทองแดงผสมกราไฟท์

ใช้สำหรับจุดประสงค์พิเศษ ในวิธีสูญญากาศ จะเทพทองแดงเข้าไปในรูพรุนของกราไฟท์ ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ความหนาแน่น : 2.4 – 3.2 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ความต้านทานไฟฟ้า : 3 – 5 โอห์ม.มม²/ม.

ความแข็งแรงแตกหัก : 700 – 900 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

ข้อดี ทองแดงผสมกราไฟท์มีข้อดีเหมือนกับกราไฟท์ นอกจากนี้ยังมี

- การแปรรูปด้วยวิธีธรรมดาจะง่ายกว่า เพราะมีความเปราะน้อยลง และที่มุมมีโอกาสแตกน้อยลง ดังนั้นจึงแนะนำสำหรับอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีรายละเอียด

ข้อเสีย ทองแดงผสมกราไฟท์มีข้อเสียเหมือนกราไฟท์ และที่เพิ่มเติมคือราคาแพงกว่า

ข้อสังเกต การเปรียบเทียบกราไฟท์กับทองแดงผสมกราไฟท์

- โอกาสที่เกิดความผิดปกติของคิซาร์จะลดลง
- สามารถแปรรูปทั้งสะเตนคาร์ไบด์ได้
- สามารถใช้กับ Microfin Relaxation ได้
- อัตราการสึกหรอต่ำกว่า
- ให้คุณภาพผิวงานดีกว่า และนำไปกับขั้นตอนการกัดละเอียด
- ให้อัตราการกัดโลหะสูงกว่าในทั้งสะเตนคาร์ไบด์ (10 – 15%) เมื่อแปรรูปเหล็กอัตราการกัดจะต่ำกว่าเมื่อใช้อิเล็กโทรดเป็นขั้วลบ และจะเท่ากันเมื่ออิเล็กโทรดเป็นขั้วบวก

2.4 ระบบไดอิเล็กตริก

ระบบไดอิเล็กตริก (Dielectric System) ประกอบด้วย สารไดอิเล็กตริก ท่อส่ง ปีม เครื่องกรอง และถังบรรจุ สารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกมีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือน้ำมันไฮโดรคาร์บอน (น้ำหนัก 30 – 50) น้ำมันซิลิกอน และน้ำกำจัดไอออน น้ำกำจัดไอออนจะใช้ไม่มาก แม้ว่าจะมีอัตราการกัดเนื้อโลหะสูง และมีความสามารถหล่อเย็น แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดในการเจาะรู เมื่อทำงานเสร็จต้องตัดปลายลวดออกแล้วจึงเริ่มเจาะรูใหม่ได้ การใช้น้ำกำจัดไอออนใช้มากในกรรมวิธีของ Wire-EDM

2.4.1 หน้าที่ของสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกจะมีหน้าที่ดังนี้

1. ฉนวน (Insulation) จุดประสงค์หลักของสารไดอิเล็กตริกคือทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน การคิซาร์จึงไม่ควรจะเกิดขึ้นจนกว่าระยะช่องว่างจะน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้ความละเอียดถูกต้องมากที่สุด
2. ไอออน (Ionisation) สารไดอิเล็กตริกควรที่จะสร้างเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเกิดคิซาร์เร็วที่สุด และเมื่อสวิตช์ออฟ (Off) สารไดอิเล็กตริกจำเป็นต้องกำจัดไอออนในเส้นทางคิซาร์เพื่อให้เกิดการคิซาร์ใหม่ในตำแหน่งอื่นต่อไป
3. การหล่อเย็น (Cooling) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่องว่างประมาณ 10,000°C ภายในเวลาเศษส่วนล้านของวินาที ความร้อนที่เกิดขึ้นต้องระบายออก ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกจึงทำหน้าที่ระบายความร้อนจากชิ้นงานและอิเล็กโทรด ความร้อนที่สูงเกินไปจะทำให้อิเล็กโทรดสึกหรอมากในเวลาเดียวกันไอของโลหะก็จะกลั่นตัวในสารไดอิเล็กตริกด้วย
4. พัดพาอนุภาคโลหะจากกระบวนการอีดีเอ็มในช่องว่างคิซาร์จะถูกสารไดอิเล็กตริกพัดพาออกมา จึงช่วยกระบวนการให้ดำเนินไปได้ตามปกติประสิทธิภาพ ถ้าการไหลพัดพาอนุภาคโลหะไม่ดีจะทำให้เกิดการหยุดนิ่งของสารไดอิเล็กตริก ทำให้มีอนุภาคโลหะตกค้างในช่องว่างและอาจจะเกิดการลัดวงจรได้ เนื่องจากสารไดอิเล็กตริกที่

ใช้งานแล้วต้องผ่านการทำความสะอาดโดยเครื่องกรอง กรองเอาอนุภาคโลหะออกจากสารไดอิเล็กตริกแล้วจึงนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

2.4.2 ประเภทของสารไดอิเล็กตริก สารไดอิเล็กตริกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 น้ำกักไอออน

สารละลายน้ำหรือน้ำในสภาวะปกติจะมีไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเวลาที่จะแปรรูปโลหะจึงต้องผ่านกระบวนการทำให้มีความต้านทานสูงขึ้น เนื่องมาจากน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงทำให้กระแสไฟฟ้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความเร็วในการกัดโลหะจึงสูงกว่าน้ำมันประมาณ 2 – 10 เท่า แต่คุณภาพผิวงานจะหยาบปกติแล้วน้ำจะใช้เป็นสาร ไดอิเล็กตริกในเครื่องอีทีเอ็มประเภทตัดด้วยเส้นลวด

2.4.2.2 ไฮโดรคาร์บอน ที่นิยมใช้กันมีหลายชนิดคือ

1. น้ำมัน (Oils) ที่ใช้กันมากได้แก่น้ำมันแร่ (Mineral) ซึ่งให้ผลลัพธ์ดี น้ำมันแร่จะไม่มี Aromatics หรือสารเพิ่มเติมอื่นๆ ความหนืดของน้ำมันเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น น้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไม่เหมาะสมกับงานขั้นตอนการกัดผิวสำเร็จเนื่องจากขั้นตอนนี้ต้องดึงช่องว่างแคบลง จึงทำให้น้ำมันที่มีความหนืดสูงไหลเวียนได้ยากขึ้นในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน สำหรับขั้นตอนการกัดหยาบจะใช้น้ำมันเตาเป็นสารไดอิเล็กตริก จุดวาบไฟของสารไดอิเล็กตริกก็มีความสำคัญ เพราะถ้าจุดเดือดต่ำ แนวน้ำมันที่จะกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้เกิดแก๊สปริมาณมาก จึงต้องลดความเร็วการแปรรูปลง

2. น้ำมันก๊าด (Kerosene) มีความหนืดต่ำ ทำให้เหมาะกับการขั้นตอนการกัดละเอียดและละเอียดมาก แนะนำให้ใช้กับการแปรรูปโลหะทั้งสเตนคาร์ไบด์ เมื่อตั้งช่วงพัลส์และเมื่อต้องการกำจัดกลิ่นที่เกิดจากสารที่แตกตัว นอกจากน้ำมันก๊าดแล้วยังมีน้ำมันอื่นๆอีกเช่น น้ำมันจักร (Spindle Oil) น้ำมันเครื่องกล (Machine Oil)

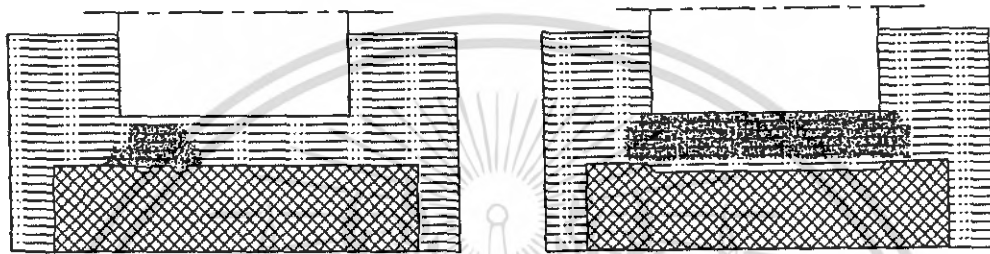
น้ำมันที่มีจุดวาบไฟสูงและจุดติดไฟสูงนิยมนำมาใช้งาน น้ำมันซิลิคอนจึงเป็นประโยชน์ในแง่คิดนี้และการขนส่งก็ปลอดภัยด้วย สารไดอิเล็กตริกต้องไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนังและเสื้อผ้า แก๊สที่เกิดจากการแตกตัวของความร้อนต้องไม่เป็นอันตราย โดยทั่วไปแก๊สจะค่อยๆ ปรากฏขึ้นโดยคิซาร์จในของเหลวไฮโดรคาร์บอน ส่วนใหญ่ได้แก่อาเซทิลีน (C_2H_2) เอททิลีน (C_2H_4) มีเทน (CH_4) และไฮโดรเจน จึงต้องมีเครื่องมือตรวจแก๊สเพื่อความปลอดภัย

2.4.3 คุณสมบัติของสารไดอิเล็กตริก

- มีความหนืดต่ำ
- มีจุดเดือดสูง และจุดวาบไฟสูง
- มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนสูง
- ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและผิวหนัง
- ต้องไม่เกิดแก๊สที่เป็นอันตรายจากการแตกตัวหรือสลายตัวเนื่องจากความร้อน
- ไม่กัดกร่อนชิ้นงาน
- มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดี
- มีราคาถูกหรือประหยัด

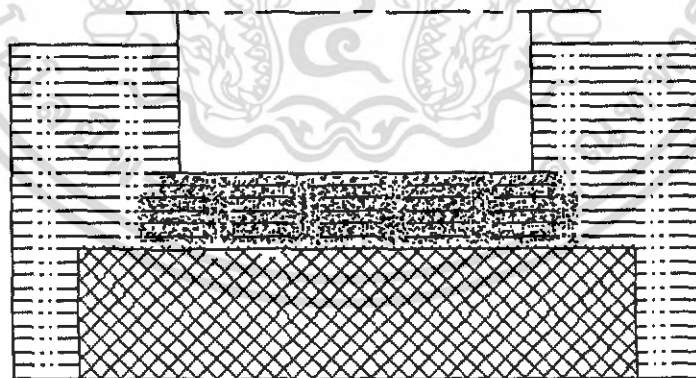
2.5 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก

การไหลที่ถูกต้องของสารไดอิเล็กตริก (Flushing) ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน จะทำให้การทำงานของระบบอีซีเอ็มมีประสิทธิภาพ ถ้าหากกรรมวิธีอีซีเอ็มไม่ใช้ระบบการไหลของสารไดอิเล็กตริกจะมีผลกระทบดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแรกสารไดอิเล็กตริกยังสะอาดอยู่ ไม่มีอนุภาคโลหะและคาร์บอนที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริก ทำให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนสูงกว่าไดอิเล็กตริกที่มีอนุภาคโลหะ ทำให้มีการประวิงก่อนที่ความเป็นฉนวนจะสิ้นสุดลง และเริ่มเกิดคิสซาร์จ อนุภาคโลหะที่เกิดจากคิสซาร์จในตอนแรกจะให้ความคงทนต่อการเป็นฉนวนของ ไดอิเล็กตริกครั้งต่อมาลดลง และสามารถทำให้เกิดคิสซาร์จง่ายขึ้น ดังรูปที่ 2.6 (ทวีป จีระประดิษฐ, 2538)



รูปที่ 2.6 การสะสมของอนุภาคโลหะในช่องว่างเมื่อไม่ใช้ระบบการไหลของไดอิเล็กตริก

ถ้าหากความหนาแน่นของอนุภาคโลหะในช่องว่างมีมากขึ้น ก็จะทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคโลหะก่อรูปเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการคิสซาร์จที่ผิดปกติไปหรือเกิดการอาร์คขึ้น ทำให้ผิวของชิ้นงานและอิเล็กโทรดถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้เองจึงต้องขจัดอนุภาคโลหะออกไปจากช่องว่างโดยระบบการไหลของไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ดังรูปที่ 2.7 (ทวีป จีระประดิษฐ, 2538)



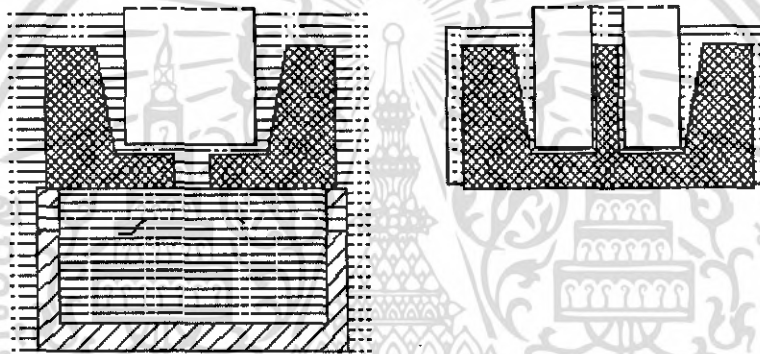
รูปที่ 2.7 อนุภาคโลหะก่อตัวเป็นสะพานตัวนำไฟฟ้า

2.5.1 ระบบการไหลของไดอิเล็กตริกในกรรมวิธีอีเอ็ม พิจารณาแบ่งออกได้ดังนี้

1. การไหลแบบฉีด (Injection Flushing)
2. การไหลแบบดูด (Suction Flushing)
3. การไหลด้านข้าง (Side Flushing)
4. การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด (Flushing by Dielectric "Pumping")
5. การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

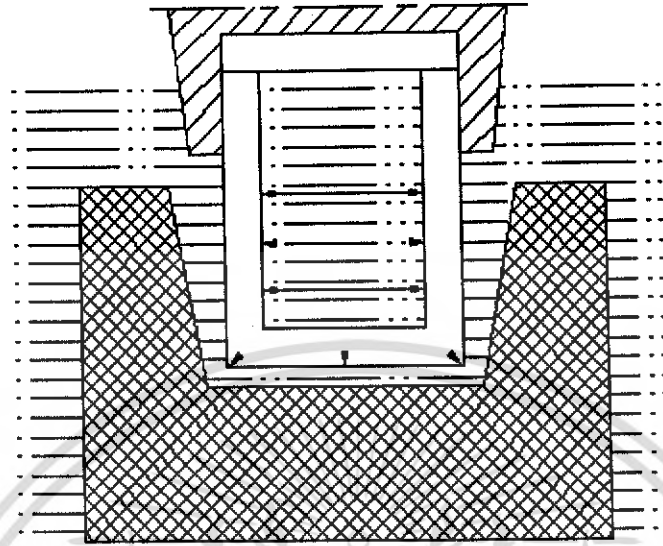
2.5.1.1 การไหลแบบฉีด

การไหลแบบนี้ ไดอิเล็กตริกจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณช่องว่างของชิ้นงานและอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 2.8 (ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538)



รูปที่ 2.8 การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีด

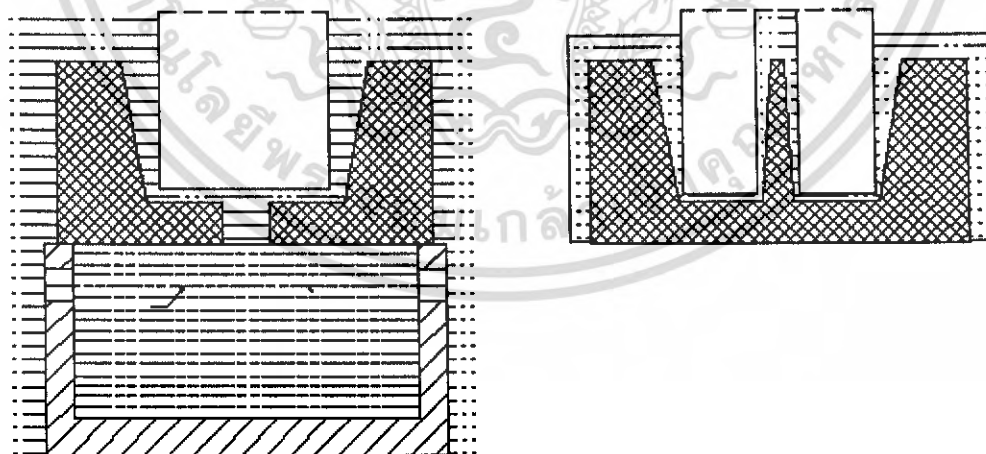
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบฉีดจะใช้กับชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นเรียวหรือใช้กับอิเล็กโทรดที่มีลักษณะแนวโค้งงอที่ สำหรับลักษณะของเรียวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการดิซชาร์จทางด้านข้างของอิเล็กโทรด ระบบการไหลที่ดีจะทำให้สามารถเจาะรูลึกๆได้ โดยใช้อิเล็กโทรดกราไฟท์ตั้งความดันของไดอิเล็กตริกให้สูงขึ้นและไหลเข้าไปในอิเล็กโทรดกราไฟท์ รูพรุนของกราไฟท์จะทำให้ไดอิเล็กตริกไหลผ่านออกมายังบริเวณช่องว่างได้ ดังรูปที่ 2.9 (ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538)



รูปที่ 2.9 ใค้เล็กตริกไหลผ่านรูพกรนราไฟท์ออกมาที่บริเวณช่องว่าง

2.5.1.2 การไหลแบบดูด

การไหลแบบนี้ใค้เล็กตริกจะถูกดูดออกผ่านรูของจันงาน หรือรูของอเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบกับกรไหลแบบฉีดจะเห็นว่าแบบดูดหลักเล็ยผลกระทบของเร็วจากกรเกิดตขารังทงด้านข้างของอเล็กโทรด รูที่เจาะจึงเป็นทรงกระบอกกลม ความดันของการดูดสูญญากาศต้องไม่น่านกว่า 0.8 - 0.9 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ดังรูที่ 2.10 (ทวีป จีระประดิษฐ, 2538)

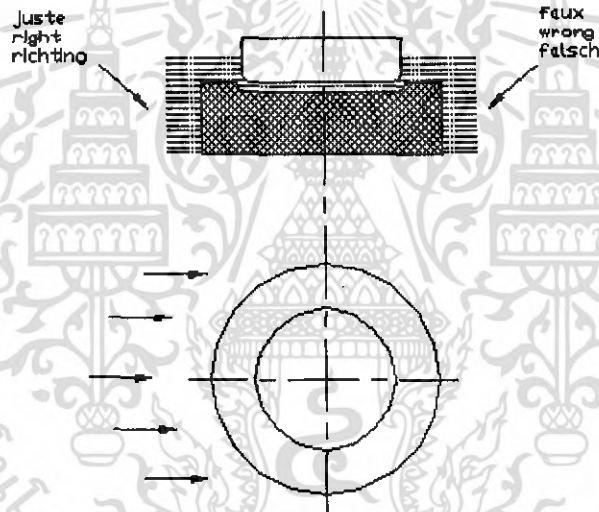


รูปที่ 2.10 การไหลของใค้เล็กตริกแบบดูด

กรใช้งานของการไหลแบบดูดจะสามารถใช้ลักษณะเดียวกับกรไหลแบบฉีด แต่กรไหลแบบดูดนิยมให้ใค้เล็กตริกไหลผ่านอเล็กโทรดมากกว่าที่จะผ่านจันงาน

2.5.1.3 การไหลด้านข้าง

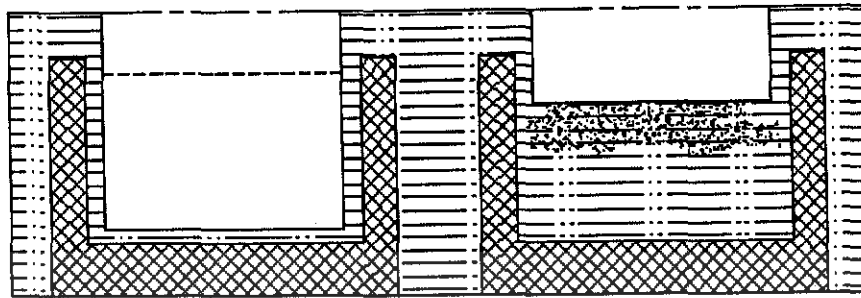
วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถเจาะรูของอิเล็กโทรดหรือชิ้นงานได้ เช่นกรณีของแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญ ร่องลึกที่แคบของแบบหล่อพลาสติก จึงต้องให้การไหลของไดอิเล็กตริกกระทำทางด้านข้างโดยใช้หัวฉีด ซึ่งต้องระมัดระวังในการปรับให้พื้นผิวของการทำงานของอิเล็กโทรดมีการไหลที่เท่าๆกัน เทคนิคนี้จะใช้ร่วมกับการกระเพื่อมของอิเล็กโทรด เพื่อช่วยให้การไหลดีขึ้น เมื่อทำการแปรรูปพื้นผิวหน้าเรียบ ทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกจะต้องสอดคล้องกับมุมฉีดไดอิเล็กตริกเข้า สำหรับแม่พิมพ์ปั๊มเหรียญเมื่อรูปแบบตามยาวไม่เรียบจะต้องใช้หัวฉีดแบบพิเศษมาใช้ และเมื่อทิศทางการไหลของไดอิเล็กตริกไม่ขนานกับด้านข้างของอิเล็กโทรดจะทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้น ดังนั้นจะมีไดอิเล็กตริกจำนวนน้อยเข้าไปภายในช่องว่างเท่านั้นจึงทำให้ระบบการไหลไม่ดี แต่ถ้าการไหลของไดอิเล็กตริกมีทิศทางเข้าไปในช่องว่างโดยตรง จะทำให้ปริมาณของไดอิเล็กตริกเข้าไปจำนวนมาก ทำให้การไหลมีประสิทธิภาพดีขึ้น ระบบการไหลทางด้านข้างจะไม่ใช้พร้อมกันทั้งสองด้านของอิเล็กโทรด เพราะจะทำให้อนุภาคโลหะที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานไม่สามารถจะถูกขับออกมาจากช่องว่างได้ ดังรูปที่ 2.11 (ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538)



รูปที่ 2.11 การไหลของไดอิเล็กตริกทางด้านข้าง

2.5.1.4 การไหลที่ใช้การขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

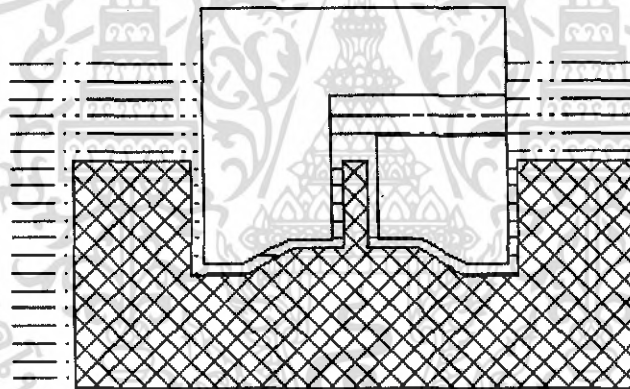
การไหลของไดอิเล็กตริกแบบนี้จะอาศัยการยกขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด เมื่ออิเล็กโทรดถูกยกขึ้นจะทำให้ช่องว่างกว้างขึ้น ไดอิเล็กตริกที่สะอาดจะถูกดูดเข้าไปผสมกับอนุภาคโลหะ และเมื่ออิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลง อนุภาคโลหะก็จะถูกขับออกไป วิธีการนี้จะใช้กับชิ้นงานที่มีความลึก และในระบบการไหลต้องไม่มีความดัน ดังรูปที่ 2.12 (ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538)



รูปที่ 2.12 การไหลของไดอิเล็กตริกโดยอาศัยการขึ้น-ลงของอิเล็กโทรด

2.5.1.5 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการยกอิเล็กโทรดขึ้น

เมื่อทำการแปรรูปโลหะโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดโลหะจะเห็นความผิดปกติของอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบบการไหลแบบฉีด มีการสึกหรอมาก และเพิ่มขึ้นตามความดันในบริเวณที่ฉีด ดังรูปที่ 2.13 (ทวิป จีระประดิษฐ์, 2538)



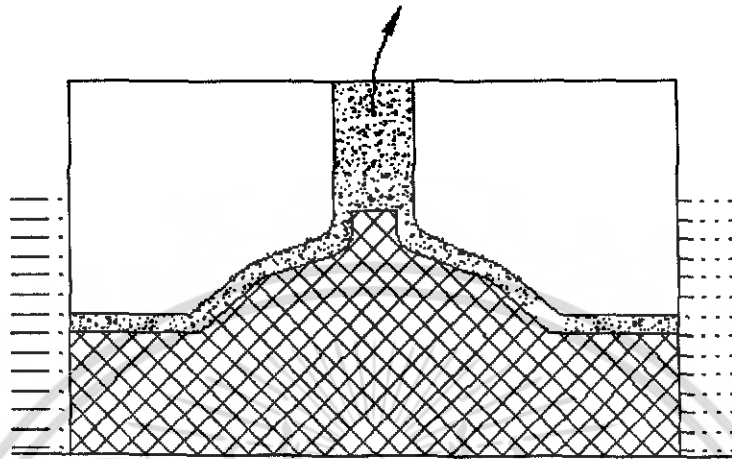
รูปที่ 2.13 การไหลแบบฉีดพร้อมกับการเลื่อนอิเล็กโทรดขึ้น

การที่จะป้องกันการสึกหรอที่เกิดจากความดันจะใช้วิธีการฉีด ไดอิเล็กตริกเข้าไปในช่องว่าง ในขณะที่ยกขึ้น อิเล็กโทรดก็เคลื่อนที่ยกขึ้นด้วย

2.5.2 ปัญหาแก๊ส (Gas Problem)

ในระบบการไหลแบบฉีดระหว่างการแปรรูปจะมีการสะสมของแก๊ส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดและจะทำให้ชิ้นงานเลื่อนได้ จึงต้องมีตัวระวังไม่ให้เกิดขึ้น ที่สำคัญคือต้องหลีกเลี่ยงแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของการระเบิด เช่น แก๊ส อากาศ ดังนั้นก่อนจะเริ่มทำการแปรรูป ต้องมั่นใจว่าภายในอุปกรณ์ฉีดมีไดอิเล็กตริกเต็ม และภายในถึงบรรจุมีไดอิเล็กตริกตามที่กำหนด เพื่อป้องกันปั๊มไม่ให้ดูดเอาอากาศเข้าไป เพื่อที่จะลดปริมาณการสะสมของแก๊สในอุปกรณ์ ต้องพยายามให้ทางดูดของอุปกรณ์อยู่ในจุดที่สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เมื่อทำการแปรรูปด้วยอิเล็กโทรด

แบบเว้าเข้า จะทำให้มีการสะสมของแก๊สภายในส่วนที่เว้านั้น จึงต้องทำการเจาะรูเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สออกไป ดังรูปที่ 2.14 (ทวีป จีระประดิษฐ์, 2538)



รูปที่ 2.14 การเจาะรูเล็กโทรดเพื่อระบายแก๊สที่เกิดขึ้น

2.6 ระบบเซอร์โว

ระบบเซอร์โว (Servo System) คือระบบควบคุมบังคับกลไกการป้อนอิเล็กโทรด โดยอาศัยสัญญาณความแตกต่างของโวลต์เทจจากช่องว่างคิสซาร์จกับ โวลต์เทจอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบ เพื่อทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้เหมาะสม

สมกับอัตราการกัดเนื้อโลหะงาน

เนื่องจากช่องว่างจะมีเศษอนุภาคโลหะจากการคิสซาร์จ แก๊สและหารที่เกิดจากการแตกตัวของไดอิเล็กตริก เนื่องจากความร้อน จะทำให้การเกิดคิสซาร์จครั้งต่อไปขาดเสถียรภาพและอาจทำให้เกิดลัดวงจร การสัมผัสโดยตรงระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานจะทำให้เกิดการลัดวงจรด้วย ทำให้การคิสซาร์จขาดหายไป ประสิทธิภาพการกัดจะจึงลดลง เมื่อช่องว่างมีความห่างพอเหมาะ ปริมาณการกัดเนื้อโลหะจะคงที่ แต่เมื่อช่องว่างแคบลงพลังงานคิสซาร์จที่ช่องว่างก็จะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการกัดเนื้อโลหะต่ำลง

เพื่อที่จะรักษาการกัดเนื้อโลหะให้เหมาะสม จะต้องทำการควบคุมกลไกการป้อนอิเล็กโทรดให้มีระยะช่องว่างคงที่ ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันการสัมผัสระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดและชิ้นงานจะสึกไปด้วย เนื่องจากช่องว่างนี้จะแคบมากจึงไม่สามารถรักษาให้คงที่ได้ตามสัดส่วนของการสึก ดังนั้นการป้อนอิเล็กโทรดจะใช้ระบบควบคุมแบบ Adaptive Control

2.6.1 ระบบควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดในกรรมวิธีอีดีเอ็ม แบ่งออกเป็น

1. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้โซลินอยด์
2. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยใช้เซอร์โวไฟฟ้า
3. ควบคุมการป้อนอิเล็กโทรดโดยการให้เซอร์โวไฮดรอลิก

2.7 Vickers Hardness Test

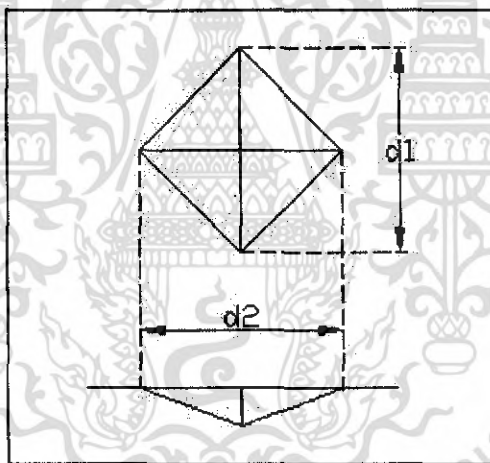
เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรมีลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ปลายหัวกดทำมุม 136° (เป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด) เป็นเวลา 10-15 วินาที ค่าความแข็งจะคำนวณจากแรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ Brinell แต่วิธีนี้หัวกดเป็นเพชรซึ่งมีความแข็งสูงมาก ๆ ดังนั้นในการใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่แข็งมาก ๆ (VHN ประมาณ 1500) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดเท่านั้น โดยมีตั้งแต่ 1 - 120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่ทดสอบ ซึ่งทำให้วิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่า Brinell คือ ไม่ต้องคำนึงถึงอัตราส่วน P/D^2 และข้อจำกัดในด้านความหนาของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากหัวกดเพชรมีขนาดเล็กมาก

$$HV = \frac{1.85P}{d^2} \quad (2.1)$$

โดยที่ HV คือ ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)

P คือ แรงกด (kgf)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)



รูปที่ 2.15 ลักษณะรอยกดจากหัวเพชรของ Vickers Hardness Test

ข้อควรระวังสำหรับการวัดความแข็งด้วยวิธีนี้ได้แก่

1. การเลือกใช้น้ำหนักกดมีผลต่อความแข็งด้วย คือ ถ้าเลือกน้ำหนักน้อยเกินไป จะได้ค่าความแข็งที่ผิด แต่ถ้าชิ้นงานนิ่มและใช้น้ำหนักกดมากเกินไป อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหัวกดเพชรตอนคลายหัวกดได้
2. ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องไม่มี Oxide Scale หรือสิ่งแปลกปลอม การเตรียมผิวของชิ้นทดสอบต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก และหลีกเลี่ยงกรรมวิธีร้อน (Heating) หรือกรรมวิธีเย็น (Cold Working)
3. ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้กับตำแหน่งเดิม โดยควรเว้นระยะห่างไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 เท่าของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งตามแนวแกน x และ y

4. ความหนาของชั้นงานทดสอบควรมากกว่าอย่างน้อย 1.5 เท่าของเส้นทแยงมุมของรอยกด และหลังจากการทดสอบวัดความแข็ง ไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ให้เห็นทางด้านหลัง (อีกด้านหนึ่ง) ของชั้นงานทดสอบ

5. การอ่านค่าความยาวเส้นทแยงมุม จะขึ้นกับสายตาของแต่ละคน ดังนั้นควรให้คนใดคนหนึ่งเป็นผู้อ่านค่า วิธีทดสอบนี้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานสำหรับภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อจำกัดที่ทดสอบได้ช้า ต้องมีเตรียมผิวที่ดี เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยกดที่แน่นอน และมีโอกาสผิดพลาดในการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางได้



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในอุตสาหกรรมนิยมใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นทองแดงและกราไฟท์ ซึ่งทองแดงที่นิยมใช้จะเป็นหน้าตัดวงกลม ส่วนกราไฟท์ก็จะนำมาแกะให้เป็นรูปร่างที่ต้องการก่อนแล้วนำไปใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรด การทดลองครั้งนี้จะใช้ขั้วอิเล็กโทรด 2 ชนิด เป็นหน้าตัดวงกลม และทำการตัดชิ้นงานเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการผ่าชิ้นงาน หล่อชิ้นงาน ชัดชิ้นงาน และทำการเก็บค่าความแข็งของชิ้นงาน

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้นำเหล็กแม่พิมพ์ DC53 มาทดลองเพราะการขึ้นรูปด้วยวิธีทางกลแบบธรรมดาทำได้ยาก เนื่องจากเหล็ก DC53 มีคุณสมบัติมีความแข็งสูงจึงนิยมขึ้นรูปกรรมวิธีอิตีเอ็ม และใช้ อิเล็กโทรด 2 ชนิด คือ ทองแดง และกราไฟท์

3.1.1 อิเล็กโทรด

อิเล็กโทรดมีหลายขนาดและหลายประเภท แต่ในการทดลองนี้จะใช้เป็นรูปแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยใช้ 2 ชนิดด้วยกัน

1. ทองแดง มีส่วนผสมทางเคมี Copper = Bal Cr = 0.70 - 0.96% Zr = 0.31 - 0.42% และ ความแข็ง 78 - 84 HRB
2. กราไฟท์

3.1.2 ชิ้นงานทดลอง

เหล็กแม่พิมพ์ DC53 ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตร ชิ้นงานทดสอบมีความยาว 3 ขนาดคือ 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตรเนื่องจากได้ทำการทดสอบหาขนาดชิ้นงานแล้วนำมาทำการตัดด้วยเครื่องอิตีเอ็ม โดยเหล็กแม่พิมพ์ DC 53 มีส่วนผสมต่างๆดังนี้ Fe = Bal C = 0.98% Cr = 8.16% Mo = 1.94%

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอิตีเอ็ม

เป็นเครื่องยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดของโต๊ะเซอร์amik 600×400 มิลลิเมตร สามารถจับยึดอิเล็กโทรดหนัก 50 กิโลกรัม รับน้ำหนักของชิ้นงานได้สูงสุด 550 กิโลกรัม ช่วงยึดหยุ่นของชุดหัวจับจากล่างถึง

บนสุด 212 มิลลิเมตร ถึง 462 มิลลิเมตร น้ำหนักของชุดเครื่องมือ 3900 กิโลกรัม ความดันอากาศ 0.65 เมกะปาสคาล ความยาวการเคลื่อนที่ของแกน X = 350 มิลลิเมตร Y = 250 มิลลิเมตร Z = 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องอิตีเอ็ม

3.2.3 เครื่องตัดโลหะ

เป็นเครื่องตัด โลหะที่ใช้สารหล่อเย็นในการควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานที่ลดลง โดยสารหล่อเย็นจะฉีดที่ไม้ตัดชิ้นงานและตัวชิ้นงานทำให้อุณหภูมิระหว่างการตัด ไม่สูงมากนัก เครื่องตัดที่ใช้เป็นเครื่องยี่ห้อ METKON SERVOCOPPERT – M250



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดโลหะ

3.2.4 เครื่องขัด

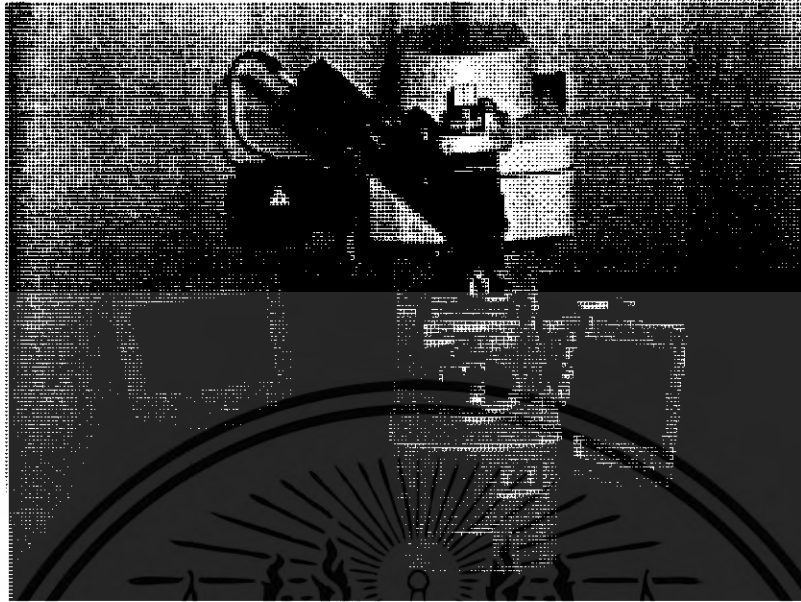
เครื่องขัดผิวโลหะให้ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบมีความเรียบและได้ระนาบสม่ำเสมอ จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวกดชิ้นงานทดสอบและจานหมุน หัวกดจะใช้แรงดันลมเป็นตัวกดชิ้นงานให้ติดกับกระดาษทรายหรือผ้าสักหลาดและมีแผ่นจานโลหะเป็นรูปวงกลมแบน โดยแผ่นจานจะมีเข้าสำหรับใส่ชิ้นงานที่ต้องการขัดลงไป ใส่ชิ้นงานได้ครั้งละ 6 ชิ้น ชื่อ Digimat+ Specimen Mover ส่วนจานหมุน มี 2 จานมีลักษณะเป็นแผ่นจานแบนหน้าตัดวงกลม สำหรับใส่กระดาษทรายหรือผ้าสักหลาด ชื่อ Digiset – 2V Grinder – Polisher



รูปที่ 3.3 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3.2.5 เครื่องวัดความแข็งชิ้นงาน

เป็นเครื่องวัดความแข็งของชิ้นงานชื่อ Mitutoyo Model HN113 มีความละเอียดของสเกลรับระยะชิ้นงานในแนวแกน X และ Y ถึง 1 ไมโครเมตร โดยตัวเครื่องจะมีที่ยึดชิ้นงาน มีหัวกดเพชรลักษณะเป็นปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสกดให้ชิ้นงานเป็นรอย และมีถ้อยสำหรับวัดเส้นทแยงมุมของรอยกดและคำนวณค่าความแข็งออกมา



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความแข็งแรงในงาน

3.3 หลักการออกแบบการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องอีดีเอ็มเป็นตัวสปาร์กนั้น จะต้องเป็นตามขั้นตอนต่างๆที่ได้วางแผนไว้ โดยที่จะทำการทดลองตัวแปรภายใน 2 ตัวคือ ON กับ IP เป็น 3 ระดับ และตัวแปรภายนอกคือ อิเล็กโทรด 2 ชนิด และเพื่อความถูกต้องได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จึงมีจำนวนครั้งในการทดลอง 54 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับของพารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	Level 1	Level 2	Level 3
ON Electric Discharge Time (μsec)	100	500	900
IP Electric Discharge Peak Current (A)	15	45	75
Electrode	Copper		Graphite

ตารางที่ 3.2 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง

ลำดับการทดลอง	ชิ้นงานตัวอย่าง	ON (μsec)	IP (A)	Electrode
1	14	900	15	Graphite
2	8	500	15	Graphite
3	9	500	45	Copper
4	28	500	45	Graphite
5	6	100	75	Graphite
6	40	100	45	Graphite
7	27	500	45	Copper
8	48	500	75	Graphite
9	26	500	15	Graphite
10	49	900	15	Copper
11	25	500	15	Copper
12	12	900	75	Graphite
13	43	500	15	Copper
14	18	500	75	Graphite
15	39	100	45	Copper
16	23	100	75	Copper
17	37	100	15	Copper
18	54	900	75	Graphite
19	3	100	45	Copper
20	41	100	75	Copper
21	29	500	75	Copper
22	31	900	15	Copper
23	34	900	45	Graphite
24	38	100	15	Graphite
25	44	500	15	Graphite
26	16	900	45	Graphite
27	33	900	45	Copper

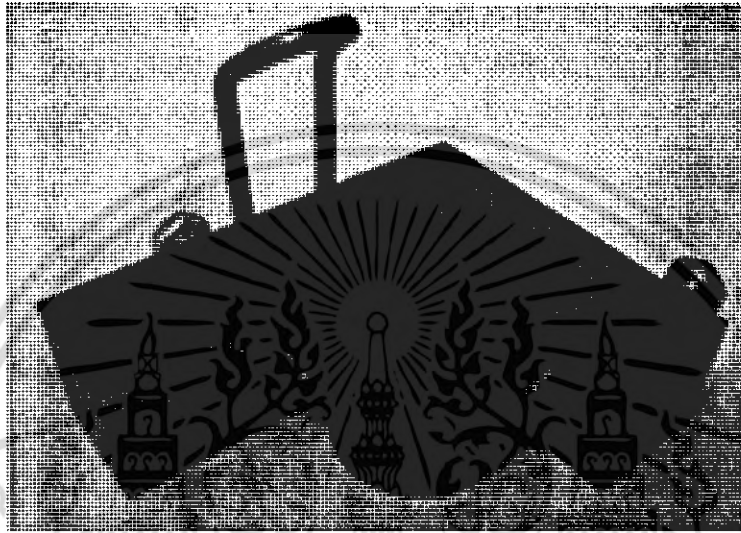
ตารางที่ 3.2 การออกแบบและลำดับการทดลองหาพารามิเตอร์ตอบสนอง (ต่อ)

ลำดับการทดลอง	ชิ้นงานตัวอย่าง	ON (μsec)	IP (A)	Electrode
28	35	900	75	Copper
29	21	100	45	Copper
30	45	500	45	Copper
31	17	900	75	Copper
32	53	900	75	Copper
33	19	100	15	Copper
34	42	100	75	Graphite
35	10	500	45	Graphite
36	15	900	45	Copper
37	20	100	15	Graphite
38	50	900	15	Graphite
39	5	100	75	Copper
40	30	500	75	Graphite
41	24	100	75	Graphite
42	47	500	75	Copper
43	4	100	45	Graphite
44	1	100	15	Copper
45	36	900	75	Graphite
46	52	900	45	Graphite
47	7	500	15	Copper
48	46	500	45	Graphite
49	2	100	15	Graphite
50	51	900	45	Copper
51	13	900	15	Copper
52	32	900	15	Graphite
53	11	500	75	Copper
54	22	100	45	Graphite

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

1. จัดการเตรียมชิ้นงานทดสอบคือเหล็กกล้าที่ใช้ทำแม่พิมพ์ DC53 โดยการตัดชิ้นงานทดสอบให้มีความหนา 3 ขนาด คือ 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 3 ชิ้นมีขนาด 26 มิลลิเมตร แล้วนำชิ้นงานที่ตัดเสร็จแล้วนำไปกลึงปาดหน้า ทั้งสองด้านให้เรียบ



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานก่อนการทดลอง

2. อิเล็กโทรด นำแท่งทองแดงและแท่งกราไฟท์รูปทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ทำการปาดหน้าทุกครั้งที่ทำกรทดลอง



รูปที่ 3.6 อิเล็กโทรดที่ใช้ทดลอง

3.4.2 ขั้นตอนระหว่างการทดลอง

1. ทำการจับยึดอิเล็กโทรดเข้ากับเพลทหัวจับของเครื่องอิตีเอ็ม ชนให้แน่นพอควร
2. จับยึดชิ้นงานทดสอบเข้ากับปากกาจับงานในอ่างที่ใช้บรรจุสาร ไดอิเล็กทริกและจัดตำแหน่งปากหัวฉีดให้เข้าที่
3. ทำการตั้งศูนย์ปลายอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน
4. ปลดปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกให้ไหลเข้าสู่อ่างบรรจุ
5. ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามแผนการทดลองที่ได้วางแผนไว้และเดินเครื่องอิตีเอ็ม
6. ดำเนินการทดลองให้เครื่องอิตีเอ็มทำการสปาร์กชิ้นงานเป็นเวลา 30 นาที
7. เมื่อครบเวลาจึงปล่อยสาร ไดอิเล็กทริกลงสู่ถังเก็บด้านล่างเครื่อง
8. ถอดอิเล็กโทรดออกจากเพลทหัวจับและนำชิ้นงานทดสอบออกจากเครื่องอิตีเอ็ม
9. ทำความสะอาดชิ้นงานและนำชิ้นงานทดสอบและอิเล็กโทรดชุดใหม่มาติดตั้งและทำการทดลองต่อ

3.4.3 ขั้นตอนหลังการทดลอง

1. นำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกรรมวิธีอิตีเอ็มมาเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทำการผ่าชิ้นงานออกเป็นสองส่วน
2. ชิ้นงานทดสอบที่ผ่าเสร็จแล้วห่อด้วยเรซินในท่อพลาสติกจนแข็งและถอดออกจากท่อพลาสติก
3. นำชิ้นงานที่ห่อเรซินมาทำการปาดหน้าให้เรียบให้ได้ระนาบ
4. นำไปขัดกระดาษทรายเบอร์ 320 400 600 800 1000 ตามลำดับและขัดด้วยผ้าสักหลาดแล้วหยดด้วยผงอลูมินาที่เจือจางกับน้ำโดยใช้ผงขนาดเบอร์ 1 μm , 0.5 μm , และ 0.03 μm .
5. เช็ดให้แห้งทาน้ำมันป้องกันสนิม
6. นำชิ้นงานทดสอบมาทำการกดหาค่าความแข็งด้วยวิธี Vickers Hardness Test
7. ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบชิ้นต่อไป
8. ค่าที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความลึกรอยกดจากขอบการสปาร์ก
9. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
10. สรุปผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยได้ใช้ปัจจัยในการทดลอง 3 พารามิเตอร์มีดังนี้ ON IP และชนิดของอิเล็กโทรด โดยกำหนดให้ OFF มีค่าคงที่เท่ากับ 100 μsec และ Q มีค่าคงที่เท่ากับ 0.1 psi

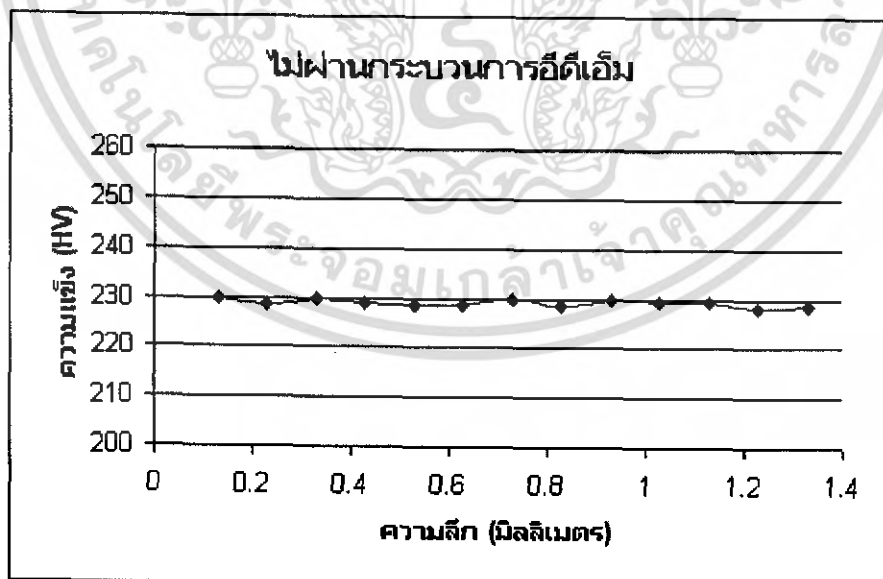
การทดลองเพื่อหาขนาดวัสดุในการทดลองนี้ จะทำให้การประมาณขนาดวัสดุใกล้เคียงกับความเป็นจริงทำให้ประหยัดวัสดุในการทดลองโดยมีขั้นตอนดังนี้คือ เลือกพารามิเตอร์ที่ต่ำสุดและสูงสุด มาทำการสปาร์ก แล้วทำการวัดค่าความแข็งเพื่อหาระยะความลึกในการเปลี่ยนแปลงความแข็งของชิ้นงาน โดยที่ค่าพารามิเตอร์สูงสุด มี IP ที่ 75 ON ที่ 900 และที่ค่าพารามิเตอร์ต่ำสุดมี IP ที่ 15 ON ที่ 100 ในการทดลองครั้งนี้ความลึกในการสปาร์กที่พารามิเตอร์ต่ำสุดลึก 0.2 มิลลิเมตร และค่าความลึกที่พารามิเตอร์สูงสุดลึก 15 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่ำสุดและสูงสุดและไม่ผ่าน EDM

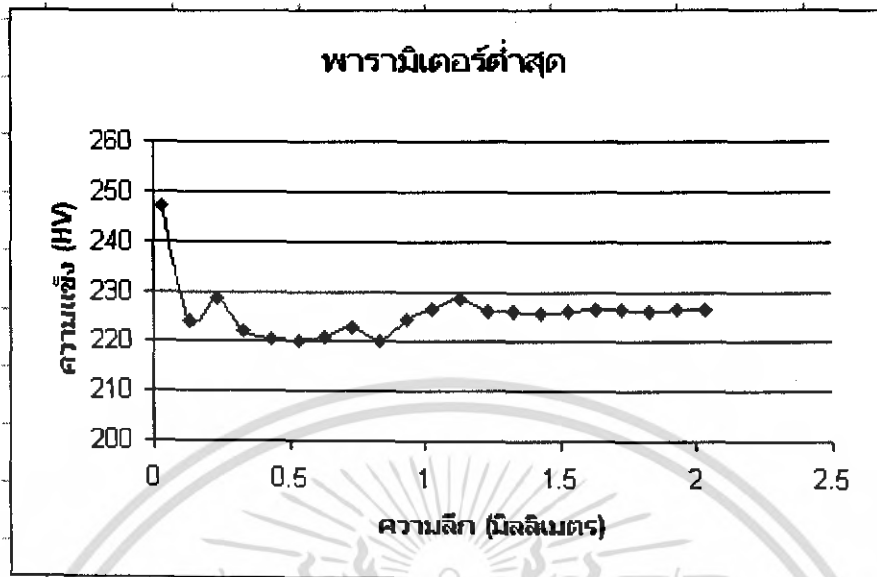
ความลึก(มม.)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.		
	ไม่ผ่านการEDM	พารามิเตอร์ต่ำสุด	พารามิเตอร์สูงสุด
0.03	262.7	247.3	311.3
0.13	229.6	224.1	219.8
0.23	228.6	228.7	206.8
0.33	229.8	222.3	207.4
0.43	229.1	220.7	213.0
0.53	228.4	220.2	206.2
0.63	228.4	221.1	207.5
0.73	229.7	223.0	209.4
0.83	228.6	220.3	207.7
0.93	229.8	224.6	208.2
1.03	229.5	226.6	215.9
1.13	229.4	228.4	211.7
1.23	228.1	226.0	208.1
1.33	228.6	226.2	210.2
1.43		225.9	212.6
1.53		226.1	212.3

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่ำสุดและสูงสุดและไม่ผ่าน EDM (ต่อ)

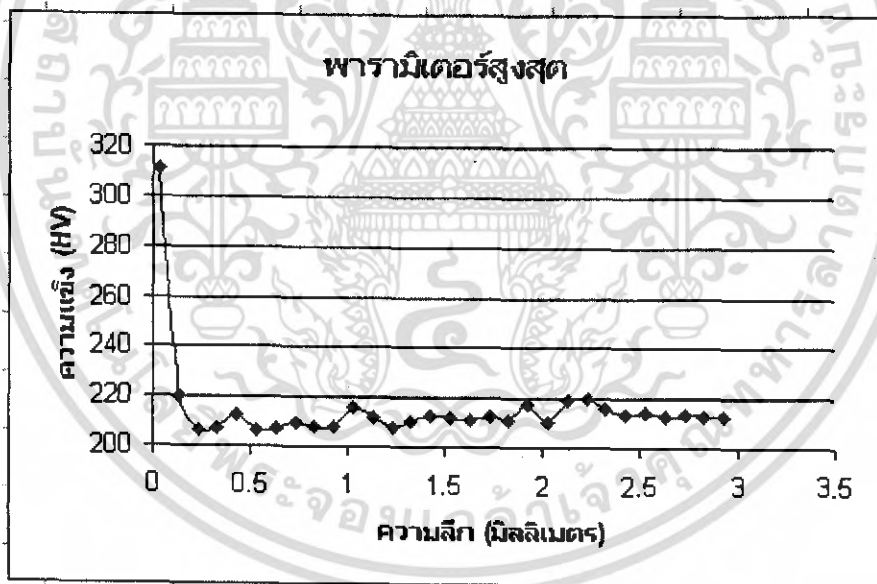
ความลึก(มม.)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.		
	ไม่ผ่านการEDM	พารามิเตอร์ต่ำสุด	พารามิเตอร์สูงสุด
1.63		226.5	211.3
1.73		226.4	212.6
1.83		226.1	211.4
1.93		226.5	217.5
2.03		226.4	210.1
2.13			219.0
2.23			220.1
2.33			216.4
2.43			213.7
2.53			214.3
2.63			213.0
2.73			213.7
2.83			212.6
2.93			213.2



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ผ่าน EDM



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความแข็งที่พารามิเตอร์ต่ำสุด



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งที่พารามิเตอร์สูงสุด

จากผลการทดลองหาขนาดความหนาชิ้นงานที่ทำการทดสอบโดยทำการวิเคราะห์จากรูปที่ได้ทำให้เลือกใช้ความหนาชิ้นงาน 3 ขนาด คือ 10 มิลลิเมตร 15 มิลลิเมตร และ 20 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของหินงานจากการทดลอง

ความลึก (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.										
	ลำดับการทดลอง										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.03	273.3	264	289.4	258.2	219.4	244.9	268.9	231.2	258.1	298.5	242.1
0.13	212.7	227.3	240.7	227.6	204.3	221.6	224.1	212.7	240.6	295.6	219.2
0.23	214	223.1	258.4	220.9	217.4	228.2	228.7	210	238.6	259	214.9
0.33	214.5	232.9	246.3	233.3	216.2	211.4	222.3	206.6	243.5	255.9	212.1
0.43	221.1	233.6	244.9	226.7	217.3	206.4	220.7	210.3	242.7	257.5	214
0.53	217.1	225.5	242.2	220.9	217.8	203.7	220.2	205	246.6	268.1	214.1
0.63	216.6	234.6	237.1	226.7	210.9	204.8	221.1	209.7	245.5	251.2	212.4
0.73	223.9	239.6	231.8	219.3	209.1	206.8	215	208.4	240.1	252.3	211.2
0.83	217.8	242.5	220.8	222	216.3	206.6	216.3	206.5	246.8	264.9	215.8
0.93	216.9	233.4	226.5	224.4	213.2	205.8	216.6	203.4	249.6	254.5	217.9
1.03	222.3	239.5	226	219.1	211.3	202.6	226.6	203.9	243.7	260.2	215.2
1.13	220.4	242.2	220.5	216.1	210.7	202.7	224.1	205.1	249.8	268.2	215.9
1.23	220.6	242.1	221.7	219.6	214.7	210.1	228	206.8	251.6	263.4	216.6
1.33	217.2	244.4	228.3	217.2	213	205.2	223.5	206.4	251.5	256.7	215.7
1.43	217.1	242.6	220.7	218.8	212.3	205.3	219.7	209.4	248.3	259.3	213.2
1.53	217.6	242.2	217.4	222.7	214.6	201.6	221.4	211.7	248.6	261.4	213.4
1.63	216.8	242.8	220.3	221.4	217.1	203	230.6	210.6	248.9	264.4	213.9
1.73	217.3	242.5	211.2	221.1	218.8	202.5	231.4	213.2	248.4	264.5	213.2
1.83	217.2		212.5	220.8	218.2	202.7	230.4	211.6	248.7	264.6	213.9
1.93			216	221.1	217.3	203.7	226.1	213.9		264.1	
2.03			214		218.2	203.8	226.2	210.4		260.7	
2.13			212.7		218.8	203.4	226	212.7		264.2	
2.23			213.4		218.4	203.6	228.4	210.6		263.9	
2.33			213.9				225.9	211.9		264.4	
2.43			213.7				226.1	210.7			
2.53			213.2				226.5	210.3			
2.63			213.9				226.4	210.5			
2.73								210.7			
2.83								210.3			
2.93											

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานจากการทดลอง (ต่อ)

ความลึก (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.										
	ลำดับการทดลอง										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0.03	221.2	231.3	269.4	232.5	245.9	247.3	242.9	248	240.8	239.4	284.4
0.13	221.7	221.3	246.1	206.9	231	224.1	222.5	220.1	244.8	209.3	236.7
0.23	212	217.5	240.5	213.9	221.1	228.7	228.1	217.3	218.2	206.3	245.1
0.33	206.6	217.9	244.9	213.1	228.5	222.3	216.3	219.1	218.4	205.8	241.5
0.43	210.3	215.8	246.3	221.7	222.4	220.7	226.3	219.3	219.5	200.2	246
0.53	205	210.5	249.1	214.6	218.1	220.2	223.4	218.7	217.1	201.4	240.7
0.63	213.9	219.9	244.7	211.8	220.2	221.1	220.4	223	222.9	198.8	237.7
0.73	212.3	219.9	246.8	215	213.7	223	226.3	223.1	221.4	200.4	249.9
0.83	209.4	219.3	243.6	212.5	211.3	220.3	224.1	228.4	226.3	205.9	247
0.93	204.6	220.5	241.2	215.3	203.3	224.6	220.5	233.7	220.3	201.7	249.1
1.03	206.2	218.6	245.8	221.5	205.2	226.6	220.9	230.9	221.8	200.7	249.1
1.13	208.4	215.6	249.6	213.6	212.8	228.4	225.8	225.6	216.7	207.1	237.3
1.23	209.3	214.6	246.2	222.7	205	226	228.4	229	214.8	201.6	243.1
1.33	206.4	211.8	247.1	213.4	207.4	226.2	226.7	226.6	213.5	205.2	242.2
1.43	211.5	211.5	242.8	211	206.3	225.9	225.3	229.6	219.3	206.4	240
1.53	210.3	211.2	245.9	215.5	209.8	226.1	223.8	234.5	221.5	204.1	235.8
1.63	215.6	210.5	245.2	220.1	208.5	226.5	222.4	230.3	220.4	199.7	235.9
1.73	212.4	211.3	248.4	212.7	207.4	226.4	225.3	225.8	213.5	206.8	236.5
1.83	211	211.6	244.7	213.1	204.8		219.6	225.8	217.1	204.3	238.1
1.93	206		248.3	212.6	210.7		224.3	226	212.7	203.5	236.9
2.03	210.9		245.7	211.5	205.1		218.6	225.7	215.3	200.3	235.9
2.13	208.1		240.4	212.4	206.2		225.8	225.4	213.3	200.5	236.2
2.23	207.5		244.3	212.8	206.9		220.1	225	207.3	202.3	236.8
2.33	210.4		247.9	212.7	206.7		224.3	225.7	207.5	200.1	
2.43	211.7		247.8		207.7		223.2		207.9	200.8	
2.53	210.6		247.6		206.2		223.1		207.1	200.7	
2.63	211.9		247.5				223.8		207.4		
2.73	210.7		247.6				223.7		206.2		
2.83	210.3		247.6				223.8				
2.93	210.5		247.9								
3.03	210.7										

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานจากการทดสอบ (ต่อ)

ความลึก (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.										
	ลำดับการทดสอบ										
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
0.03	246.8	221.8	245	291.8	278.8	286.2	255.9	250.2	311.3	323.5	259.9
0.13	241.2	205.2	239.8	240.9	220.4	233.4	217.5	217.7	219.8	226.7	237.2
0.23	217.6	211.6	222.7	224.8	207.8	215.7	226.1	203.2	206.8	223.9	242.6
0.33	221.3	204	236.5	237.7	211.6	222.3	241.1	204.1	207.4	201.7	238.1
0.43	211.4	208.7	237.1	245.2	213.4	217.8	238.4	206.9	213	206.8	239.9
0.53	217.5	210.2	236	234.3	210.1	221.8	233.9	195.3	206.2	223.8	237.7
0.63	211	208.1	225.4	231.3	207.3	217	235	212	207.5	223.7	245.4
0.73	218.6	202.2	234.3	237.3	216.8	215.7	230.7	202.4	209.4	214.9	243.9
0.83	211.1	208.8	228.7	239.4	208.7	218.8	233.2	207.4	207.7	232.8	248.3
0.93	217.6	202.3	230.9	233.3	212.8	220.9	238.1	200.8	208.2	228.8	247.7
1.03	211.8	202.4	237.1	233	209.9	224.8	241	206.2	215.9	226.8	244.8
1.13	212.5	203	226.2	232.5	213.8	216.6	236.3	205.9	211.7	230.8	243.9
1.23	212	202.5	224.7	234.9	205.8	217.8	234.2	213.5	208.1	223.9	240.3
1.33	216	201.5	226.8	228.1	204.8	215.5	234.7	206.4	210.2	231.8	244.5
1.43	218.4	202.6	226.4	240	199.1	216.4	239.3	206.7	212.6	234.7	245.3
1.53	214.5	202.2	226.8	229.9	203.4	213.2	235.5	207	212.3	229.5	244.6
1.63	209.6	202.9	225.2	232.9	207.1	211.3	232.6	204.1	211.3	222.5	244.1
1.73	212.9	203.2	225.5	239.2	208.1	214.4	232	200.9	212.6	232.1	245.8
1.83	212.4			239.8	204.9	217.6	232.8	206.4	211.4	233.2	245.1
1.93	212.9			238.8	207.1	218.4	232.9	209.7	217.5	231.6	245.9
2.03	212			237.9	207.9	212.7	232.4	201	210.1	229.7	
2.13	211.9			237.2	202.5	214.9	232.6	202.8	219	226.7	
2.23				237.9	201.5	211.6	232.8	202.3	220.1	227.8	
2.33					201.2	216.4	232.6	203.8	216.4	231.8	
2.43					202.6	211.3		202.5	213.7	234.7	
2.53					200	218.1		202.4	214.3	240	
2.63					202.7	215.2		202.1	213	232.5	
2.73					202.7	215		202.9	213.7	231.9	
2.83						215.5			212.6	231.5	
2.93						215.3			213.2	232.7	
3.03						215.5				231.2	
3.01										232	

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของหินงอกจากการทดลอง (ต่อ)

ความลึก (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.										
	ลำดับการทดลอง										
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
0.03	247.9	230.1	263.5	240.9	264	234.7	242.9	214.7	266.9	235.4	240
0.13	231.7	217.7	242.9	226.5	205.8	207.8	222.5	209.2	240.7	210.6	218.4
0.23	231.2	202.1	234	217.9	208.7	212.5	228.1	207.7	232.5	208.3	220.4
0.33	227.7	203.1	237.3	218.2	204.4	203.5	210.3	213	231.7	208.4	226.3
0.43	222.9	198.8	243.7	226.5	205.1	205.2	226.3	213.5	229.8	200.8	220.6
0.53	228.3	205	251.2	220.5	200.9	205.9	223.4	213.8	228.2	207.1	223.4
0.63	238.2	203.1	240.1	225.5	206.7	198.4	224.3	202.7	232.4	201.2	223.4
0.73	231.3	206.9	242.7	216.4	204	204.3	218.6	210.2	230.9	202.6	222
0.83	232.6	200.5	240.5	216.9	202.1	202.8	225.8	206.6	228.8	202.1	225.2
0.93	228	203.7	245.7	221.9	200.3	203.1	220.1	206.2	228.9	208.1	224.8
1.03	226.4	202.1	249	220.3	200.1	203.3	224.3	202.1	228.9	201.6	222.1
1.13	232.6	202.4	249.2	217.6	204.1	210.7	217.4	201.8	229.2	205.5	223
1.23	230	206.8	249.7	217.8	205.7	203.8	224.9	203.7	232.6	201.6	226.3
1.33	225.6	200.4	250.5	219.3	207.7	205.5	224.3	205.1	225.6	209.5	225.4
1.43	238.6	202.3	252.7	217.6	202.6	203.8	228.7	208.9	224.2	202.4	227
1.53	224.1	202.7	248.7	217.3	204.7	208.5	221.3	214	235.3	204.6	225.3
1.63	226	202.2	240.8	217.5	206.5	203.4	218.6	216.2	226.7	204.8	226.3
1.73	228.5	202.9	246.3	217	206.3	204.6	228.3	209	226	203.9	226.7
1.83	225	203.7	239.4		205.9	200.5	226.4	208.6	231.8	203	226.1
1.93	225.1	202.6	246.8		206.7	206.1	220.8	209.4	224.4	204.7	
2.03	225.3	202.1	246.5		206.9	206.7	225.7	208.2	224.1	204.6	
2.13	227.4		246.8			205	226.4	206.9	218.6	204	
2.23	225.5		246.5			202.5	223.2	207.5	220.4		
2.33	226.3		246.9			206.2	223.1	207.4	221.1		
2.43	226		246.4			205.9	223.8		220.9		
2.53						206.3	223.7		221.5		
2.63						206.1	223.8		221.7		
2.73						206.8			221.4		
2.83						206.6					
2.93											
3.03											

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานจากการทดลอง (ต่อ)

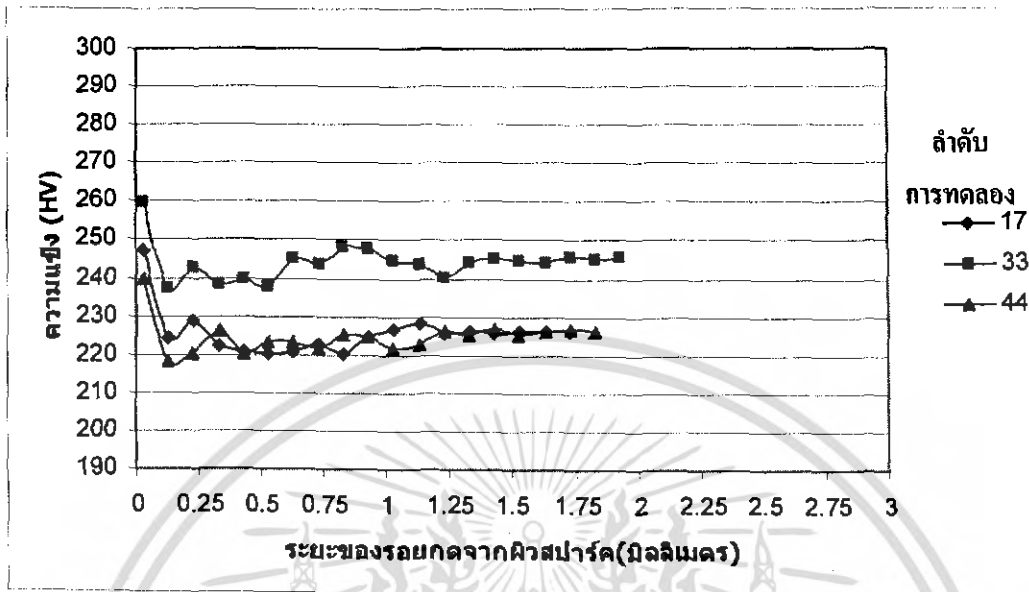
ความลึก (มิลลิเมตร)	ความแข็ง (HV) ที่น้ำหนักกด 0.2 kg.									
	ลำดับการทดลอง									
	46	47	48	49	50	51	52	53	54	54
0.03	251.1	236	236.7	232.9	266.1	253.3	286.6	254.5	228.4	259.1
0.13	225.4	220.6	236.4	210.1	223.7	233.4	238.7	259.8	203.1	246.1
0.23	237.2	212.4	205.1	224.7	210.5	232.5	227.7	254.7	212.3	245.4
0.33	222.5	218	203.4	219.3	220.2	222.4	220.2	250.3	205.1	244.9
0.43	221.6	216.3	202.4	223.3	219.5	229.5	218.2	243.6	216.5	246.3
0.53	213.2	212.7	206.2	215.9	225.5	220.4	221.8	237.8	209.2	249.1
0.63	224.5	215	206.3	218.6	214.7	227.5	221.1	228.3	209.5	248.3
0.73	215.7	221	204.1	220.4	221.1	221	218.4	225.6	205.1	245.7
0.83	216.1	219.4	210.5	217.5	219.6	220.4	222.2	217.3	210.1	240.4
0.93	213.2	214.7	205.1	210.1	223.4	216	221.6	235.6	204.7	244.3
1.03	216.7	215.2	206.5	214.6	222	226.2	223.4	214.9	207.1	243.6
1.13	211	216.2	206.3	213.5	220.3	225.5	220.5	231.5	203.1	241.2
1.23	221	218.2	212.6	213.1	219.8	219.1	228.3	220.5	210.4	245.8
1.33	213	217.5	208.5	213.8	216.9	214.7	224.4	220.1	205.2	249.6
1.43	214.3	214.1	204.3	215.4	221.6	214.4	225.7	219.2	204.7	246.2
1.53	210.4	214.8	211.1	213.5	215.1	214.2	224.1	212.2	205.5	247.1
1.63	216.7	214.5	209.1	214.3	213.6	210.7	224.9	203.3	204.7	242.8
1.73	213.1	214.6	209.5	214.5	216.3	214.6	224.1	205.3	204.4	240.5
1.83	218.6	214.2	208.7		216.4	213.3	224.9	203.1	204.1	246.4
1.93	216.1		209.6		218.7	214		208.1	204.8	245.3
2.03	215.7		208.6		219.6	214.3		206.4		241.1
2.13	215.2		210.6		219.3			202.3		245.9
2.23	215.7		208.5		219.8			207.9		245.2
2.33					219.4			205.5		248.4
2.43					219.6			204.2		244.7
2.53								204.4		247.9
2.63								205.6		247.8
2.73								205.8		247.6
2.83										247.5
2.93										247.6
3.03										247.6
3.01										247.9

จากการทดสอบความแข็งแกร่งงานที่ผ่านกรรมวิธีฮีเอ็ม ได้นำผลการทดสอบความแข็งแกร่งมาทำการสร้างกราฟ
แล้วนำมาเปรียบเทียบและได้แบ่งกลุ่มการเปรียบเทียบได้ออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

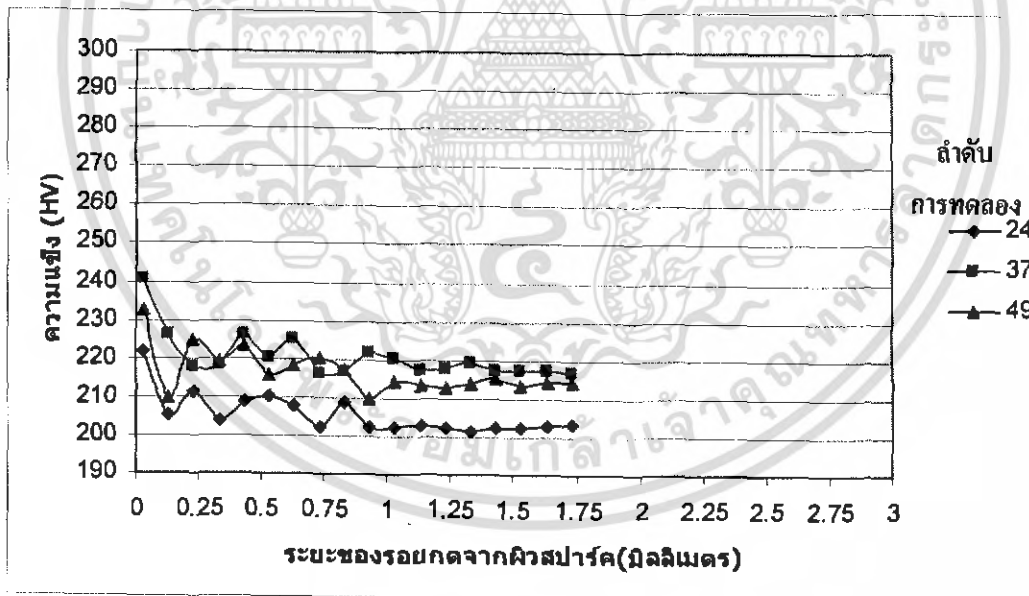
1. เปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP คงที่, อิเล็กโทรดต่างกัน
2. เปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรดทองแดง
3. เปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดทองแดง
4. เปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรดกราไฟท์
5. เปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดกราไฟท์



1. ผลจากการตัวแปรเปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP คงที่, อิเล็กโทรดต่างกัน

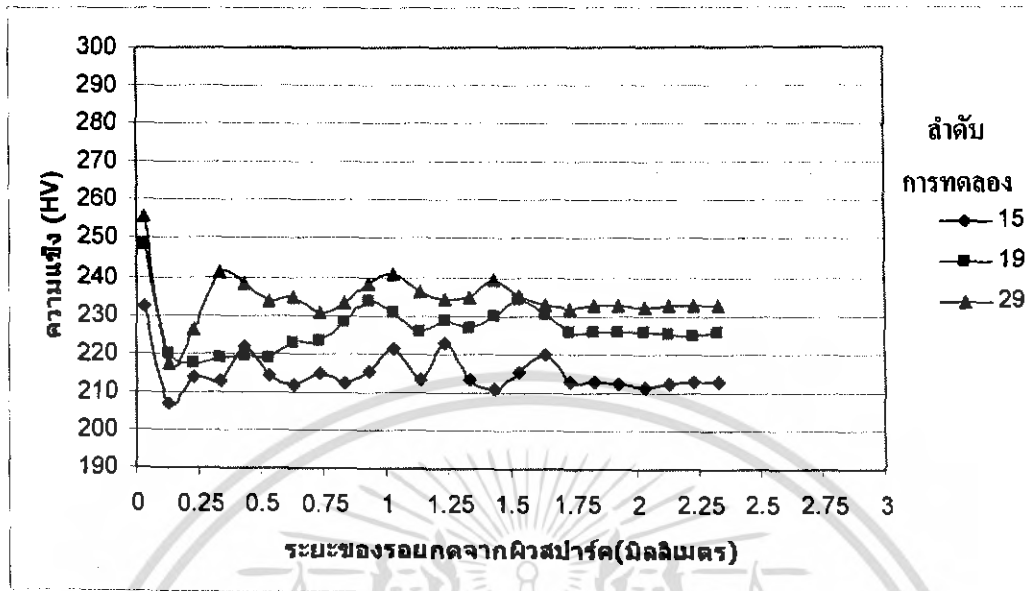


รูปที่ 4.4 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

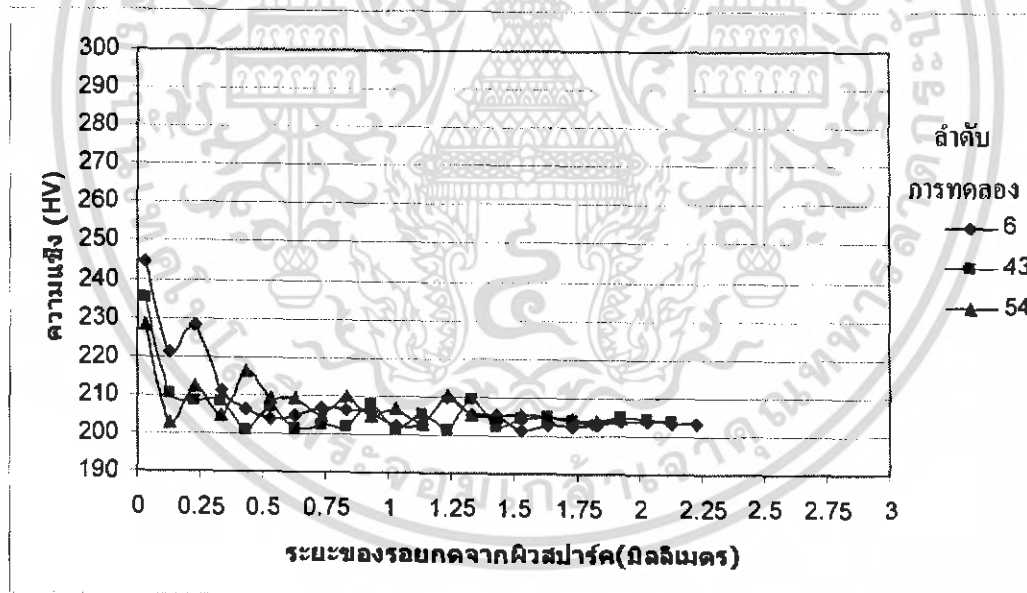


รูปที่ 4.5 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกัน ที่ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์
 อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

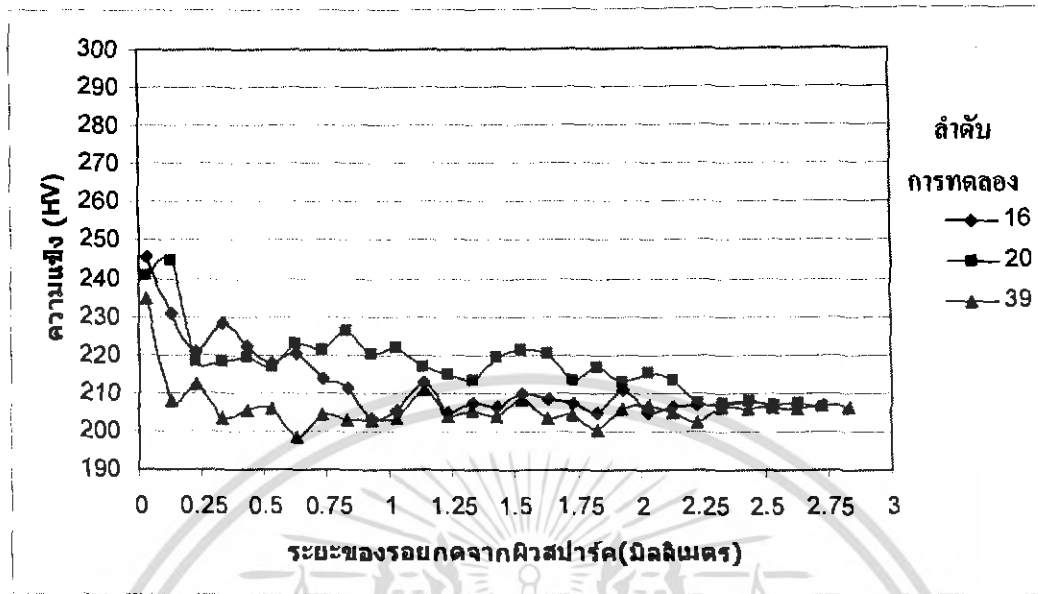


รูปที่ 4.6 แสดงความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์คที่ฟารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

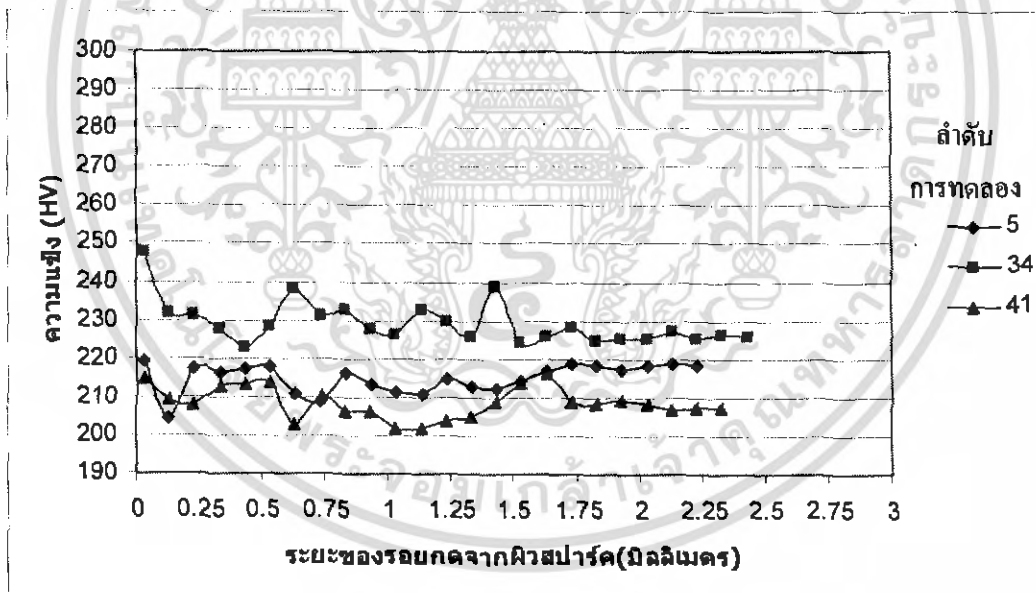


รูปที่ 4.7 แสดงความแข็งและระยะรอกคจากผิวสปาร์คที่ฟารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานและอิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งสปาร์คมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์ แต่อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์มีความแปรปรวนในเชิงลึกใกล้เคียงกัน

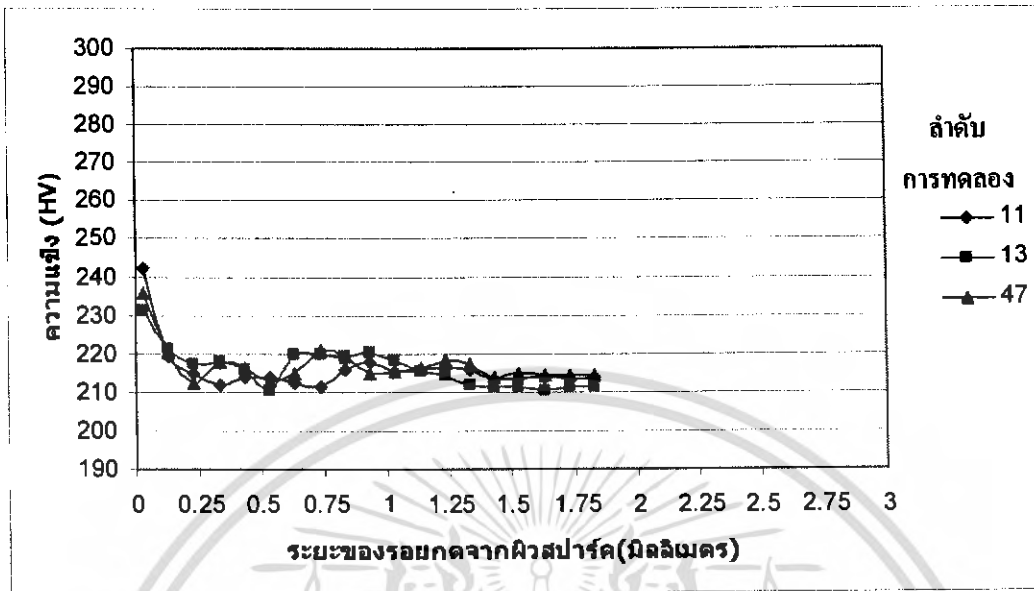


รูปที่ 4.8 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อีเล็กโทรดทองแดง

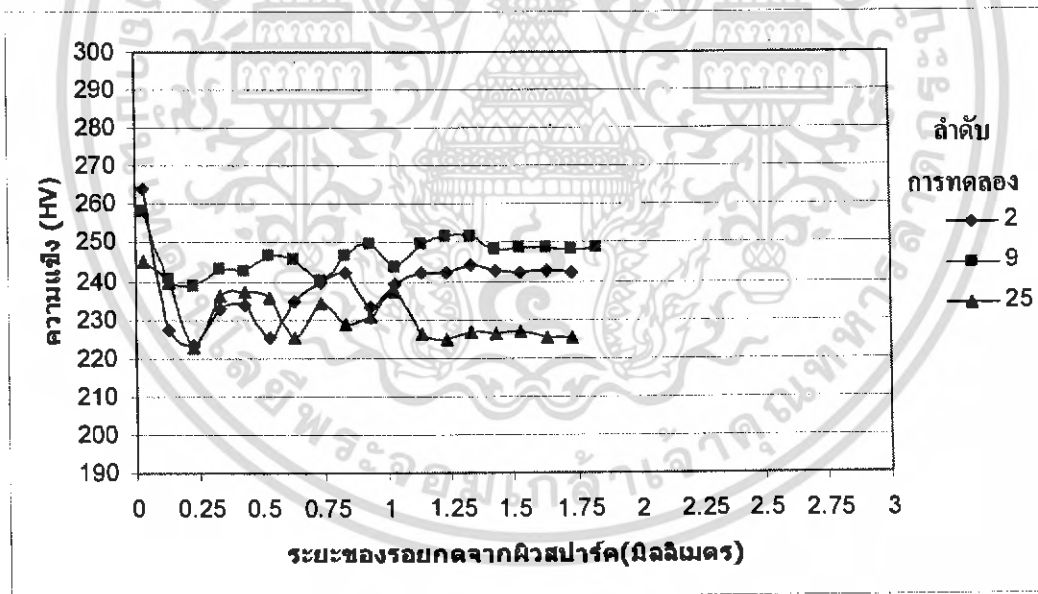


รูปที่ 4.9 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อีเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกัน ที่ ON = 100 IP = 75 อีเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์
 อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานใกล้เคียงกันแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิว
 ของชิ้นงานเกิดความความแปรปรวนในเชิงลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์

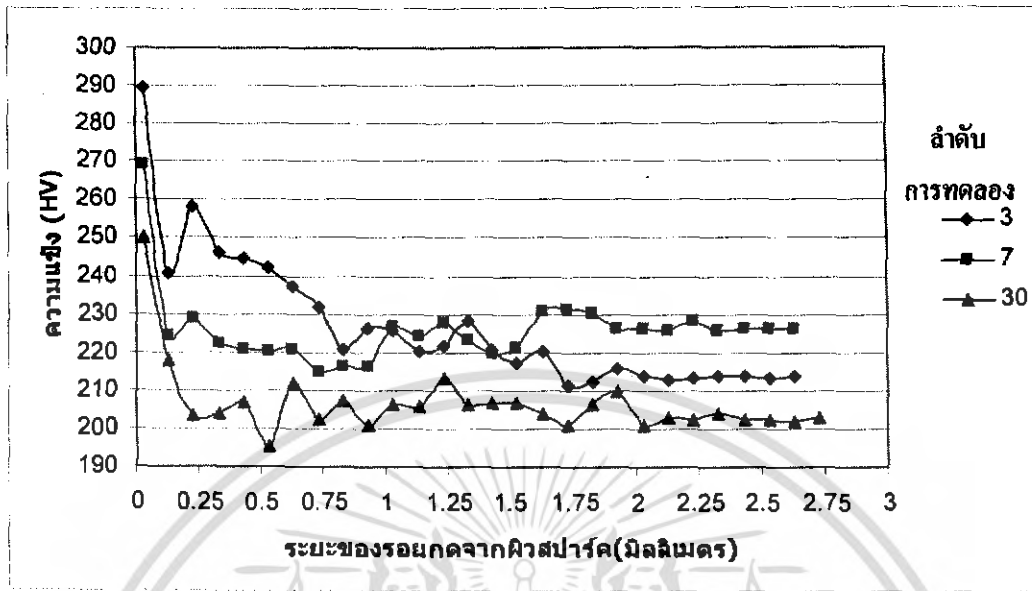


รูปที่ 4.10 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

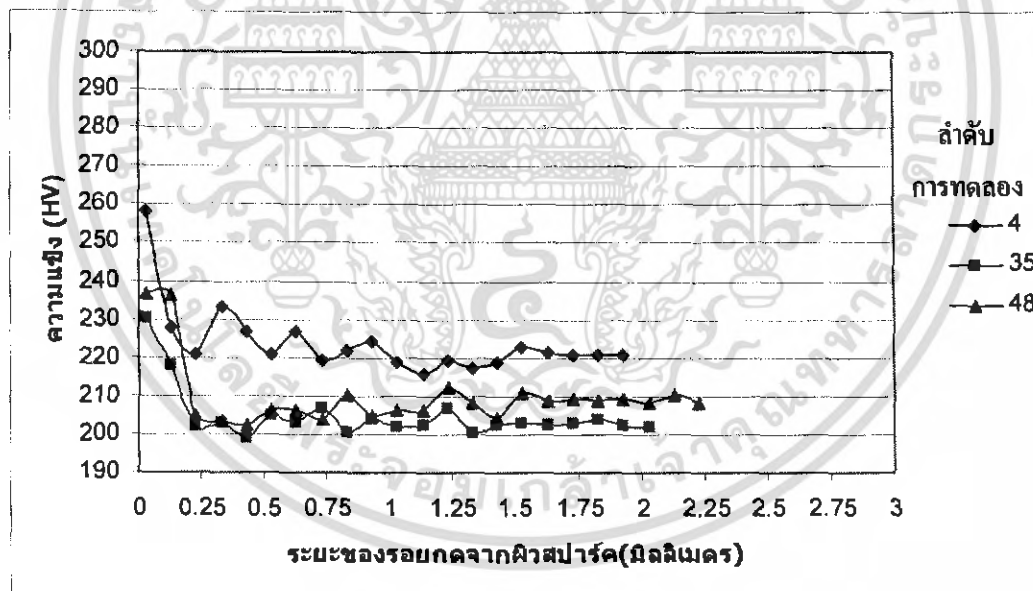


รูปที่ 4.11 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันว่า ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

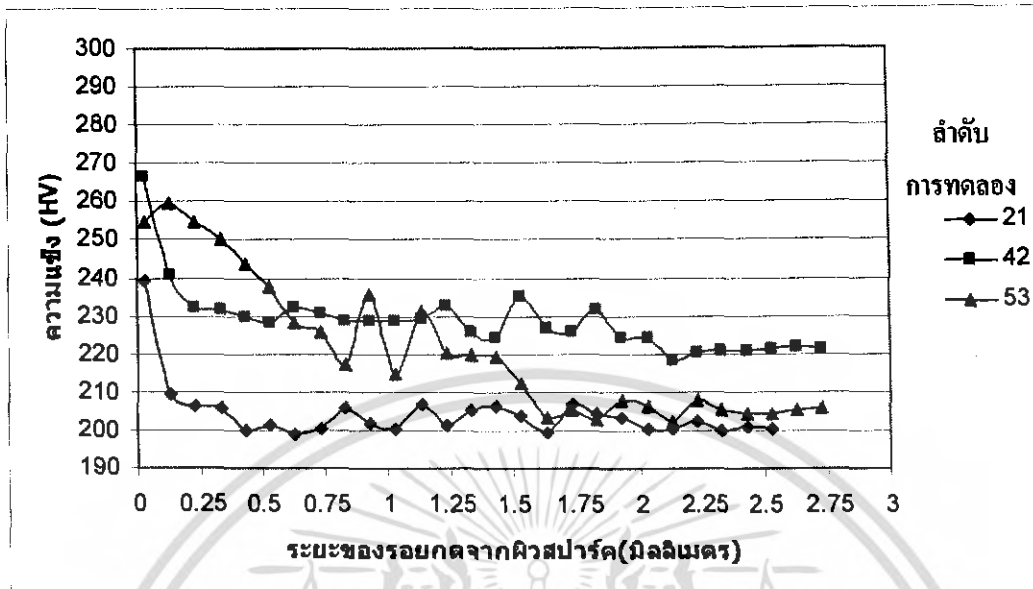


รูปที่ 4.12 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

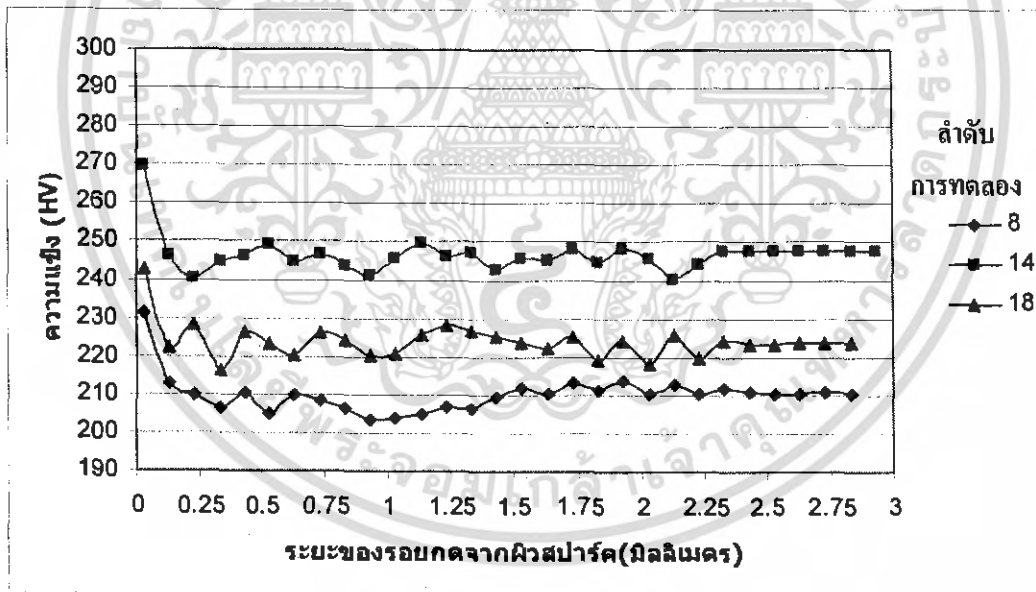


รูปที่ 4.13 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีควมแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

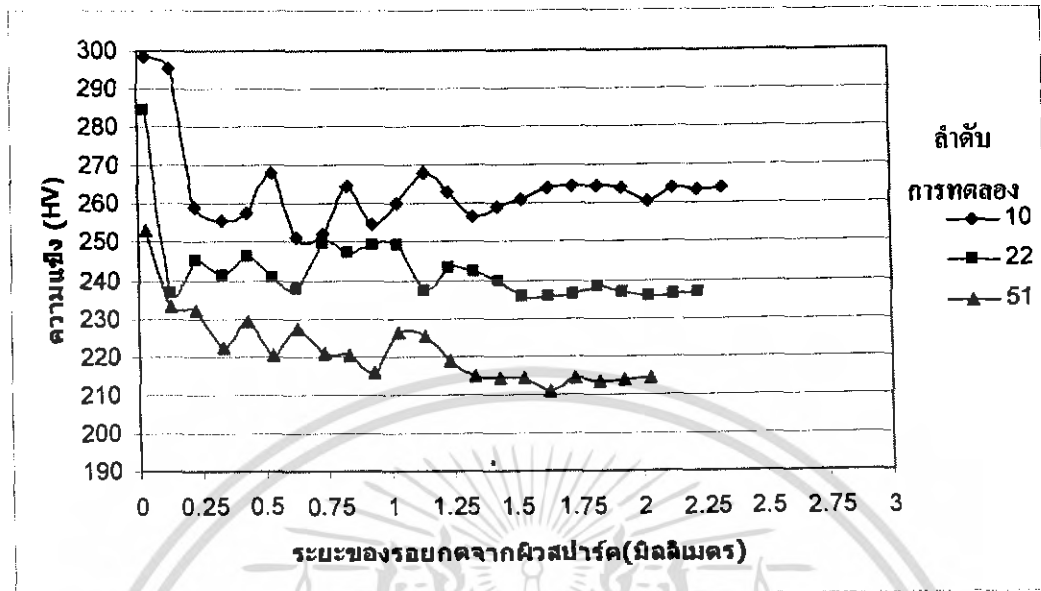


รูปที่ 4.14 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

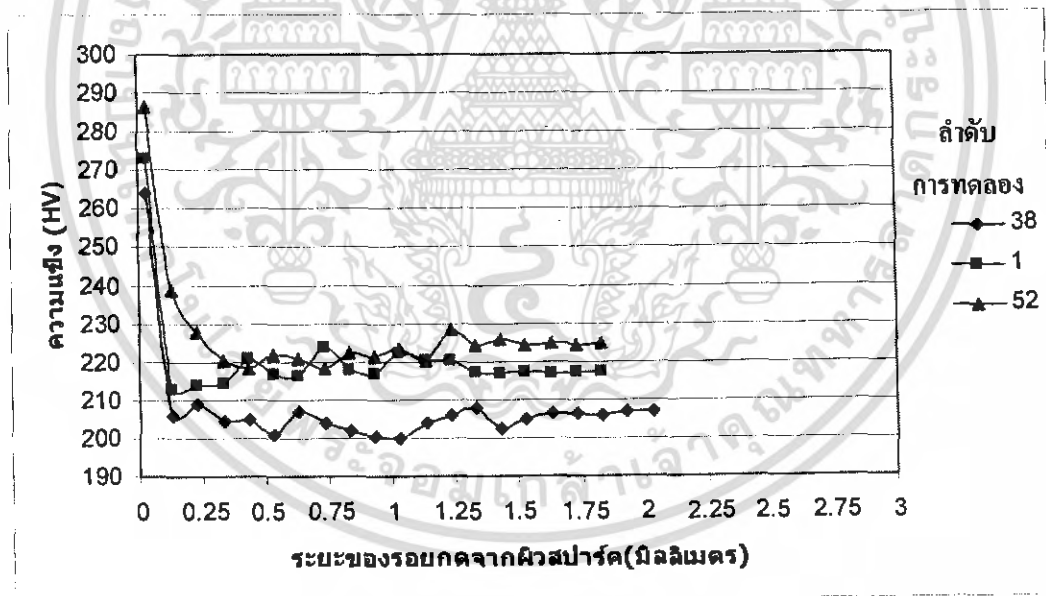


รูปที่ 4.15 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

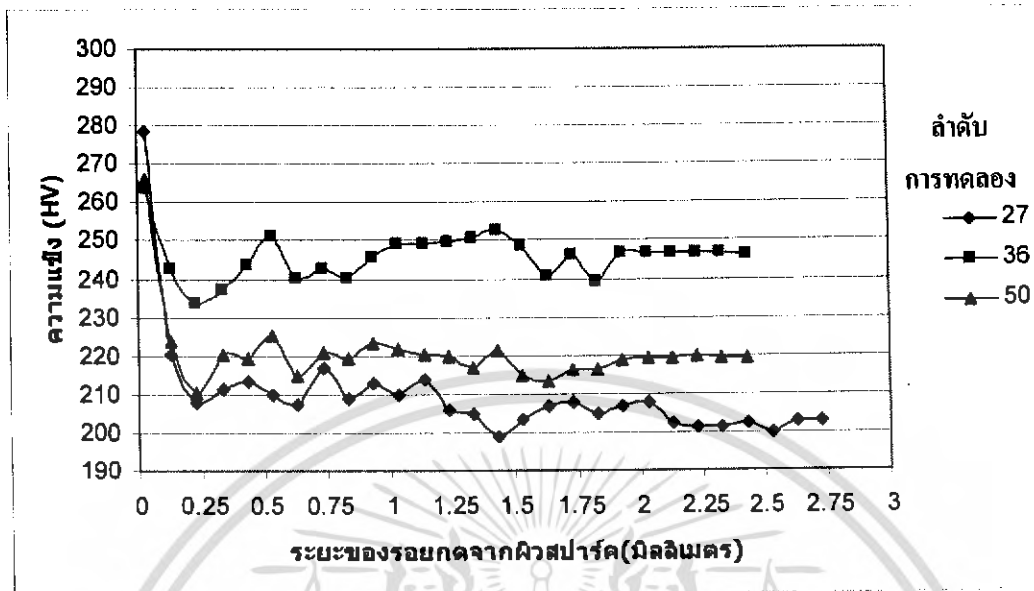


รูปที่ 4.16 แสดงความแรงและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่ฟารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

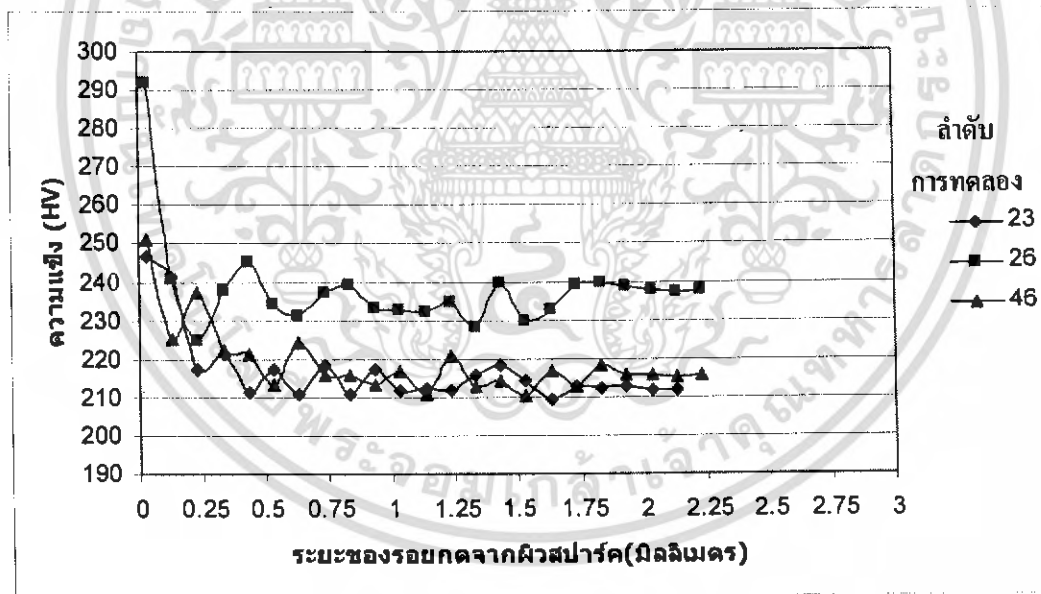


รูปที่ 4.17 แสดงความแรงและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่ฟารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแรงของชั้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชั้นงานเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนต่อความแรงในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

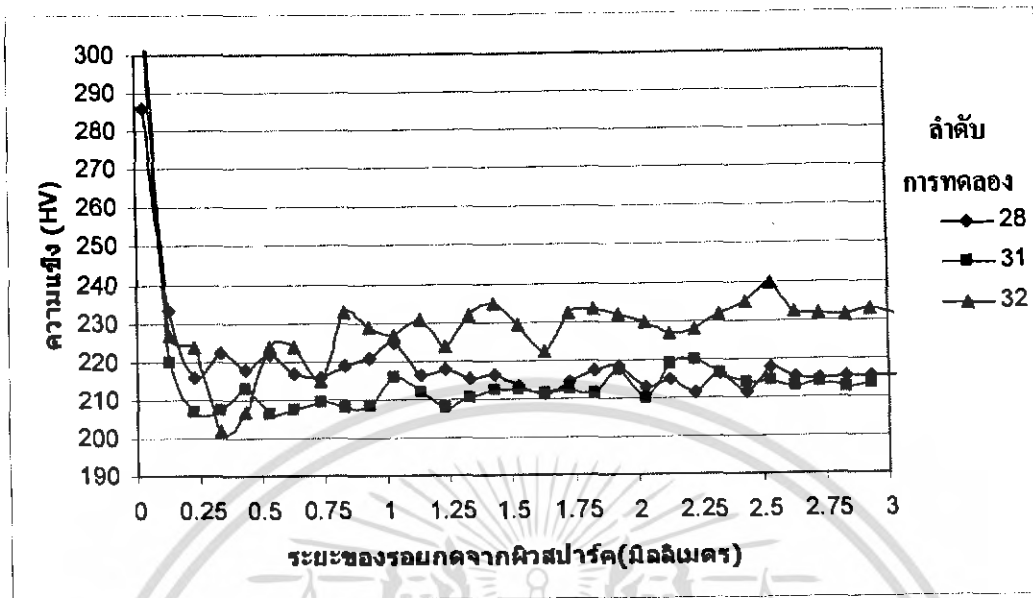


รูปที่ 4.18 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

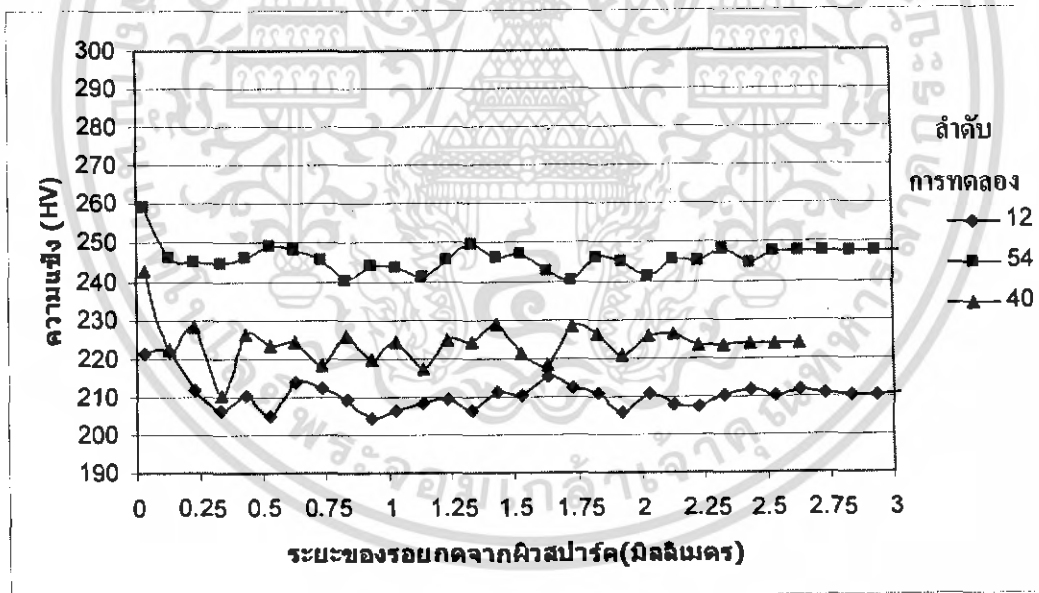


รูปที่ 4.19 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า



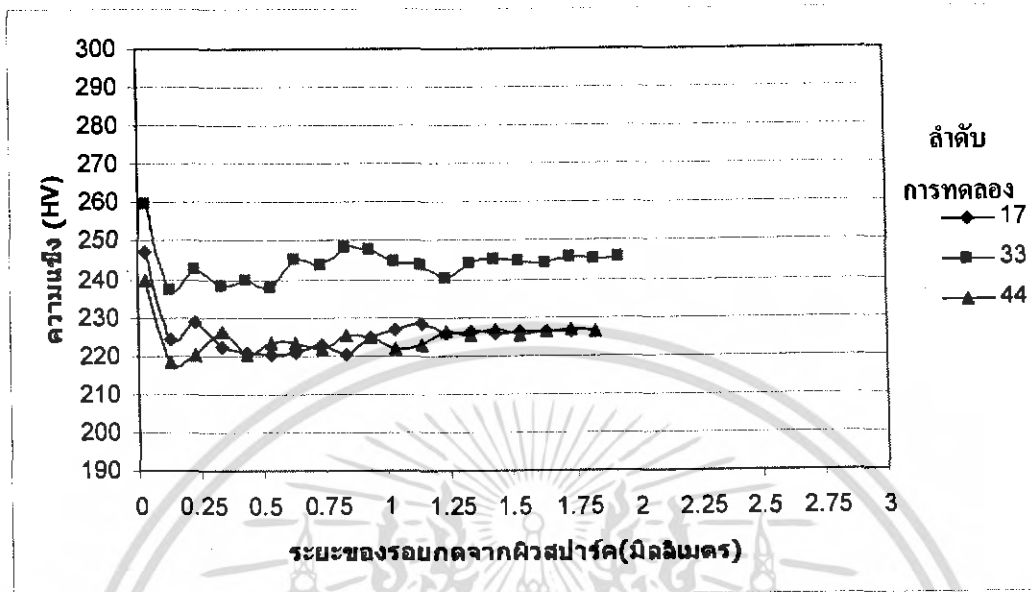
รูปที่ 4.20 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง



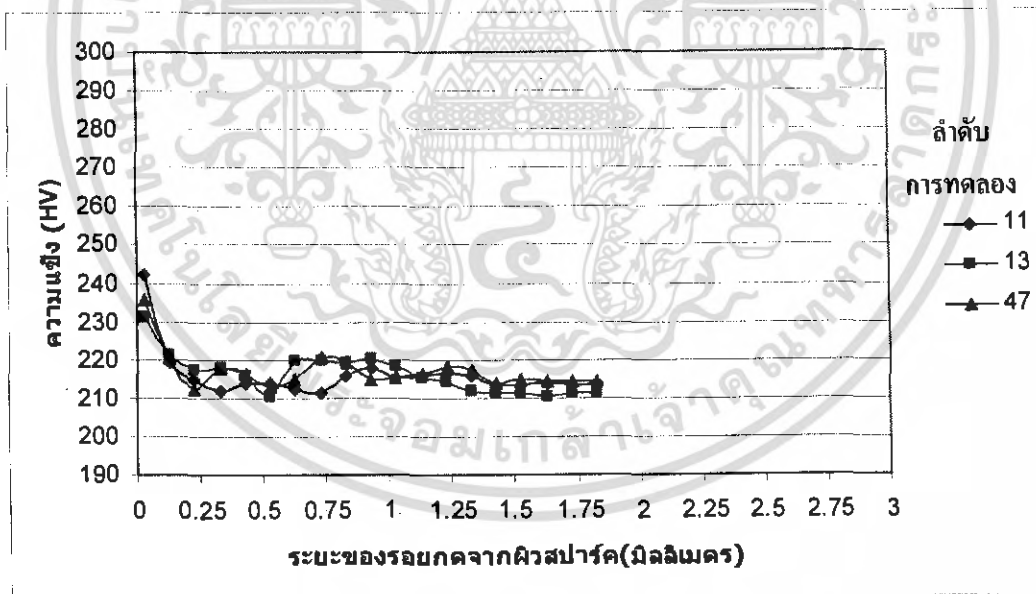
รูปที่ 4.21 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรที่อิเล็กโทรดต่างกันที่ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดงและอิเล็กโทรดกราไฟท์ อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานแต่อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและมีค่าความแปรปรวนต่อความแข็งในแนวลึกมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า

2. เปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรดทองแดง

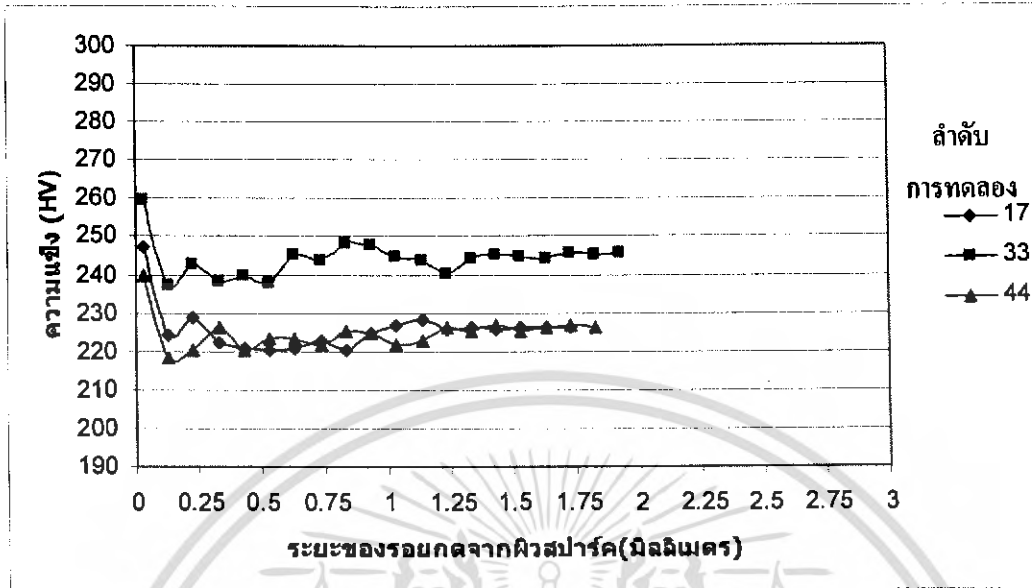


รูปที่ 4.22 แสดงความแข็งและระยะรอกบดจากผิวสปรักที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

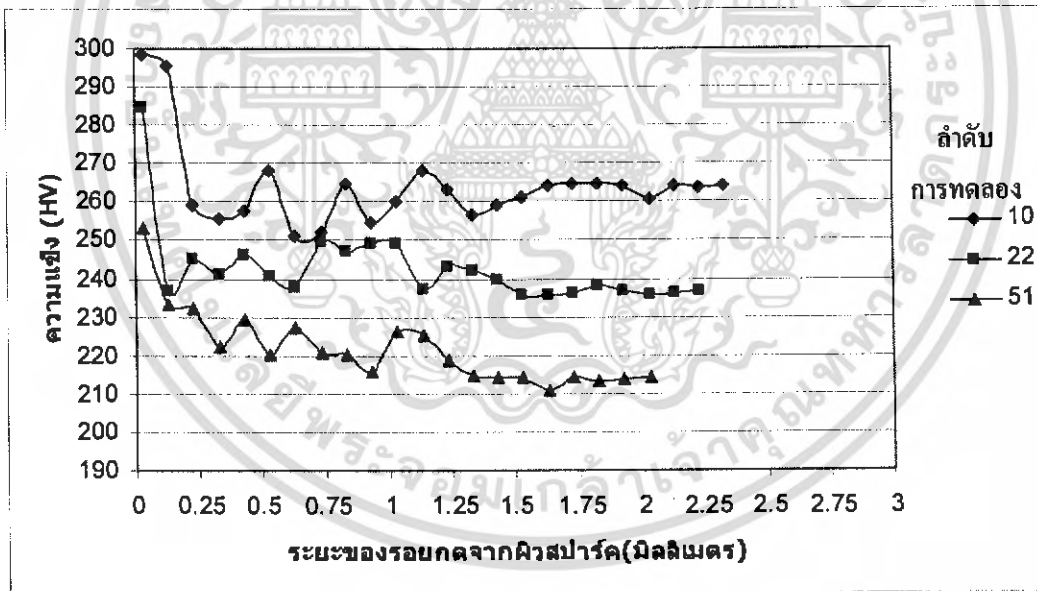


รูปที่ 4.23 แสดงความแข็งและระยะรอกบดจากผิวสปรักที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรดทองแดง
 ค่า ON ที่ 500 และค่า ON ที่ 100 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในแนวตั้งใกล้เคียงกันแต่ค่า ON ที่ 100 จะมีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปรักมากกว่าค่า ON ที่ 500



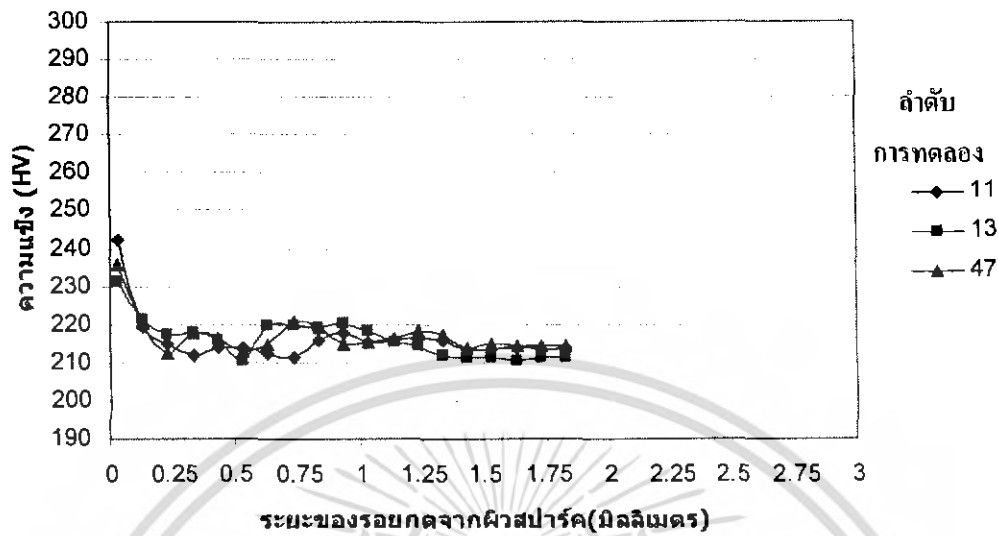
รูปที่ 4.24 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง



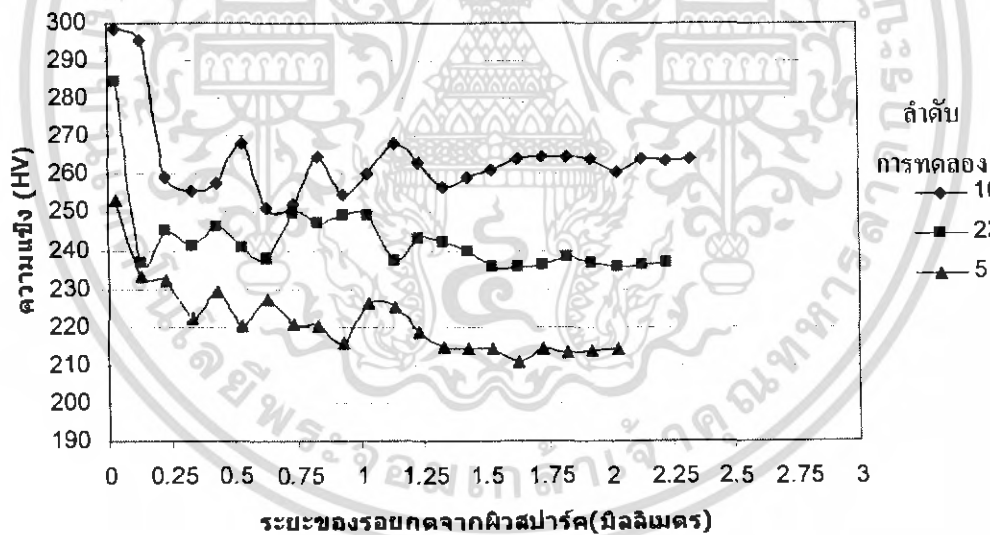
รูปที่ 4.25 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 900 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100



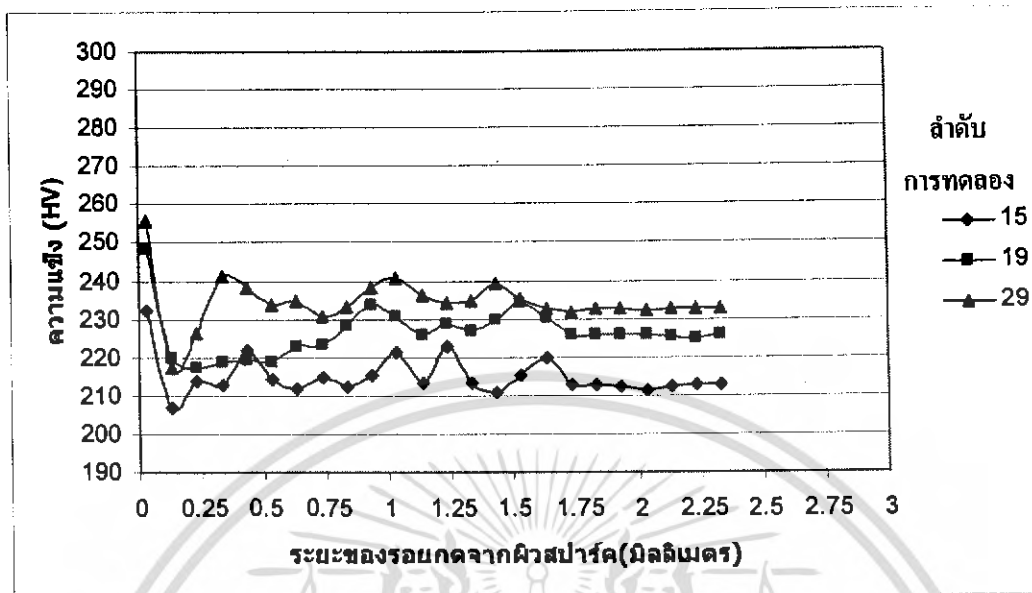
รูปที่ 4.26 แสดงความเข้มและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโตรดทองแดง



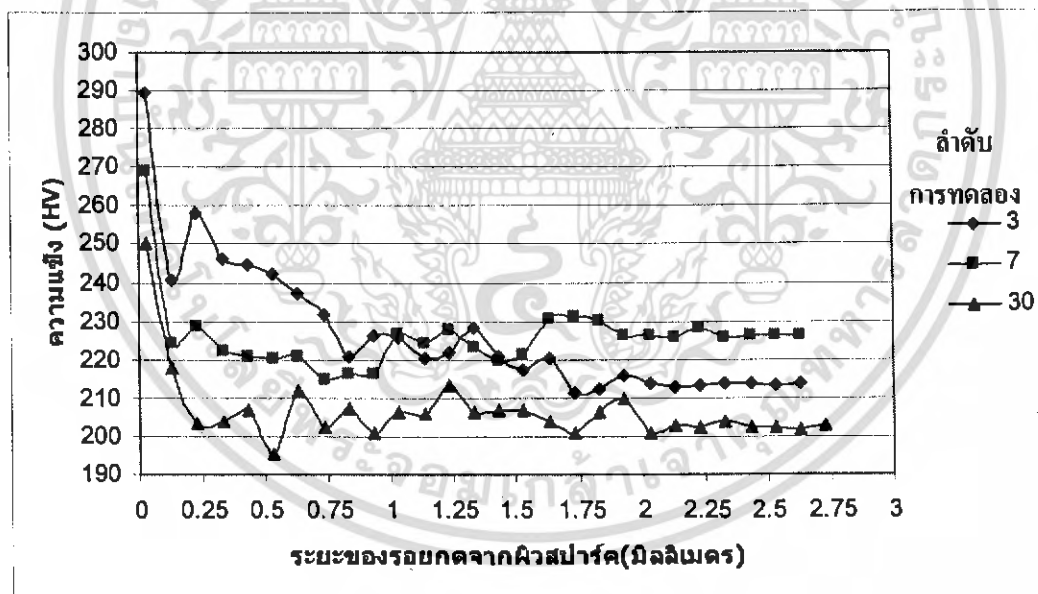
รูปที่ 4.27 แสดงความเข้มและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโตรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโตรดทองแดง

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความเข้มที่ผิวสปาร์คเกิดความเข้มขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 500 และค่า ON ที่ 900 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความเข้มในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 500



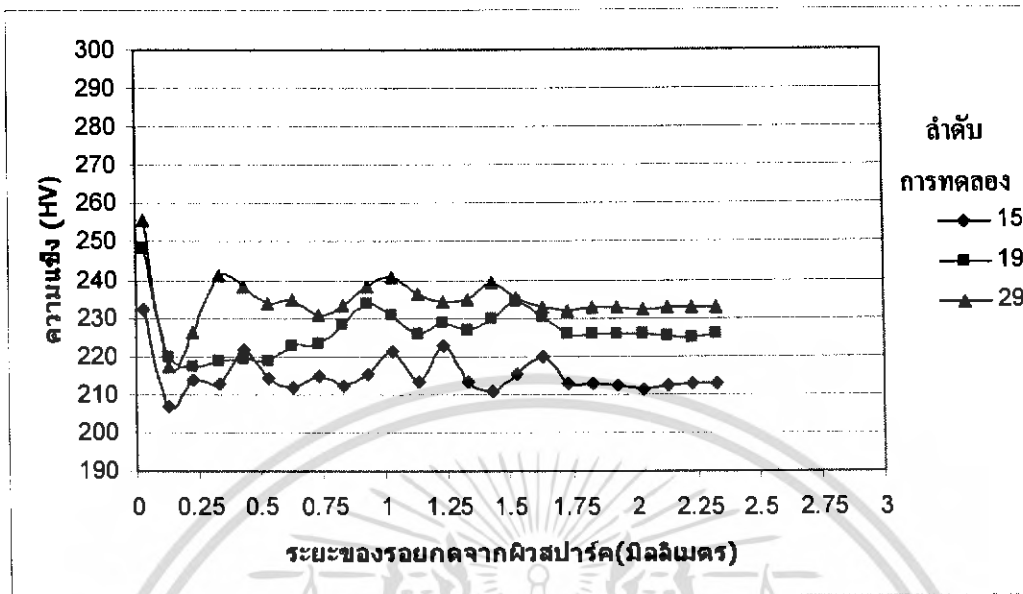
รูปที่ 4.28 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง



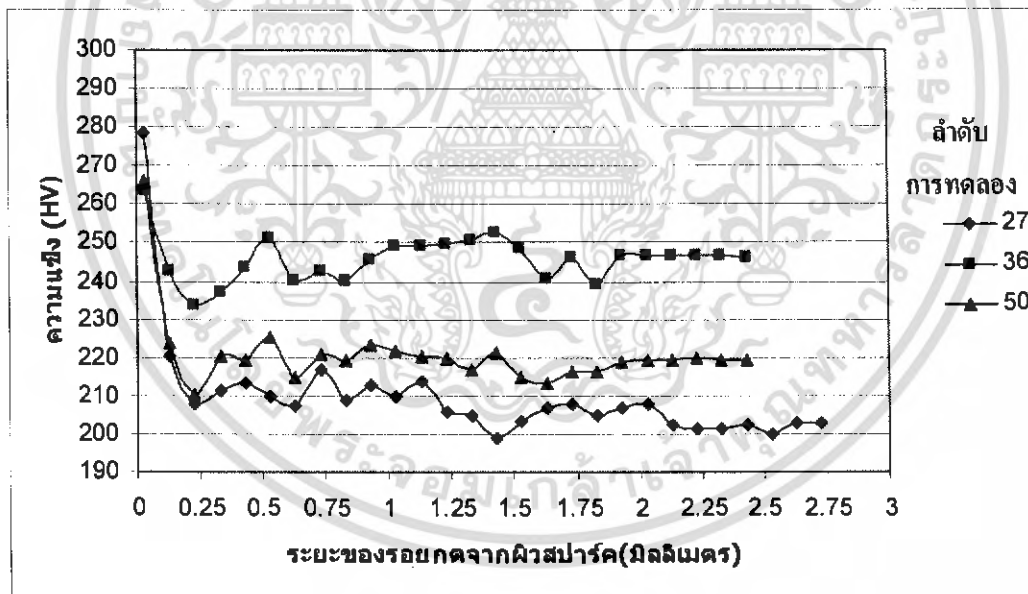
รูปที่ 4.29 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 คือค่า ON และมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100



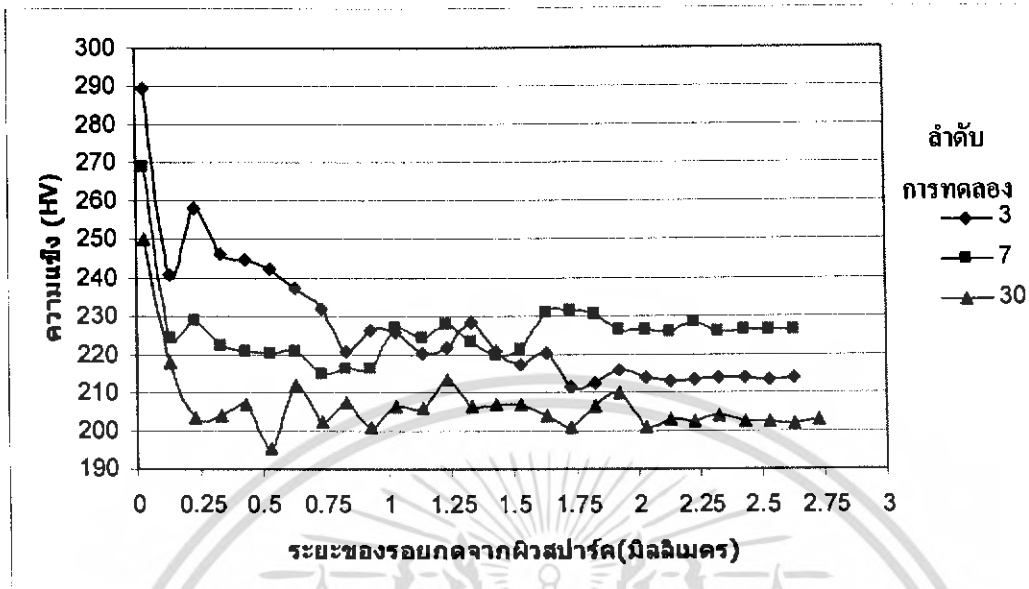
รูปที่ 4.30 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง



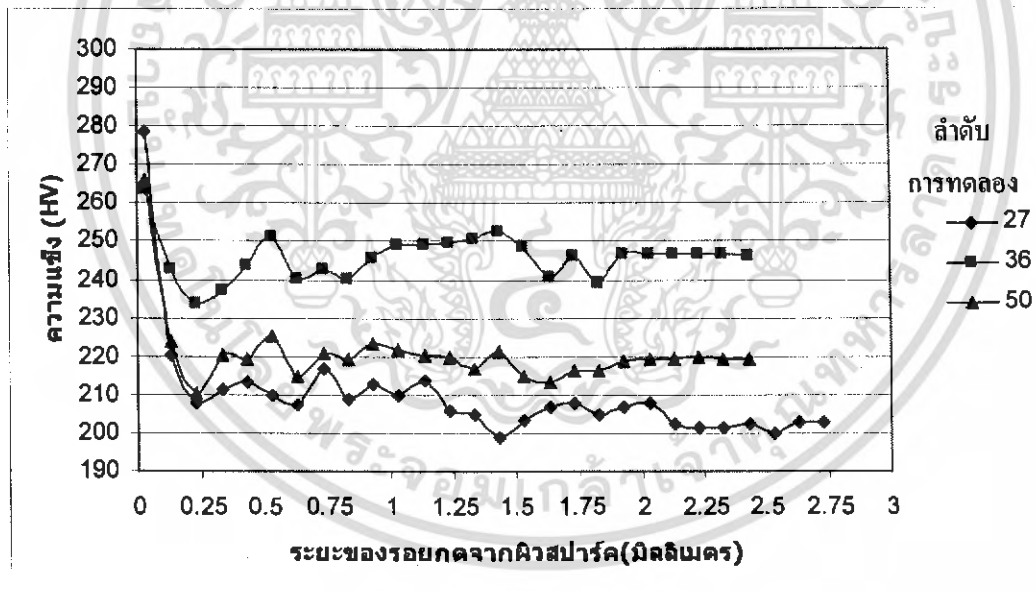
รูปที่ 4.31 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และจะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100

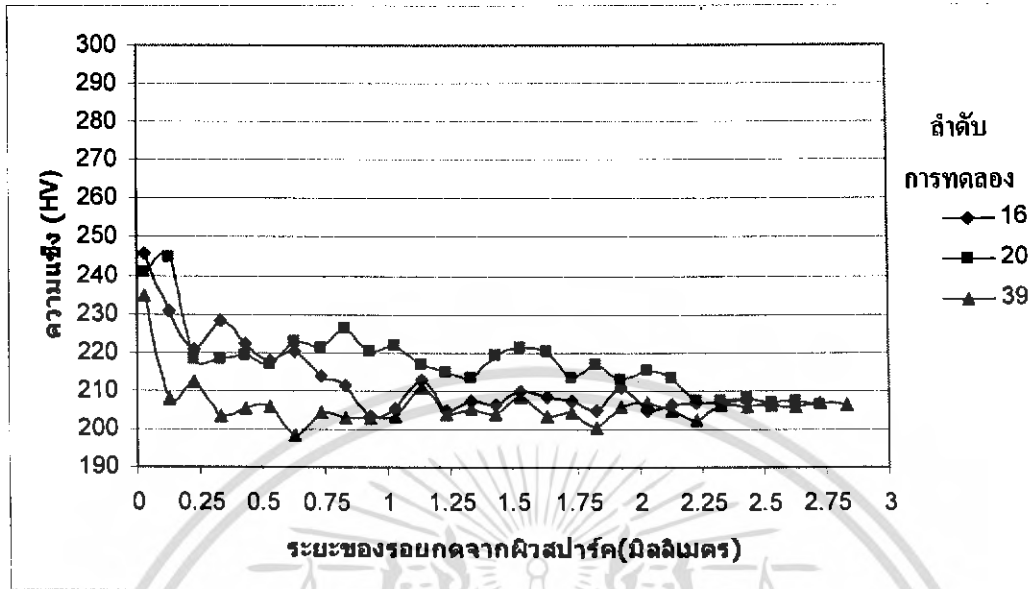


รูปที่ 4.32 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโตรดทองแดง

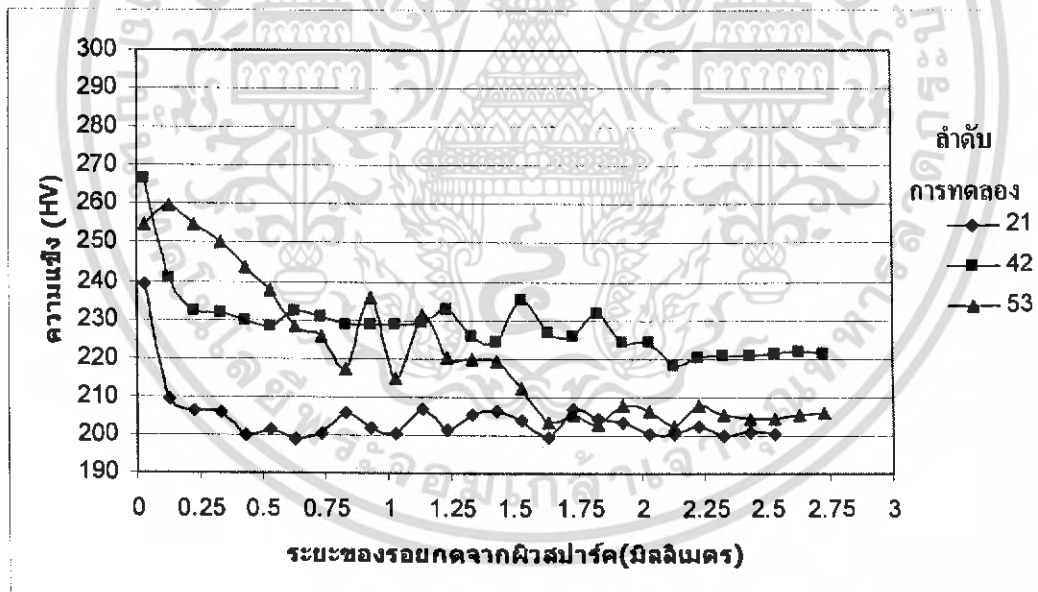


รูปที่ 4.33 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโตรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโตรดทองแดง
 ค่า ON ที่ 500 และค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คและความแปรปรวนในแนวลึกมีความ
 ใกล้เคียงกัน

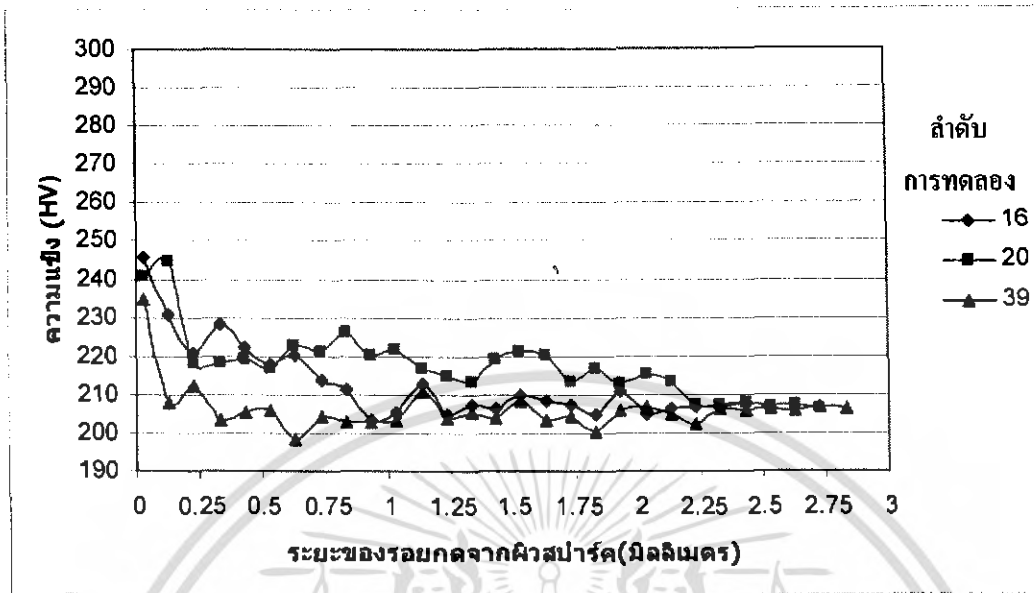


รูปที่ 4.34 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

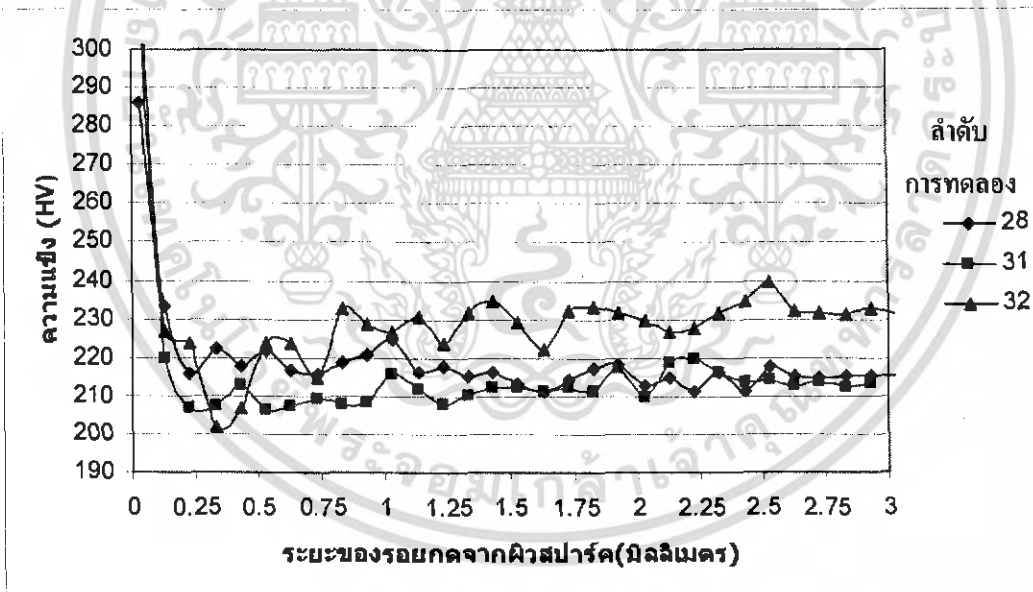


รูปที่ 4.35 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรดทองแดง
 ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 แต่ค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 500 จะมีความแปรปรวนในแนวลึกใกล้เคียงกัน



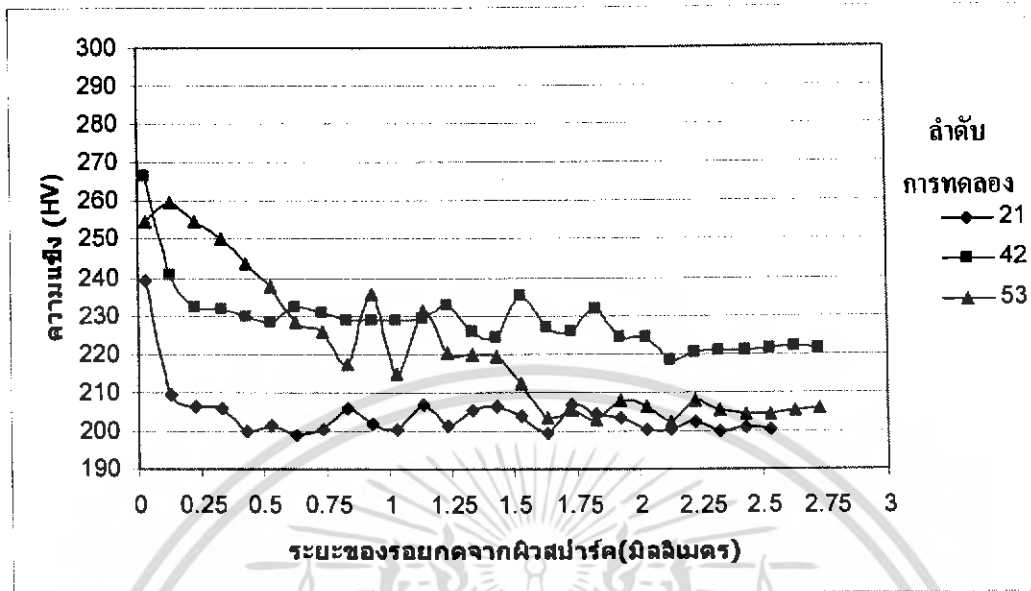
รูปที่ 4.36 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง



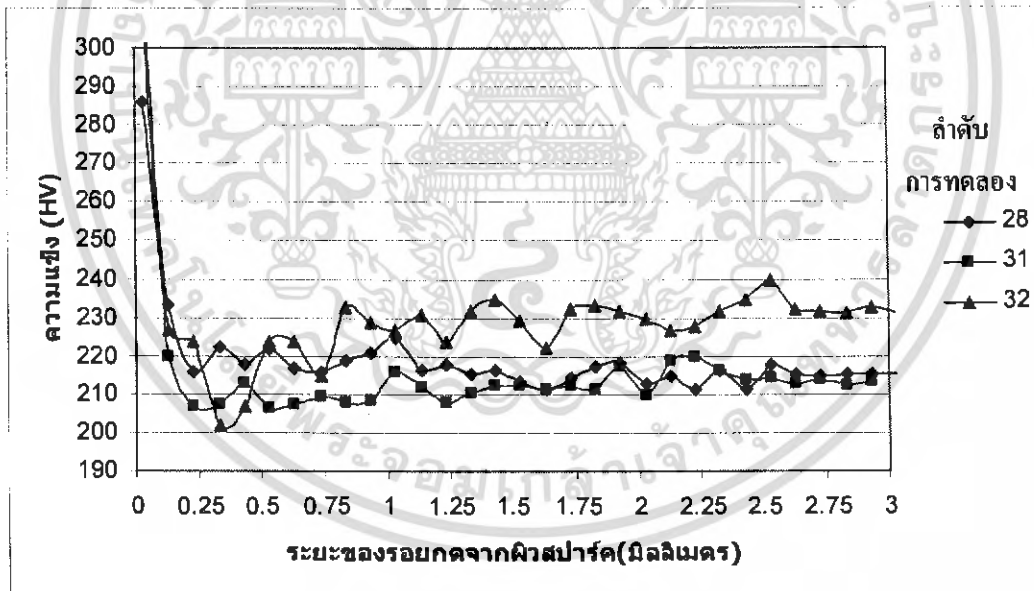
รูปที่ 4.37 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 900 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100



รูปที่ 4.38 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

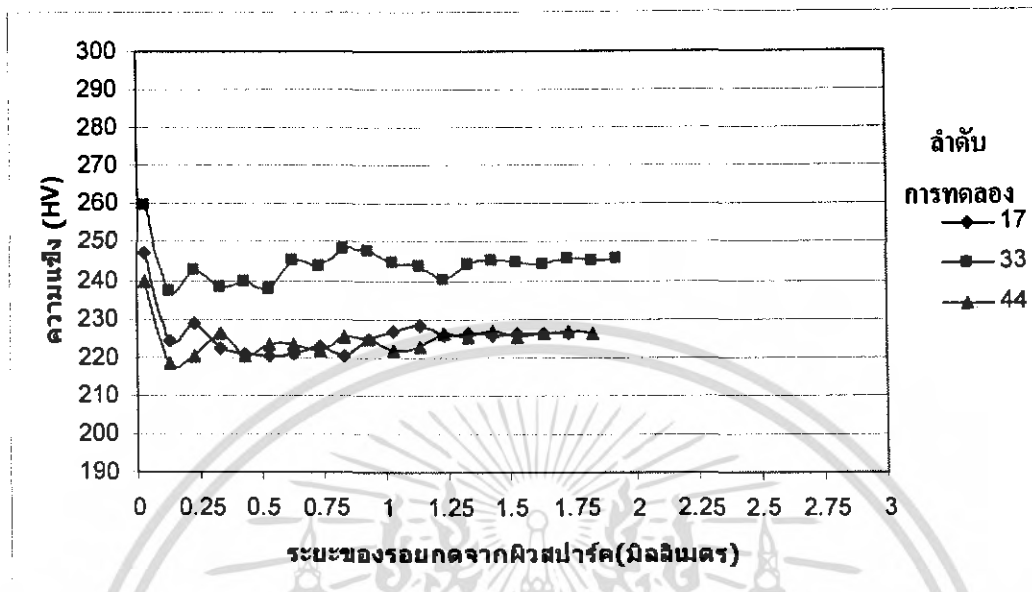


รูปที่ 4.39 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

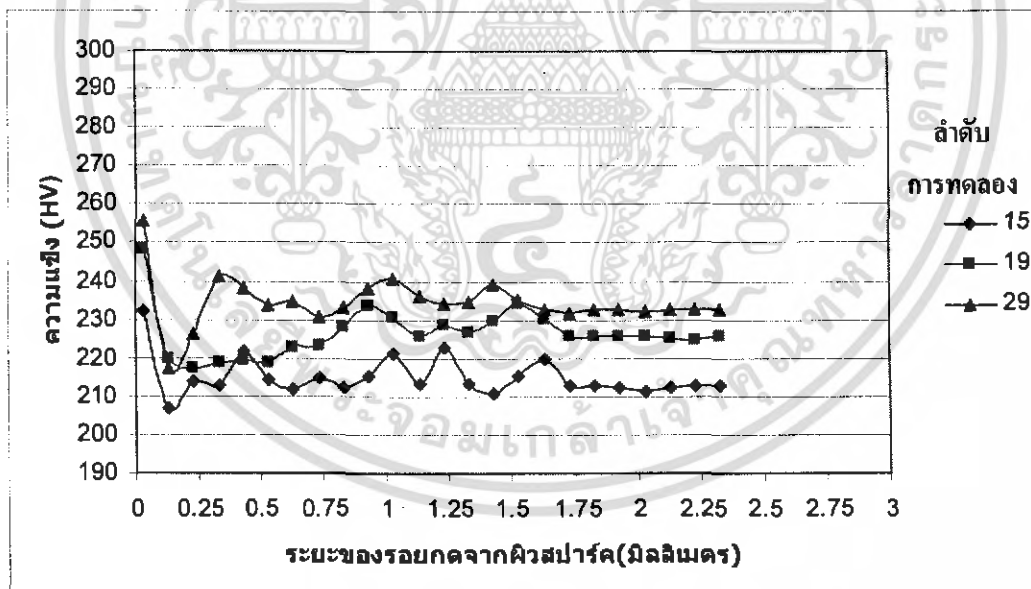
สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75, ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโตรดทองแดง

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 500 และค่า ON ที่ 900 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 500

3. เปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดทองแดง



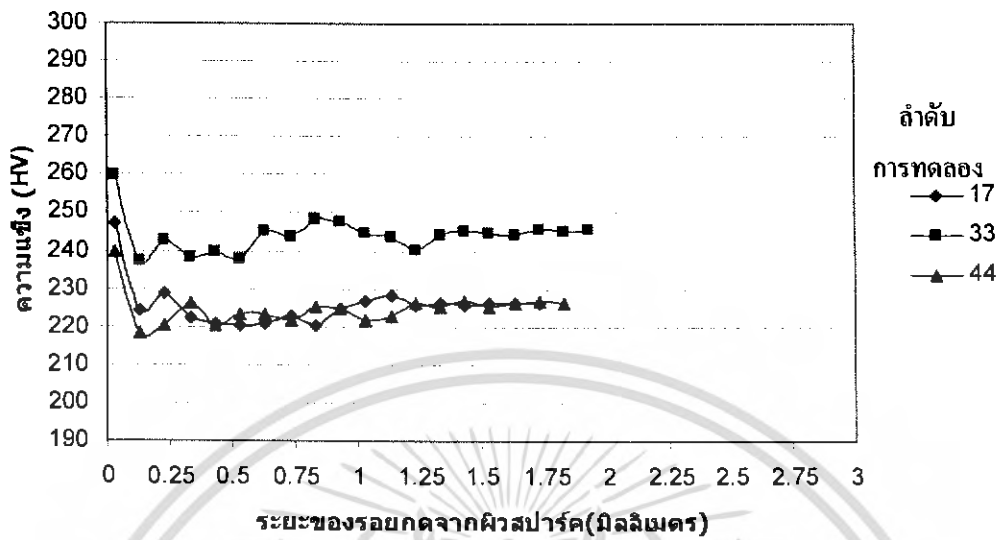
รูปที่ 4.40 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง



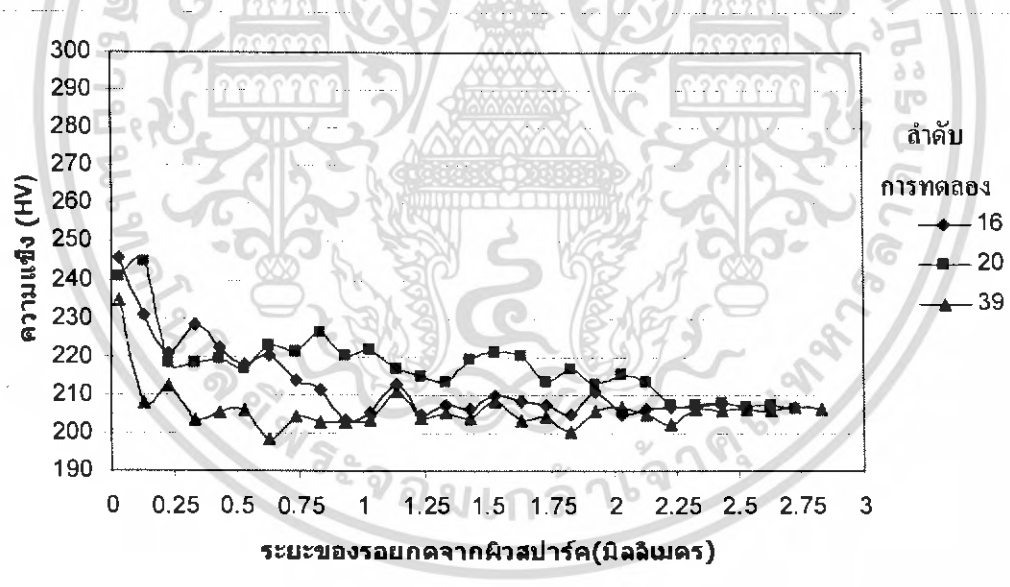
รูปที่ 4.41 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 45 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 45 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



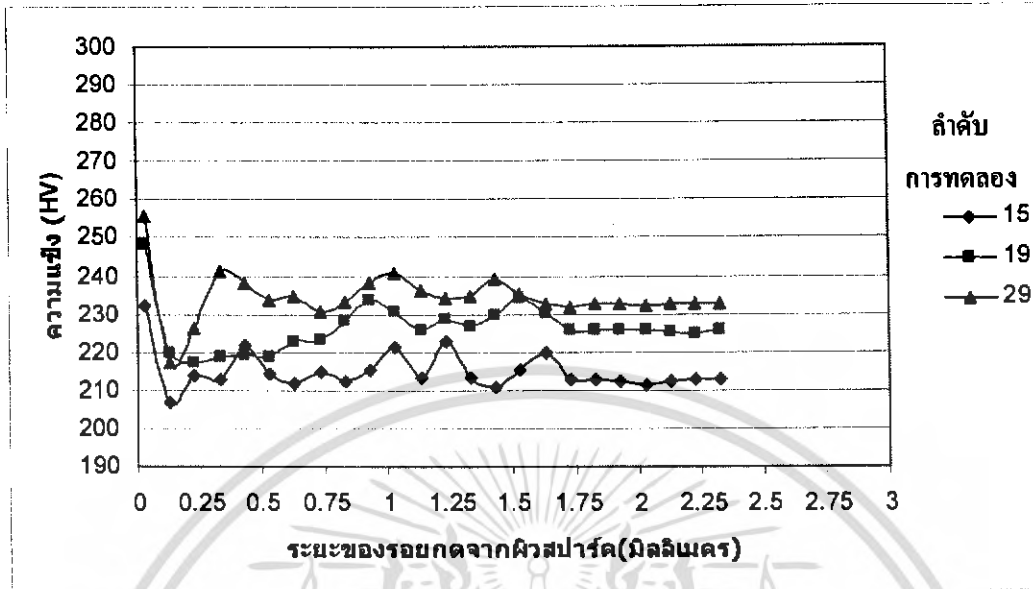
รูปที่ 4.42 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง



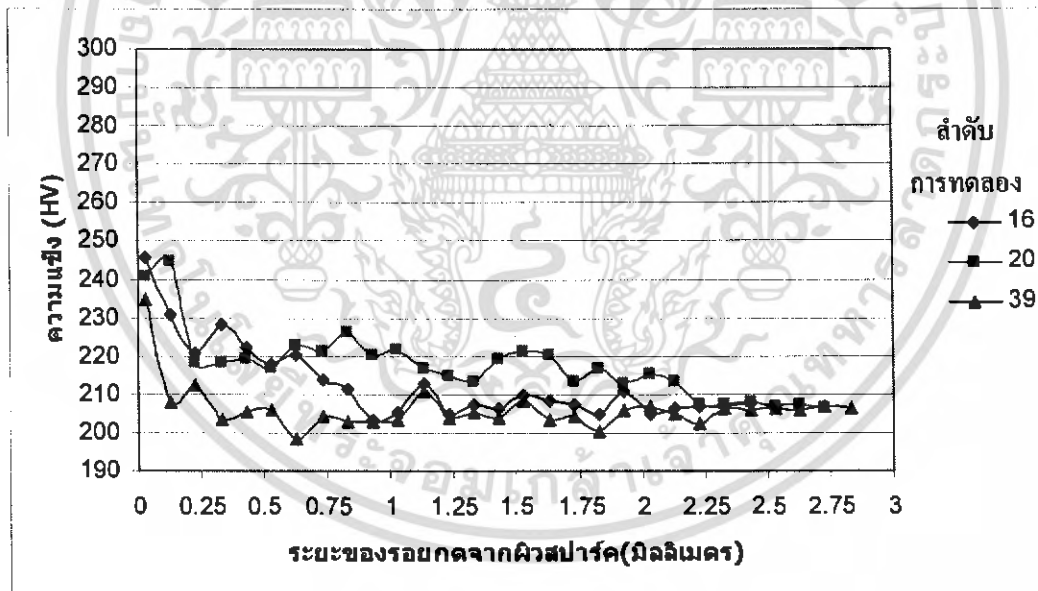
รูปที่ 4.43 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 15 และ IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 75 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์ก เกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 75 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



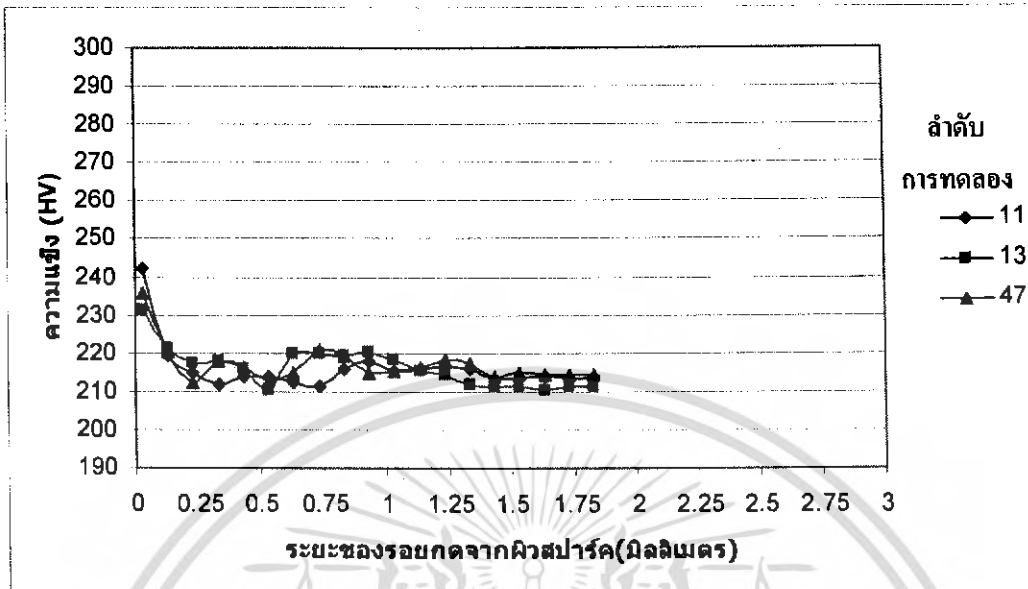
รูปที่ 4.44 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง



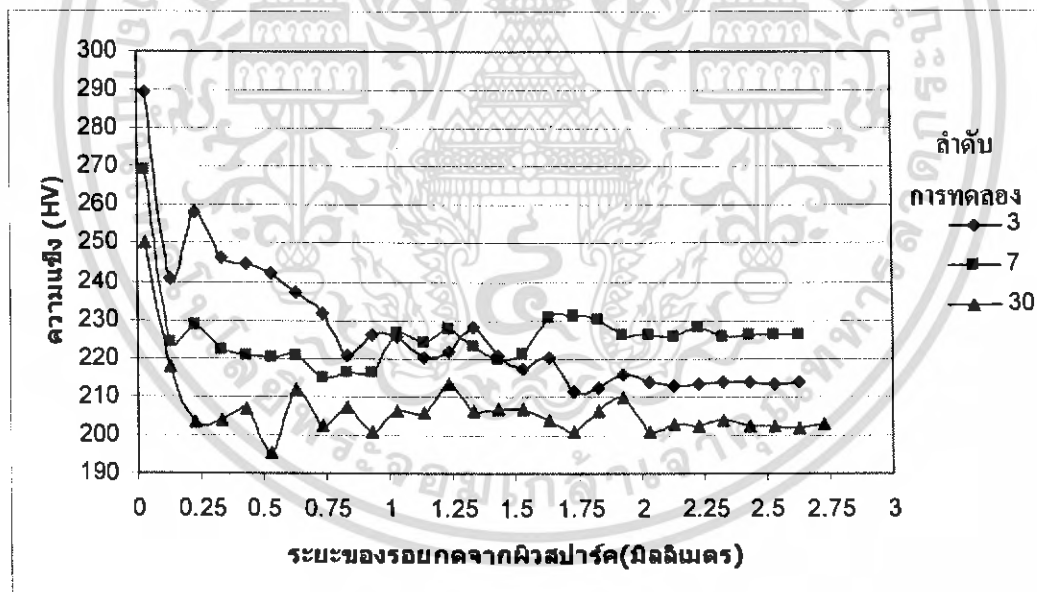
รูปที่ 4.45 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 45 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 75 แต่ค่า IP ที่ 75 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 45



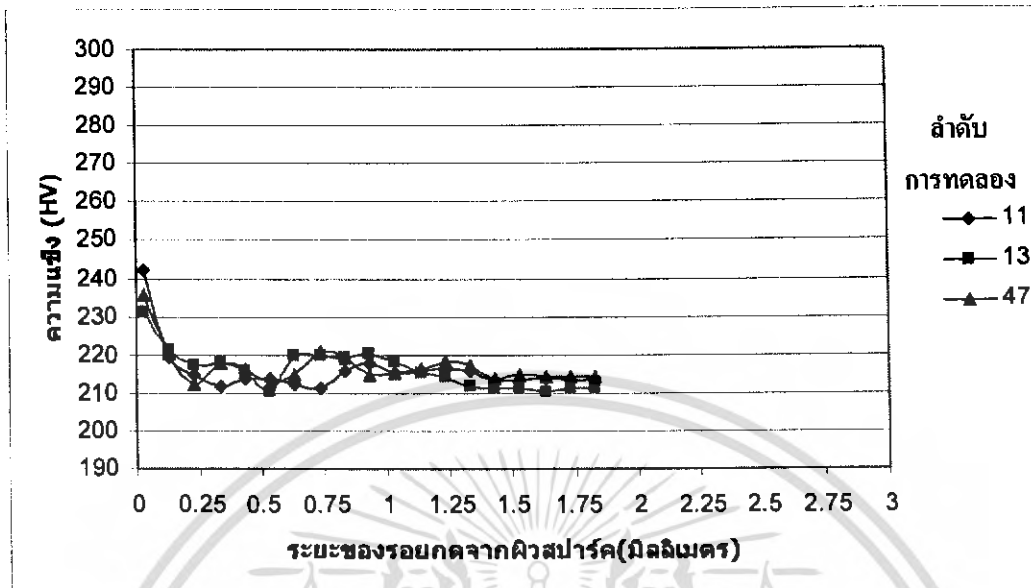
รูปที่ 4.46 แสดงความแข็งและระยะรอยกตจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง



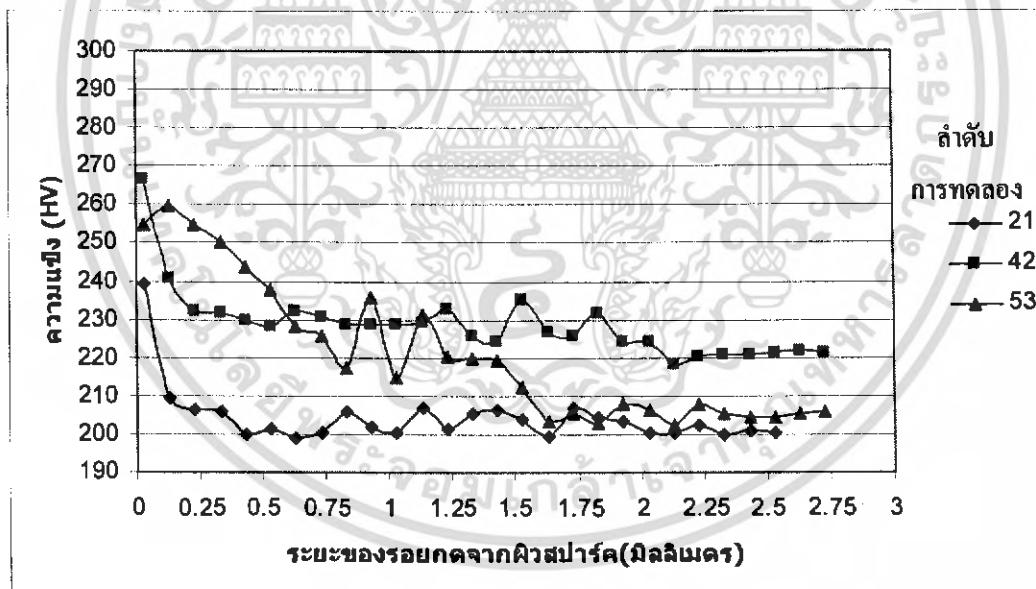
รูปที่ 4.47 แสดงความแข็งและระยะรอยกตจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 45 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 45 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



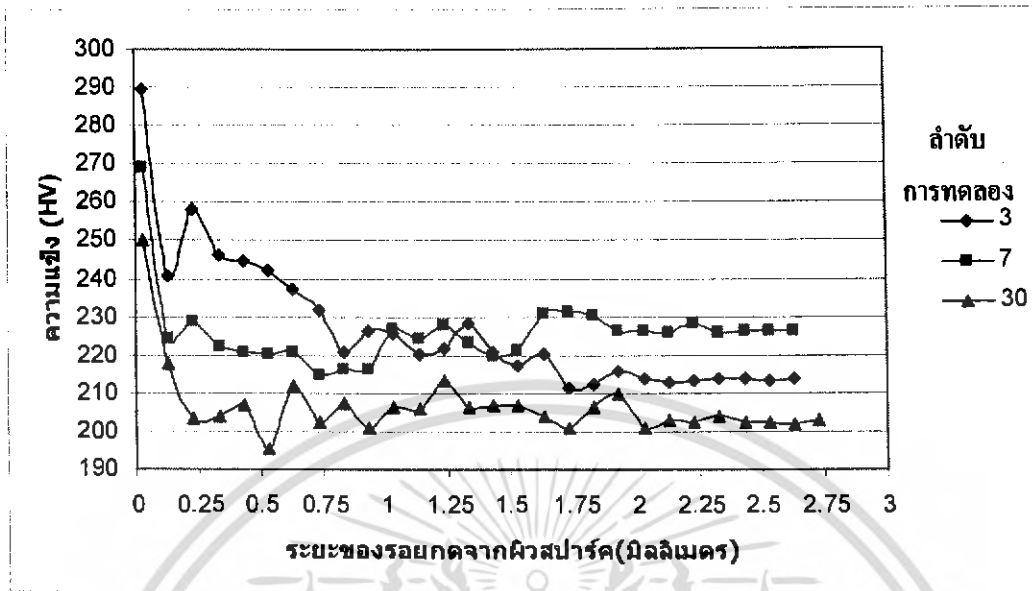
รูปที่ 4.48 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากฉิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิลีกโทรคทองแดง



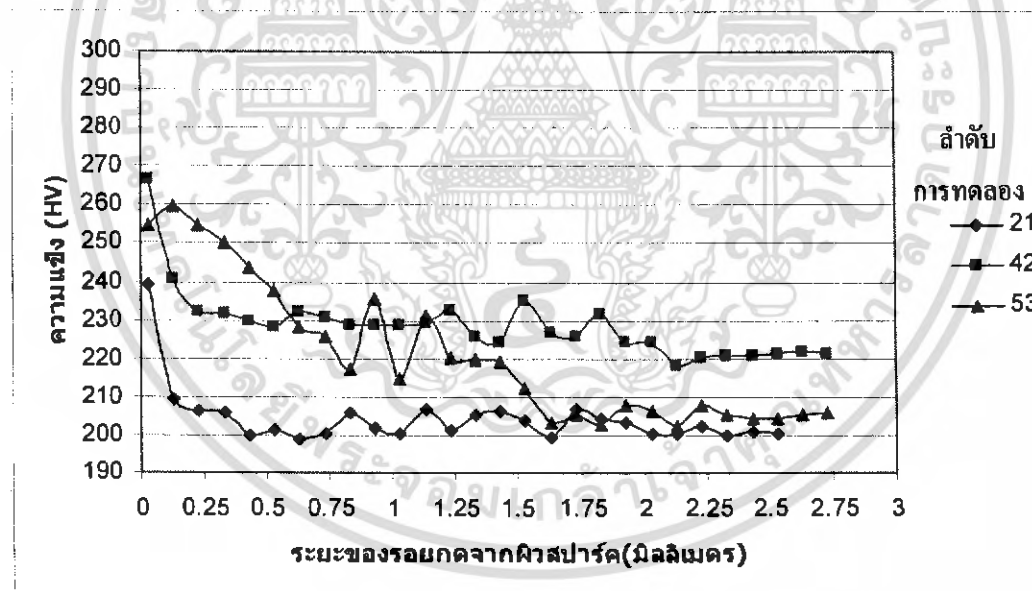
รูปที่ 4.49 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากฉิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิลีกโทรคทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 15 และ IP = 75 อิลีกโทรคทองแดง

ค่า IP ที่ 75 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ฉิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 75 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



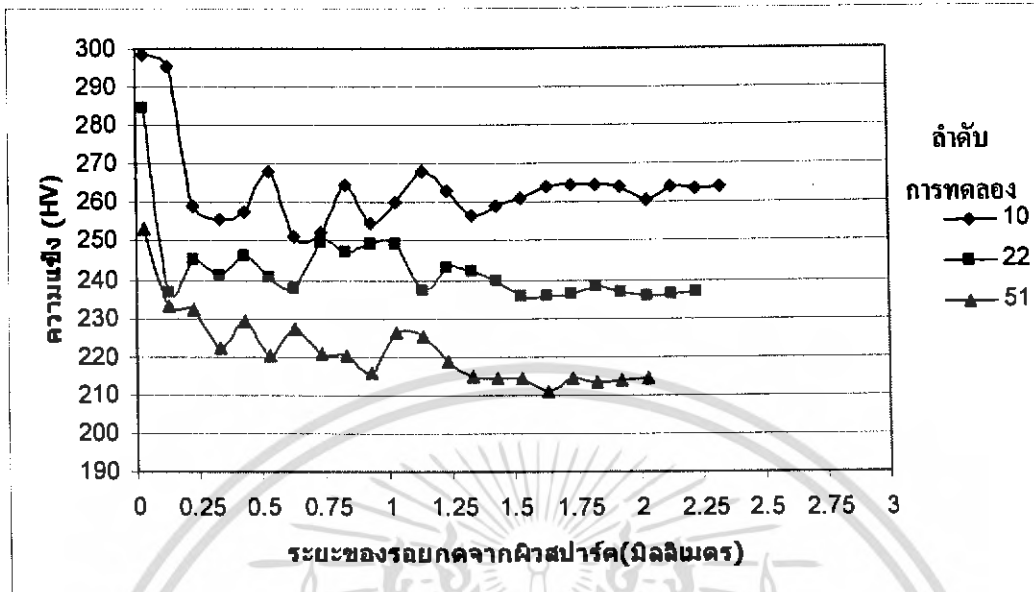
รูปที่ 4.50 แสดงความแรงและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่ฟารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง



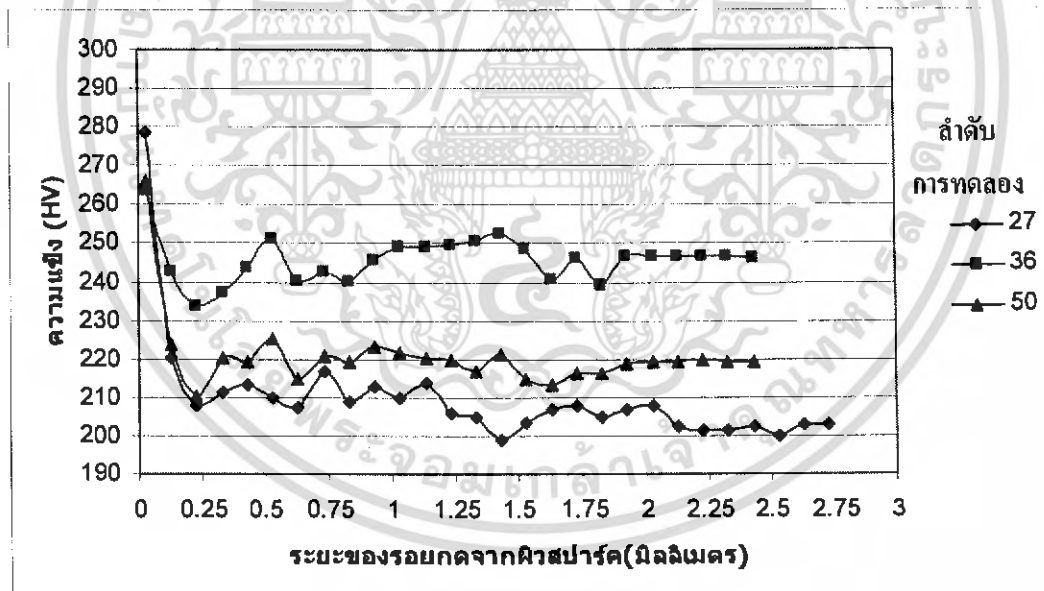
รูปที่ 4.51 แสดงความแรงและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่ฟารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 45 มีผลกระทบต่อความแรงที่ผิวสปาร์คเกิดความแรงขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 75 แต่ค่า IP ที่ 75 และ IP ที่ 45 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแรงในเชิงสถิติใกล้เคียงกัน



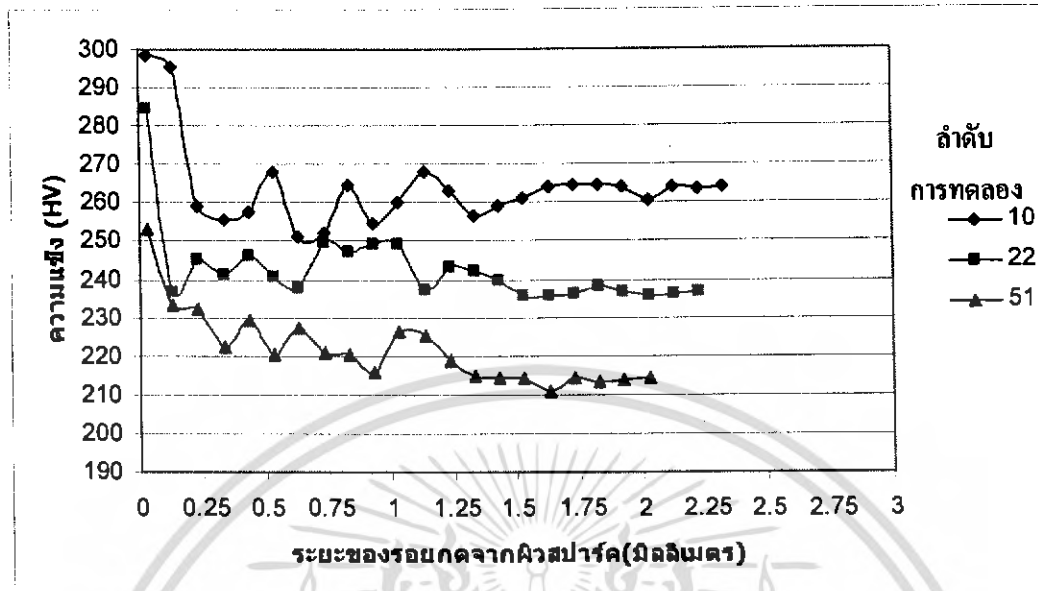
รูปที่ 4.52 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดทองแดง



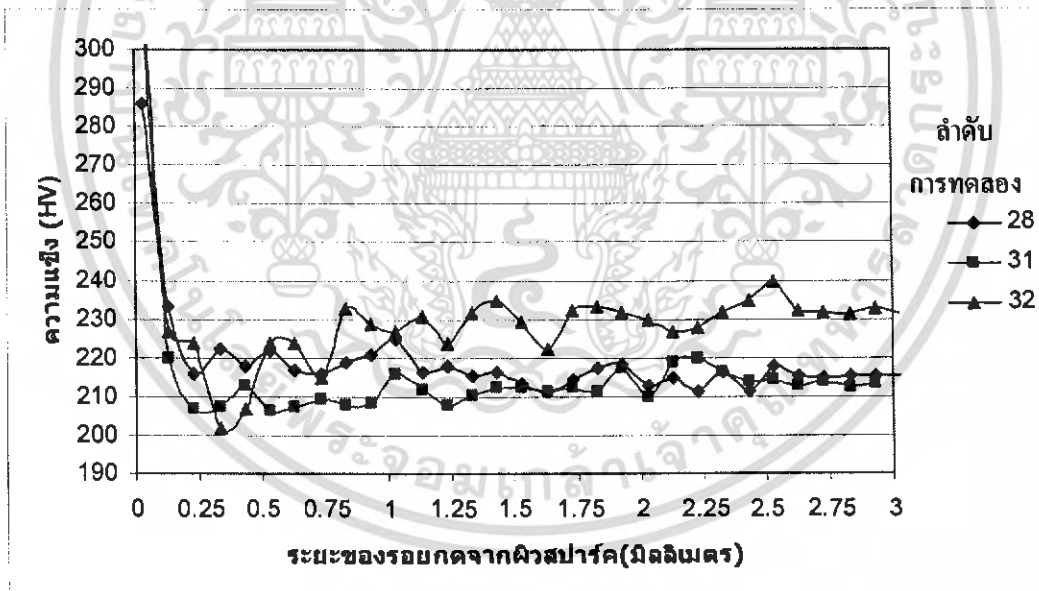
รูปที่ 4.53 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP ที่ 15 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ฉนวนสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 45 แต่ค่า IP ที่ 45 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



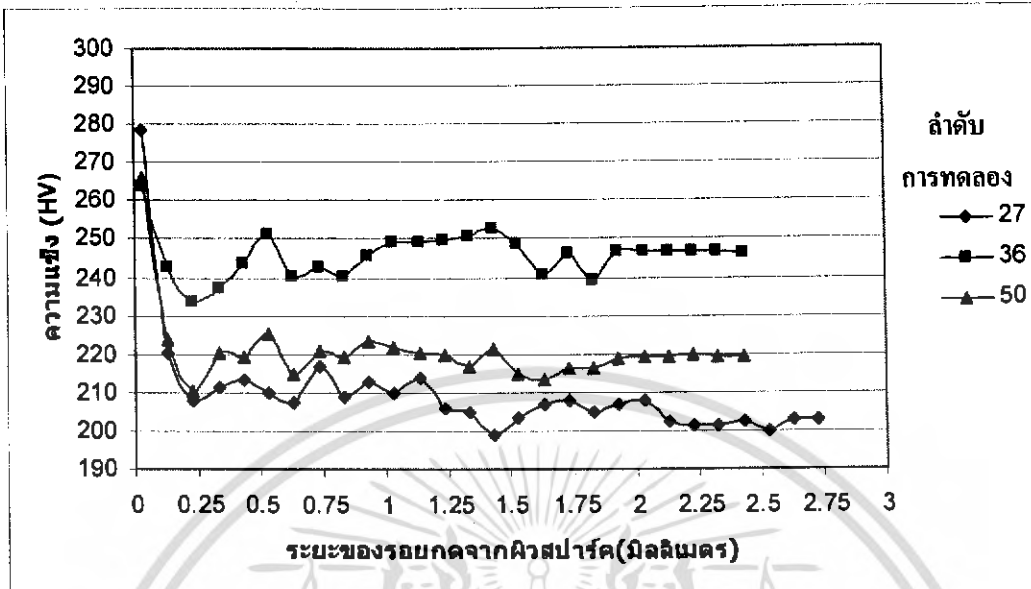
รูปที่ 4.54 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโตรดทองแดง



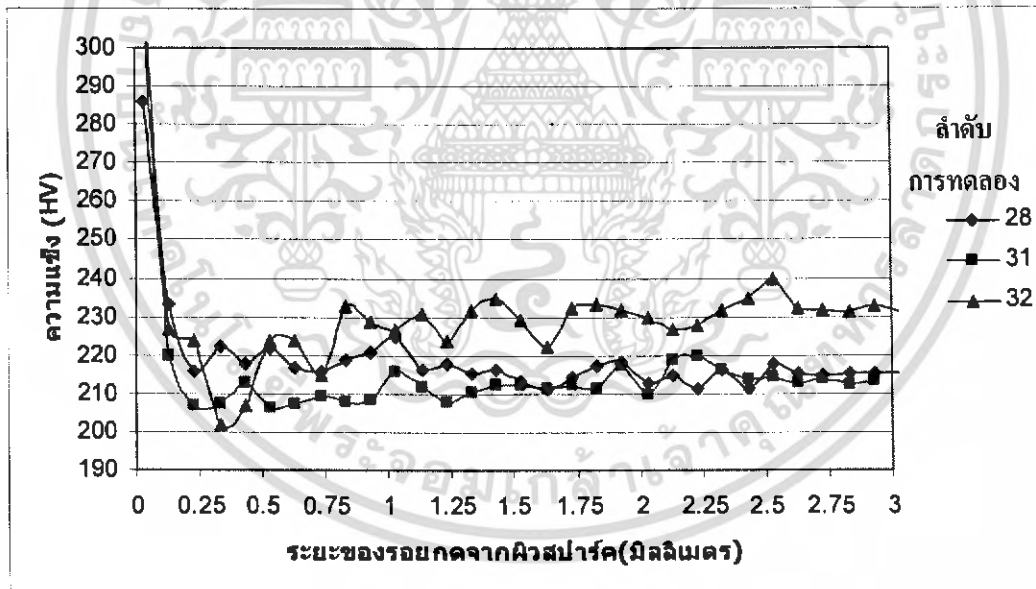
รูปที่ 4.55 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 15 และ IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

ค่า IP ที่ 75 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 75 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



รูปที่ 4.56 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโตรดทองแดง

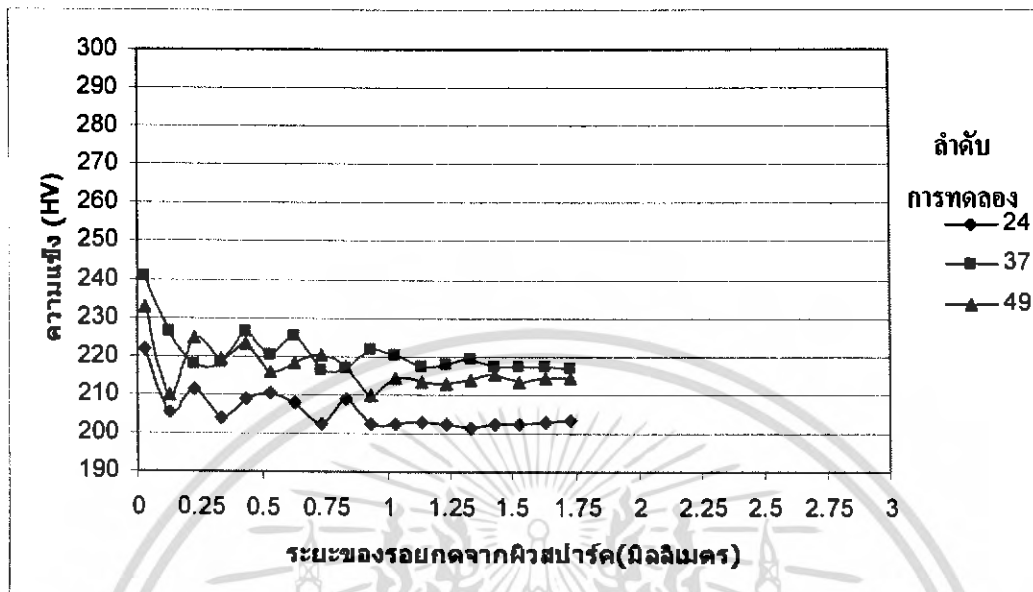


รูปที่ 4.57 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

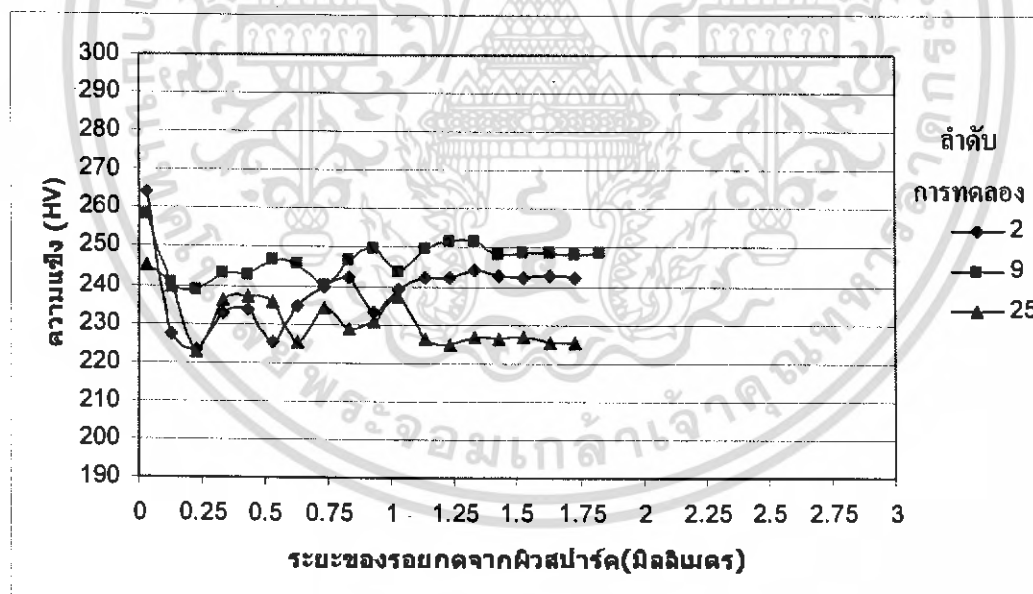
สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโตรดทองแดง

ค่า IP ที่ 75 มีผลกระทบต่อความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า IP ที่ 45 และค่า IP ที่ 75 จะมีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 45

4. เปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรคราไฟท์



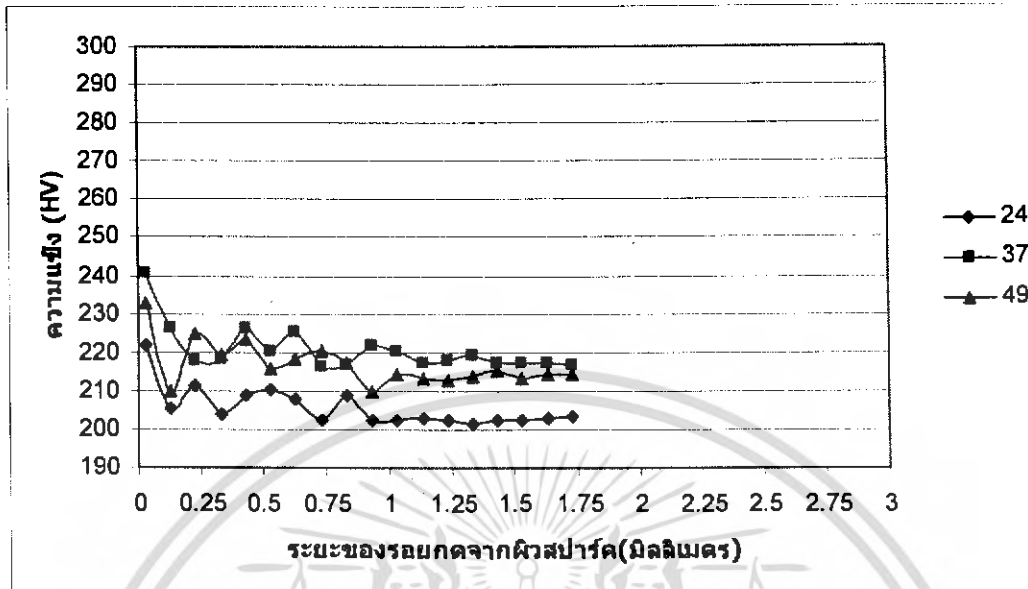
รูปที่ 4.58 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรคราไฟท์



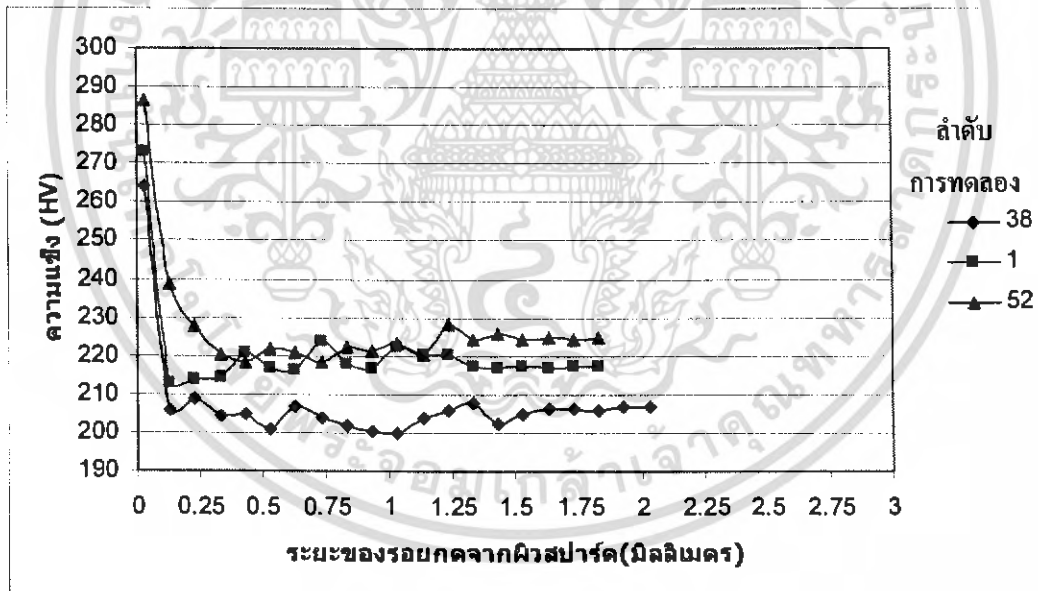
รูปที่ 4.59 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรคราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรคราไฟท์

ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 แต่ค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 500 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน

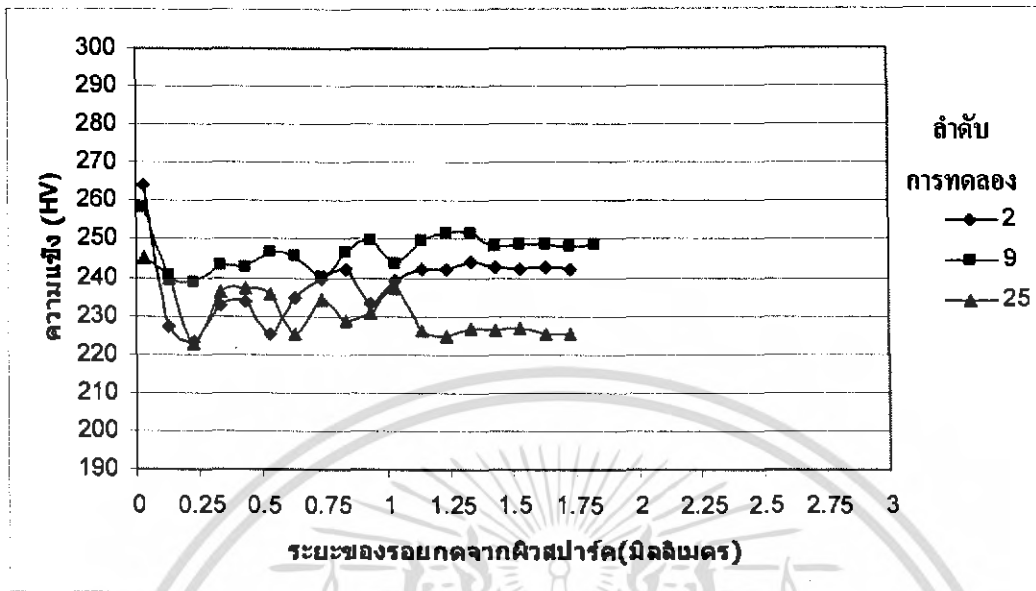


รูปที่ 4.60 แสดงความแรงและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

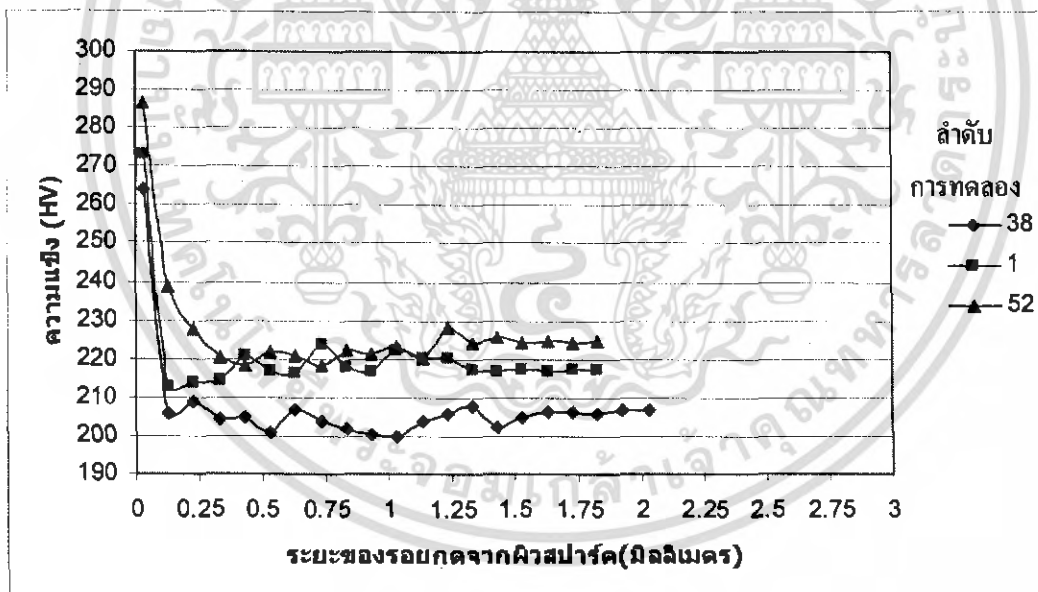


รูปที่ 4.61 แสดงความแรงและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโทรดกราไฟท์
 ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแรงที่ผิวสปาร์คเกิดความแรงขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 500
 จะมีความแปรปรวนความแรงในเชิงลึกมากกว่า ค่า ON ที่ 500



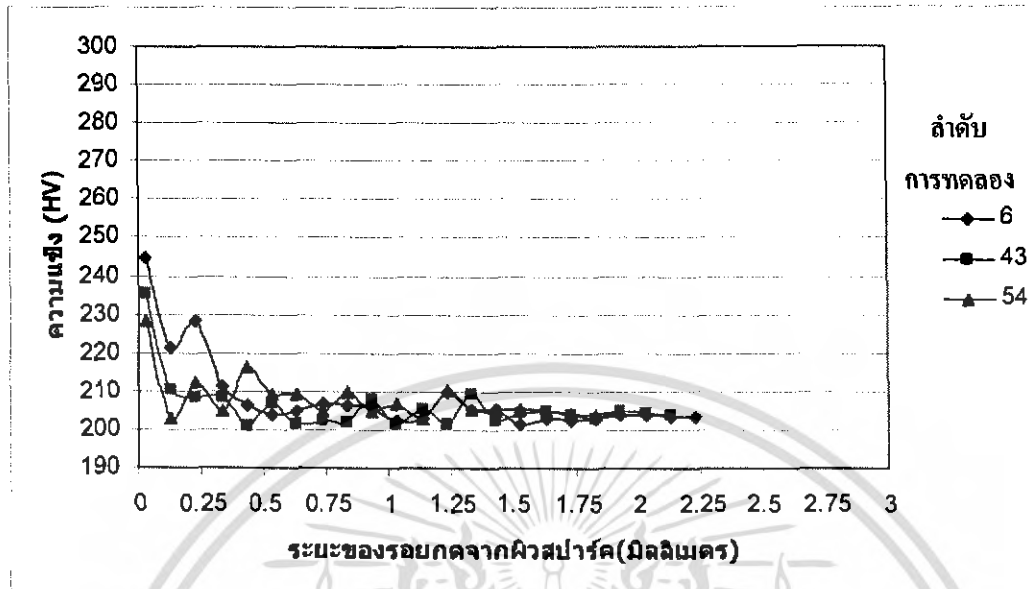
รูปที่ 4.62 แสดงความแข็งและระยะรอมกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



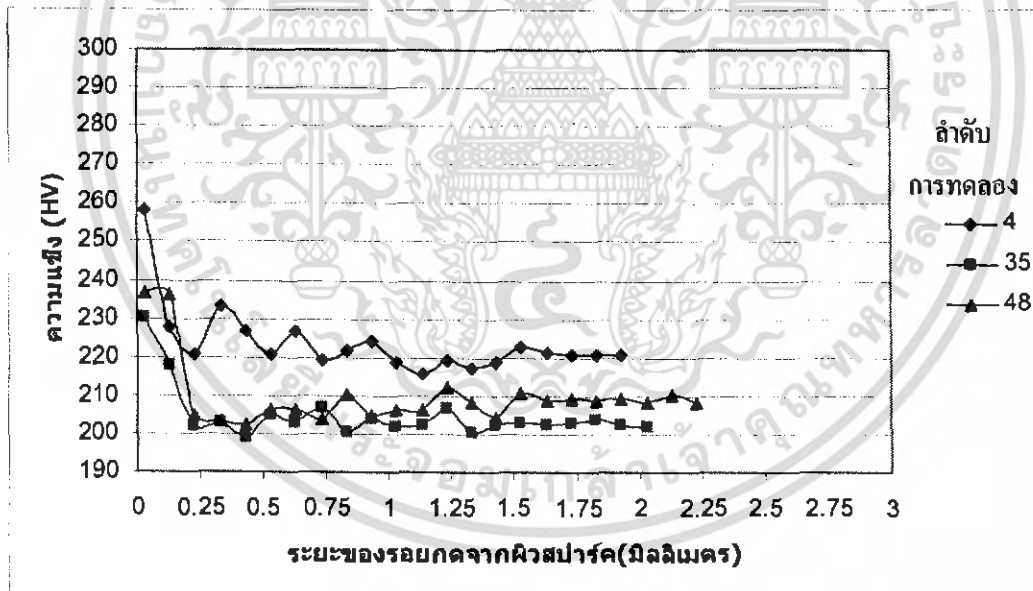
รูปที่ 4.63 แสดงความแข็งและระยะรอมกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 15 ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 500 แต่ค่า ON ที่ 500 และ ค่า ON ที่ 900 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน



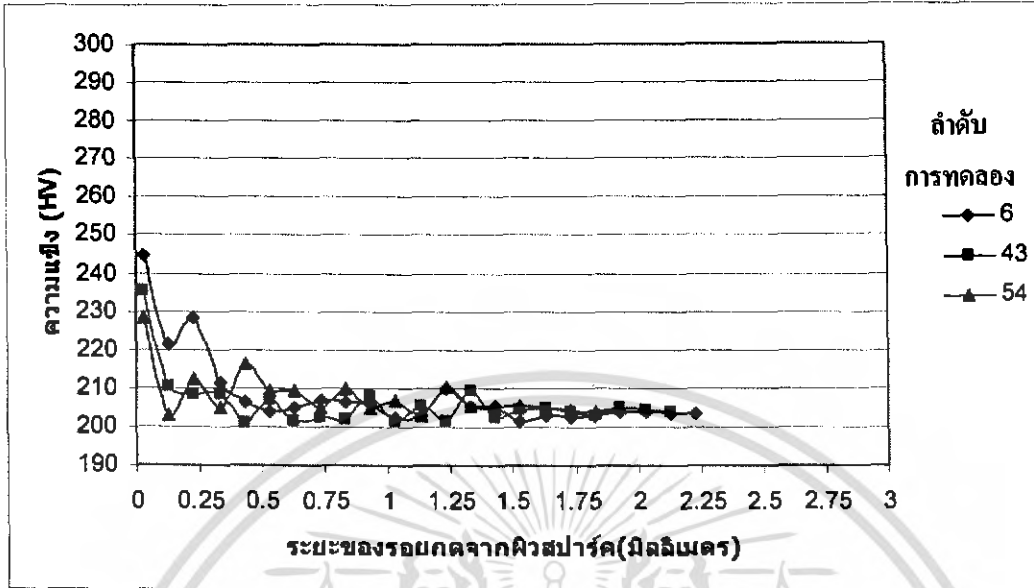
รูปที่ 4.64 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์



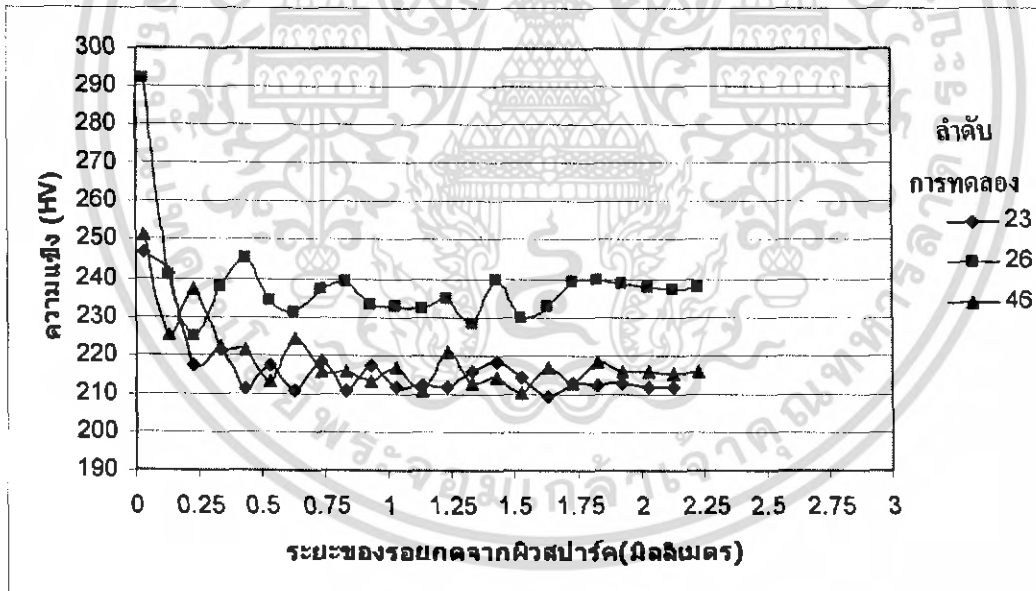
รูปที่ 4.65 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 แต่ค่า ON ที่ 100 และ ค่า ON ที่ 500 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน

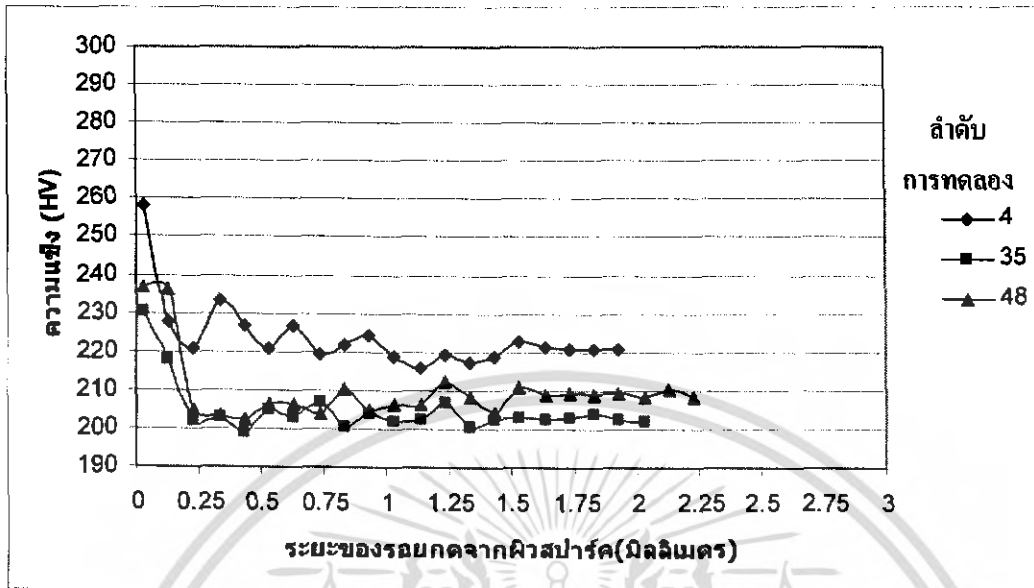


รูปที่ 4.66 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

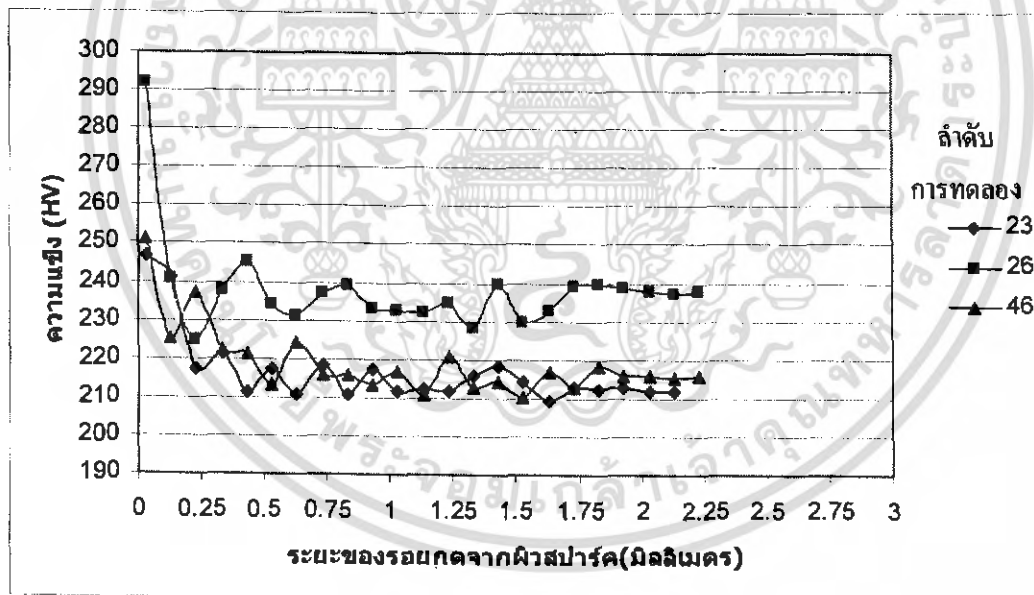


รูปที่ 4.67 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโทรดกราไฟท์
 ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 แต่ค่า ON ที่ 100 และ ค่า ON ที่ 900 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน



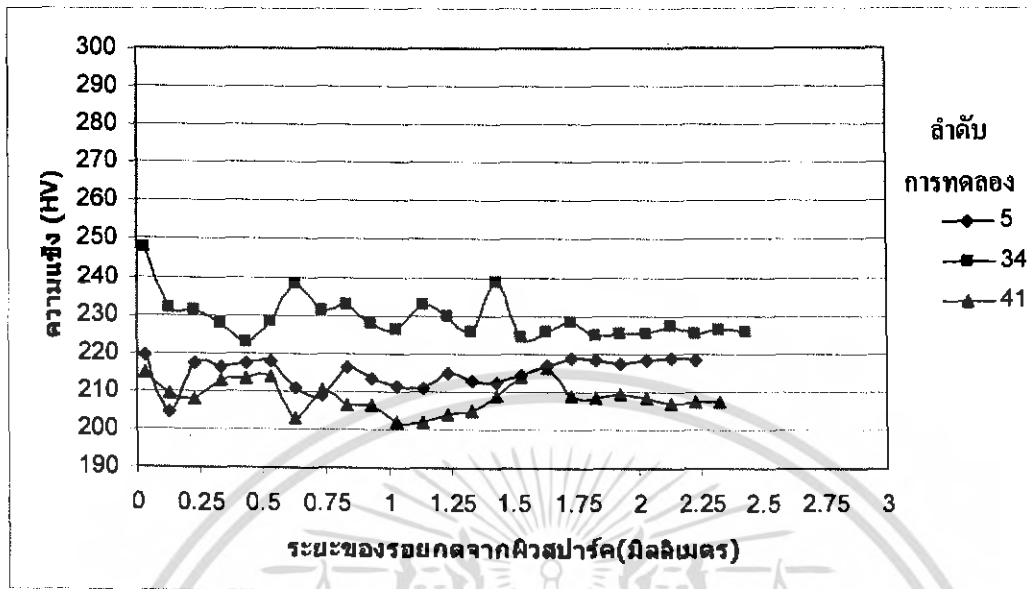
รูปที่ 4.68 แสดงความแข็งและระยะรอยกตจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์



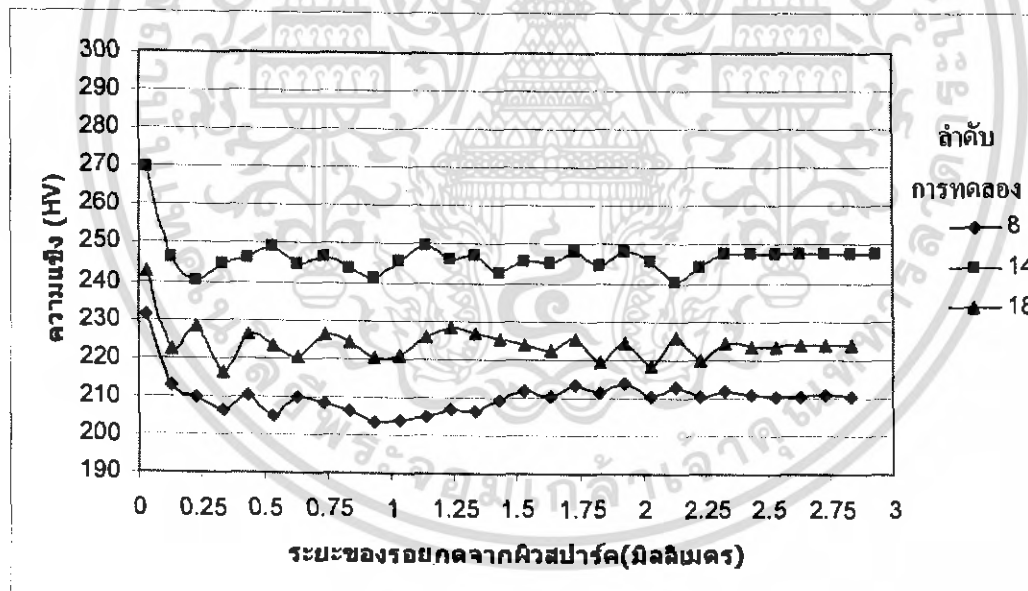
รูปที่ 4.69 แสดงความแข็งและระยะรอยกตจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 45 ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 500 แต่ค่า ON ที่ 500 และ ค่า ON ที่ 900 จะมีความแปรปรวนความแข็ง ในเชิงลึกใกล้เคียงกัน

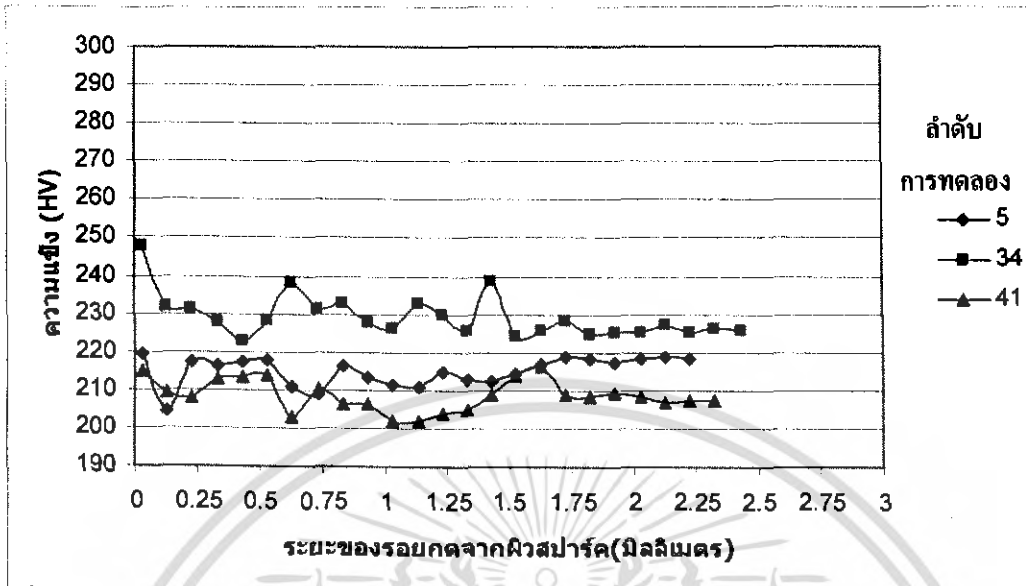


รูปที่ 4.70 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

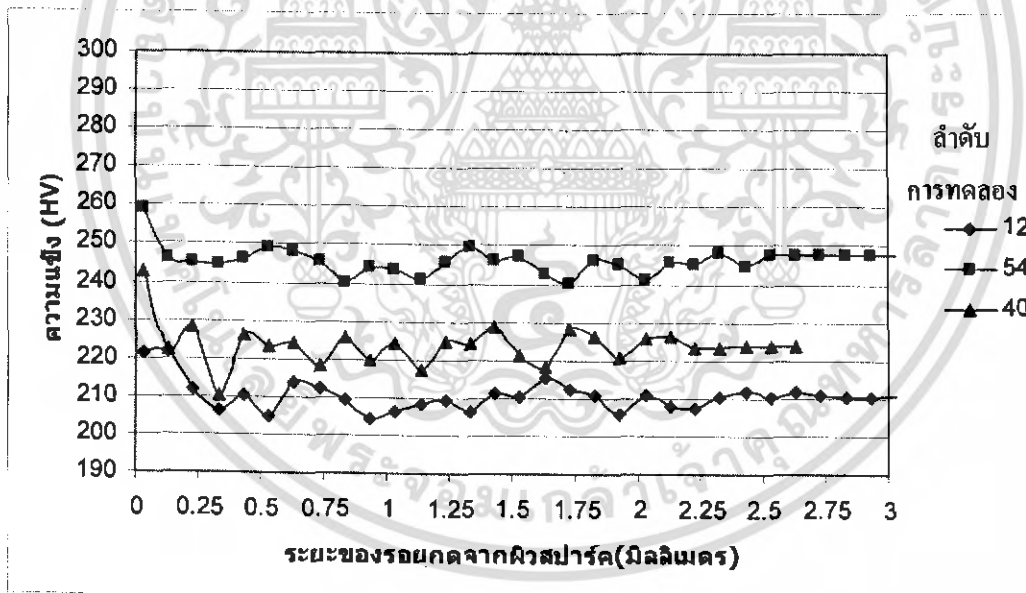


รูปที่ 4.71 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75 ON = 100 และ ON = 500 อิเล็กโทรดกราไฟท์
 ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 500
 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100

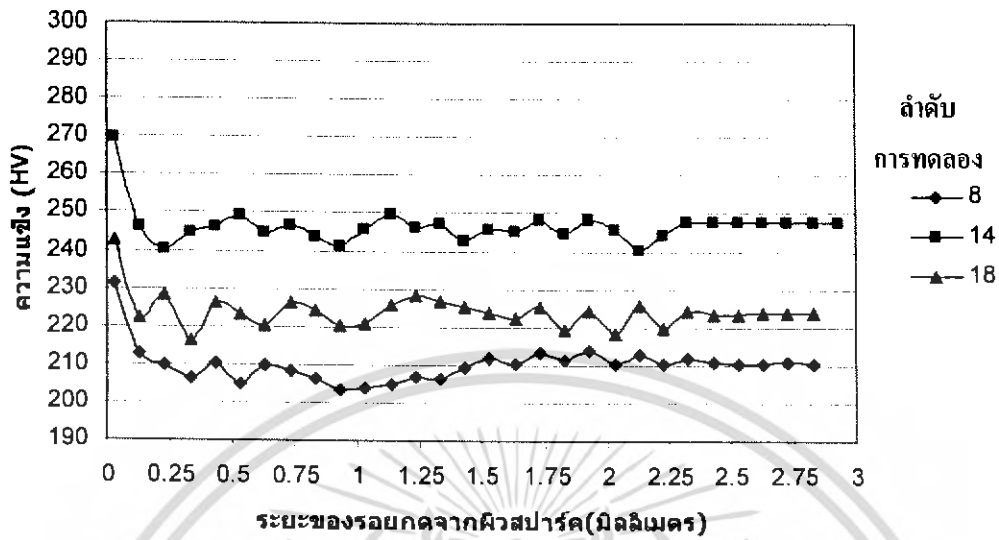


รูปที่ 4.72 แสดงความเข้มและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโตรดกราไฟท์

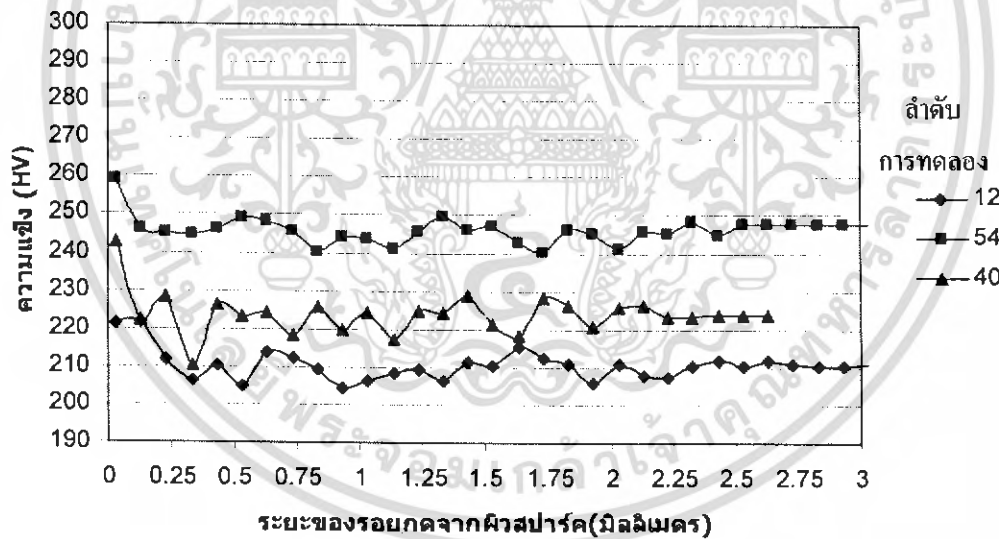


รูปที่ 4.73 แสดงความเข้มและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโตรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75 ON = 100 และ ON = 900 อิเล็กโตรดกราไฟท์
 ค่า ON ที่ 900 จะมีผลทำให้ความเข้มที่ผิวสปาร์กเกิดความเข้มขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 100 และค่า ON ที่ 900
 จะมีความแปรปรวนความเข้มในเชิงลึกมากกว่าค่า ON ที่ 100



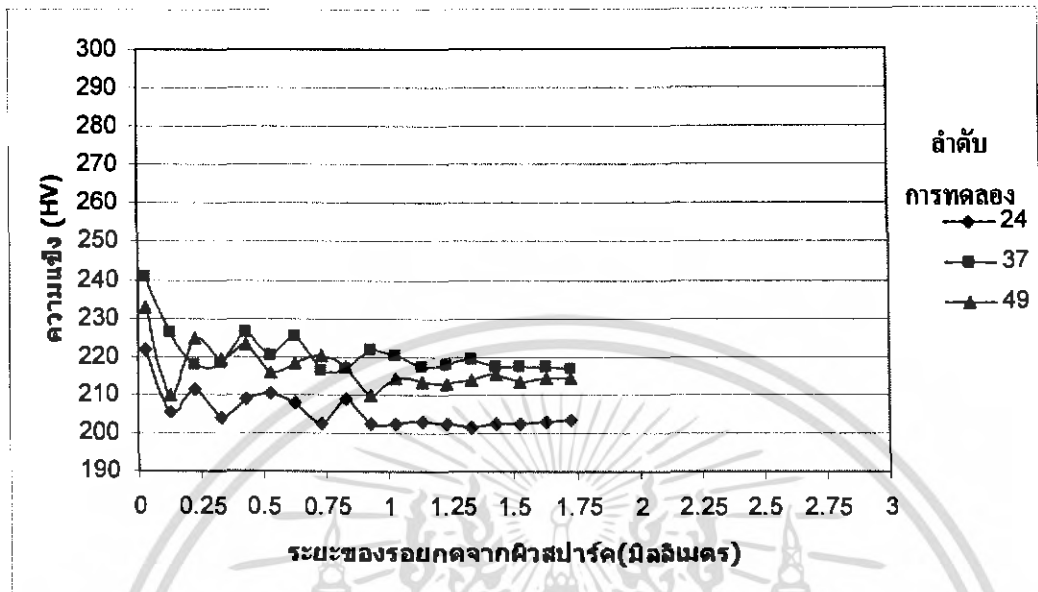
รูปที่ 4.74 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโตรดกราไฟท์



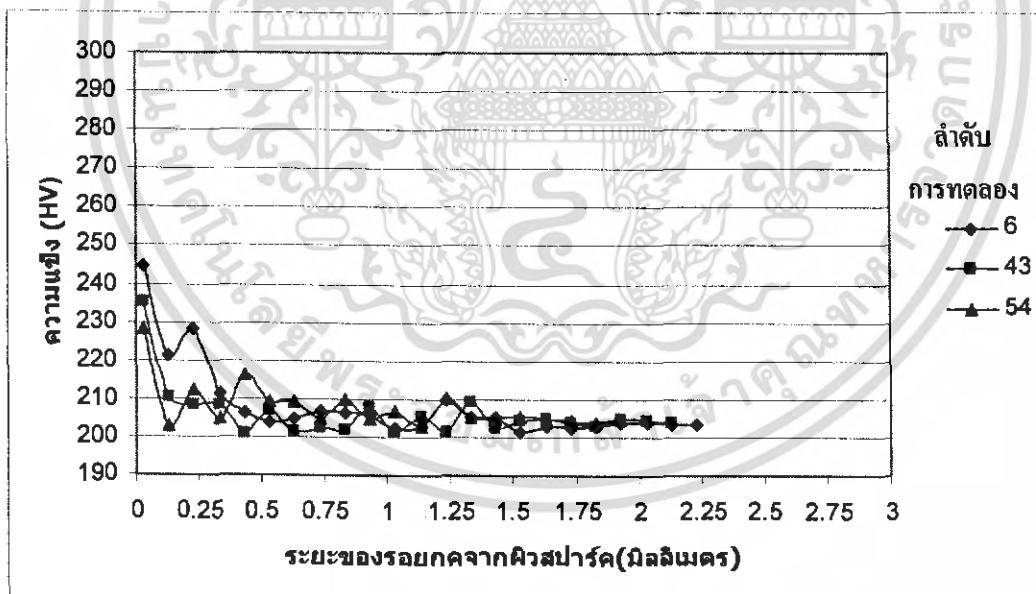
รูปที่ 4.75 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโตรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร IP คงที่ ON ต่างกันที่ IP = 75 ON = 500 และ ON = 900 อิเล็กโตรดกราไฟท์
 ค่า ON ที่ 500 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งขึ้นมากกว่าค่า ON ที่ 900 แต่ค่า ON ที่ 900 ค่า ON ที่ 500 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน

5. เปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดกราไฟท์



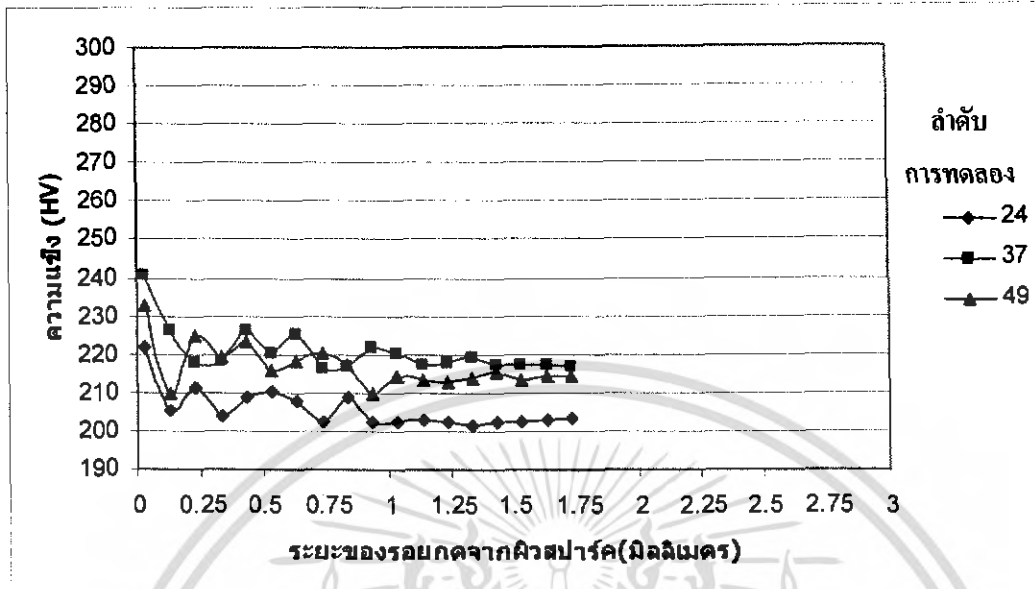
รูปที่ 4.76 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



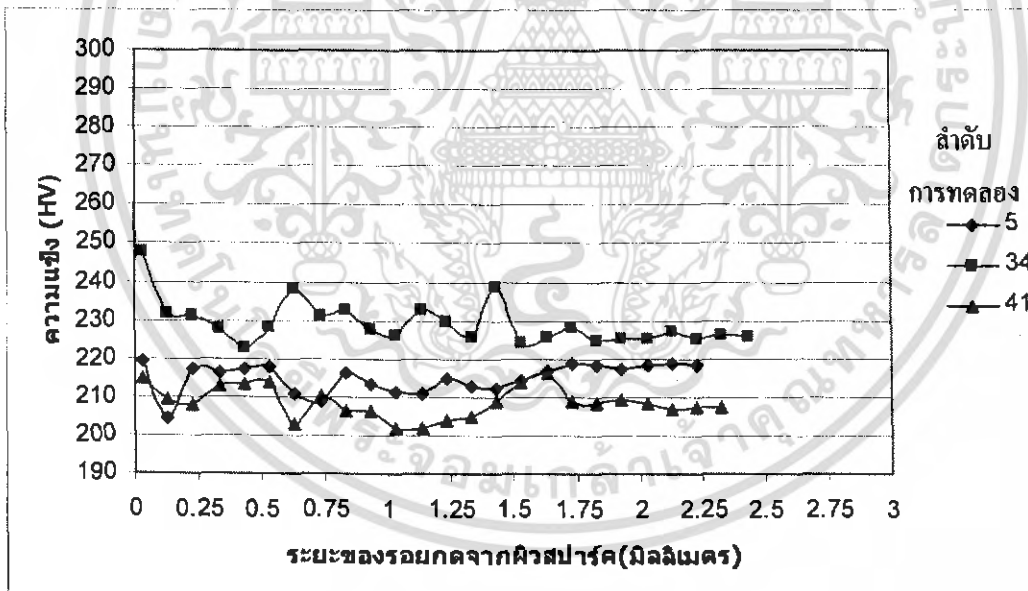
รูปที่ 4.77 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 15 และ IP ที่ 45 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งใกล้เคียงกัน แต่ค่า IP ที่ 45 ค่า จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



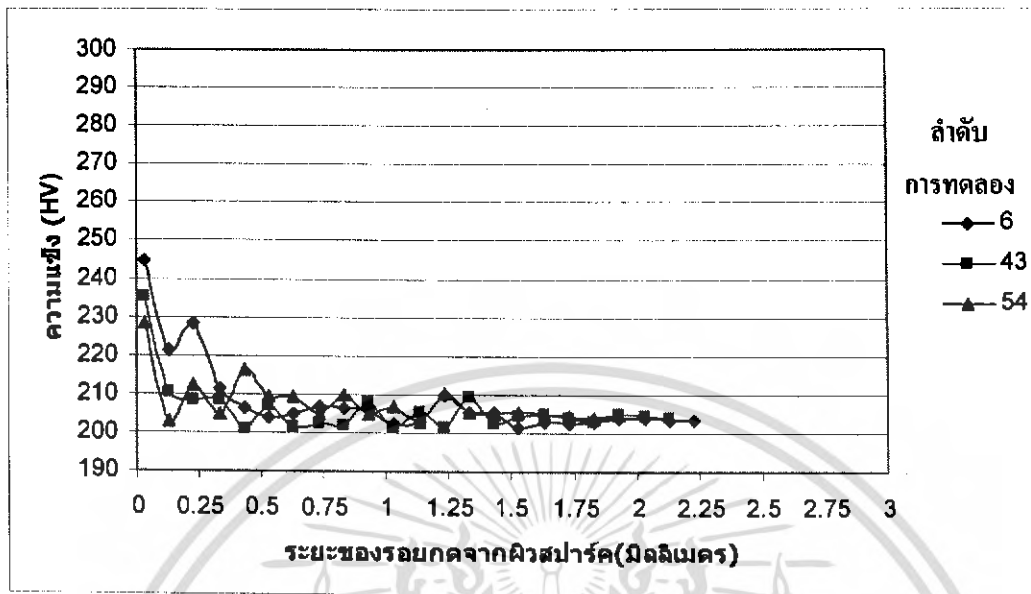
รูปที่ 4.78 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



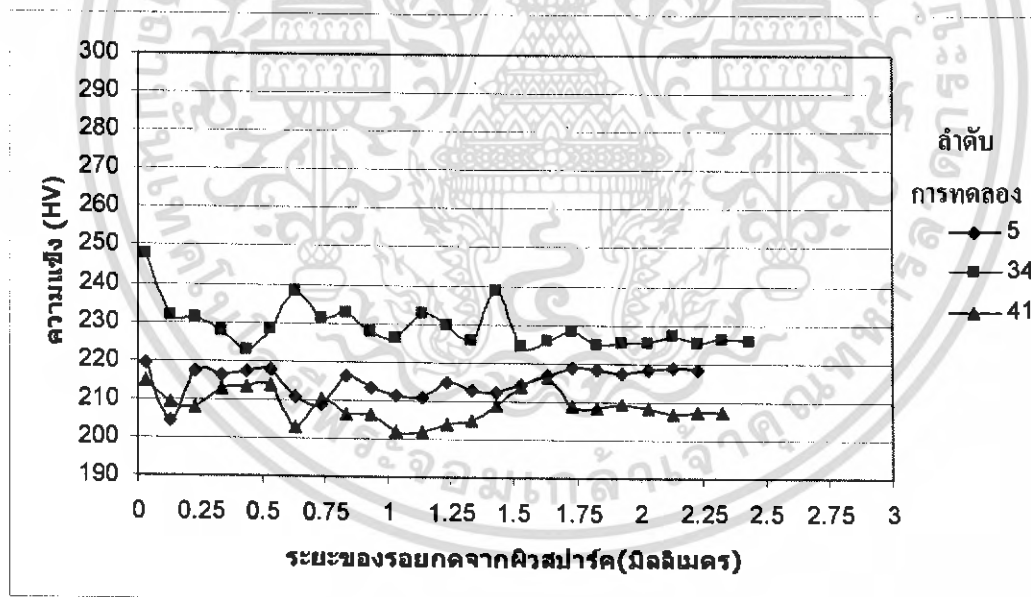
รูปที่ 4.79 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 15 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 75 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งมากกว่าค่า IP ที่ 15 ค่า และค่า IP ที่ 75 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



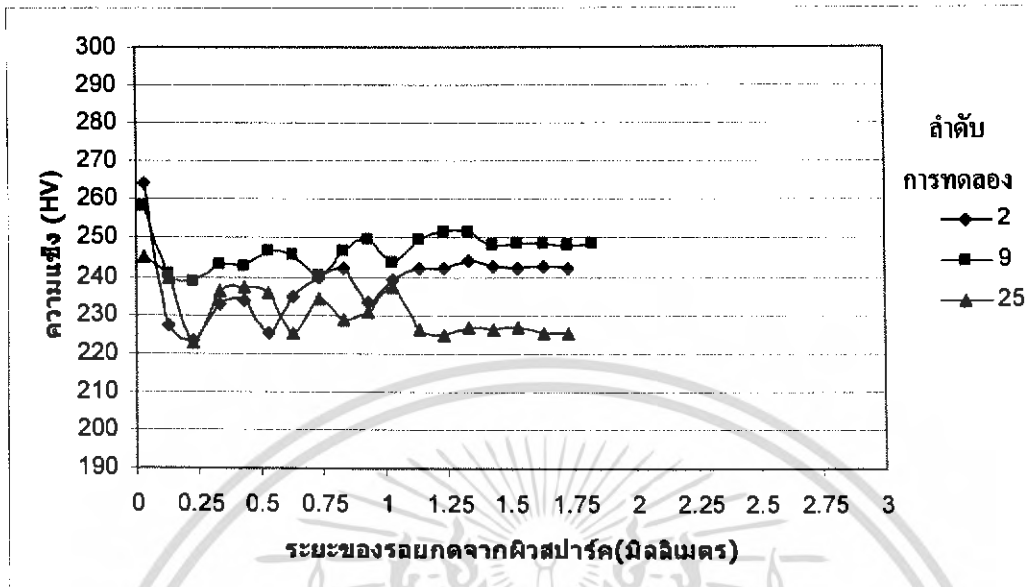
รูปที่ 4.80 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์



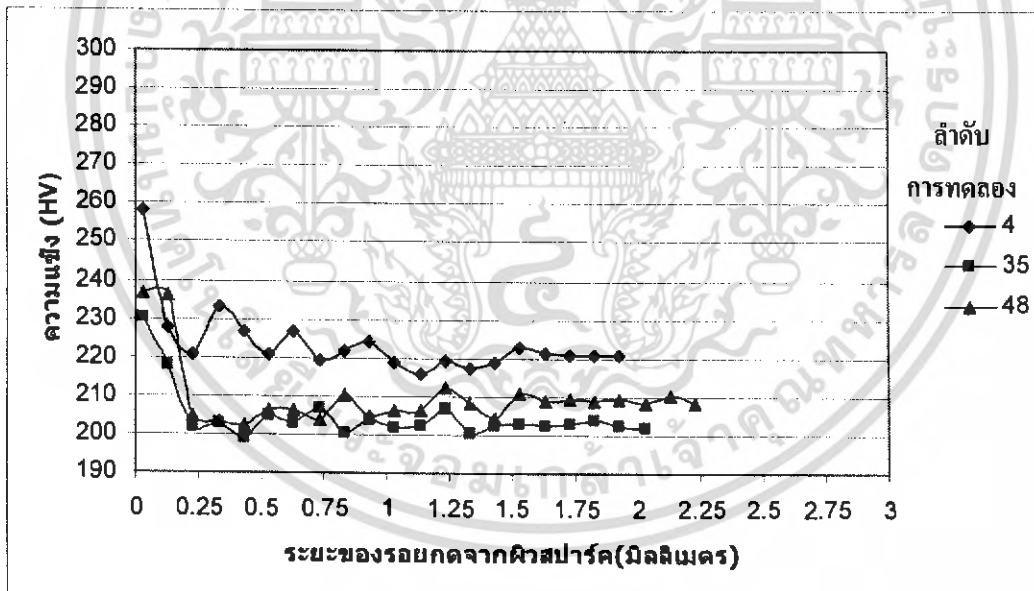
รูปที่ 4.81 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 100 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 100 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 75 และ ค่า IP = 45 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งและมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกใกล้เคียงกัน



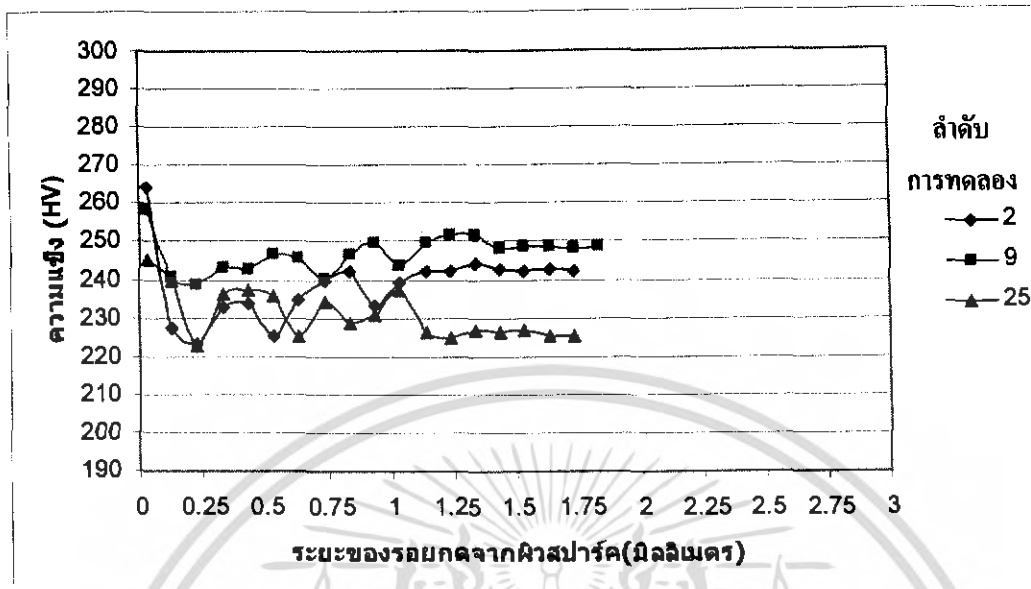
รูปที่ 4.82 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโตรดกราไฟท์



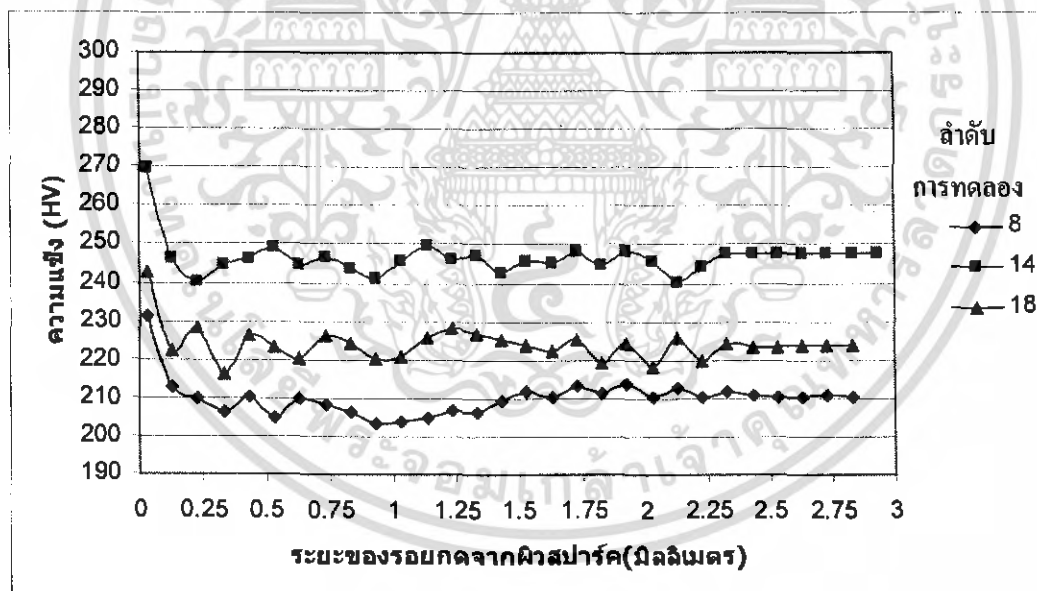
รูปที่ 4.83 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโตรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโตรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 15 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งมากกว่าค่า IP ที่ 45 ค่า แต่ค่า IP ที่ 45 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



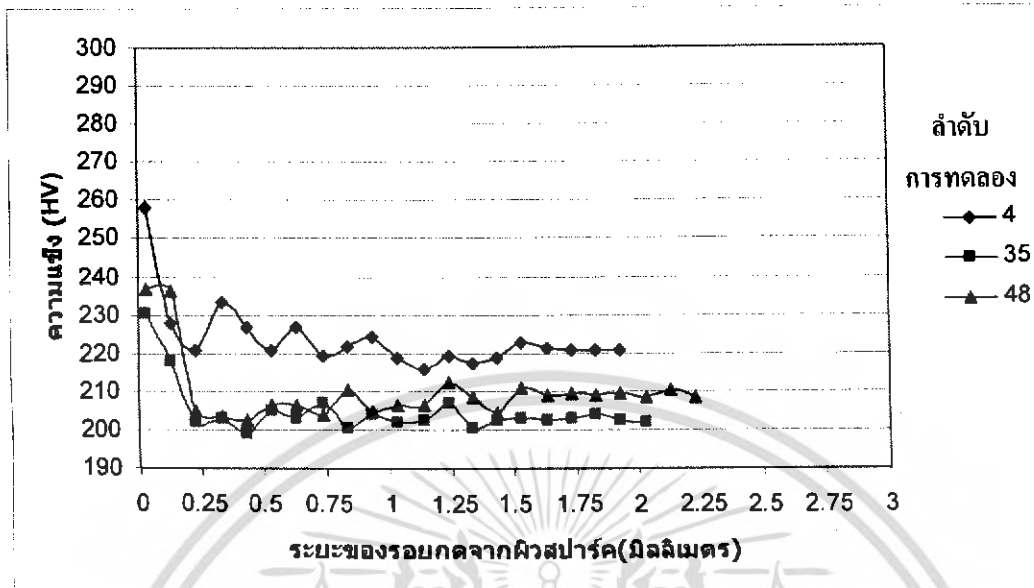
รูปที่ 4.84 แสดงความแรงและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



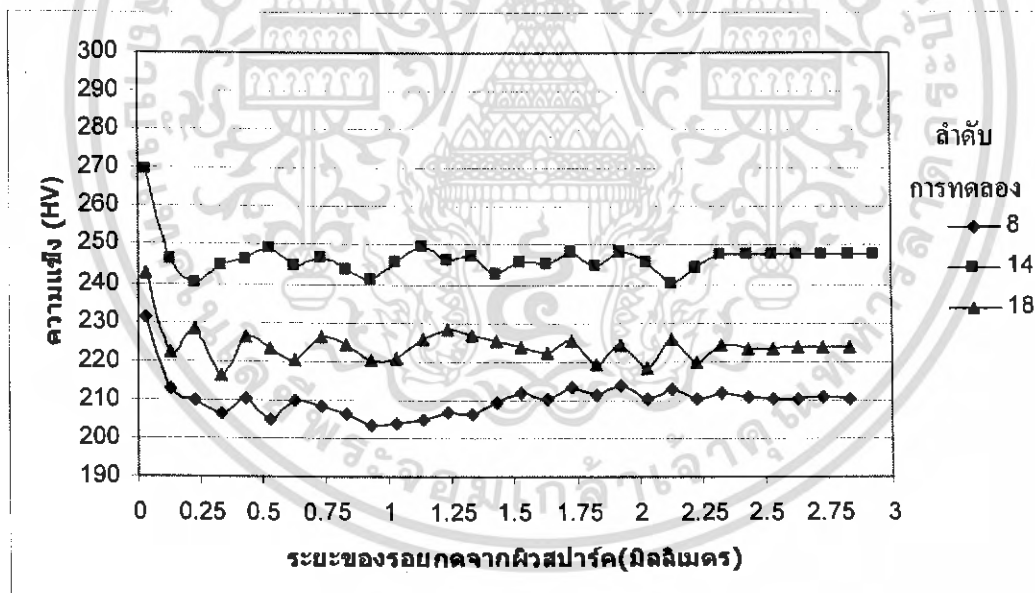
รูปที่ 4.85 แสดงความแรงและระยะรอยกุดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 15 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 75 จะมีผลทำให้ความแรงที่ผิวสปาร์กเกิดความแรงมากกว่าค่า IP ที่ 15 และค่า IP ที่ 75 จะมีความแปรปรวนความแรงในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



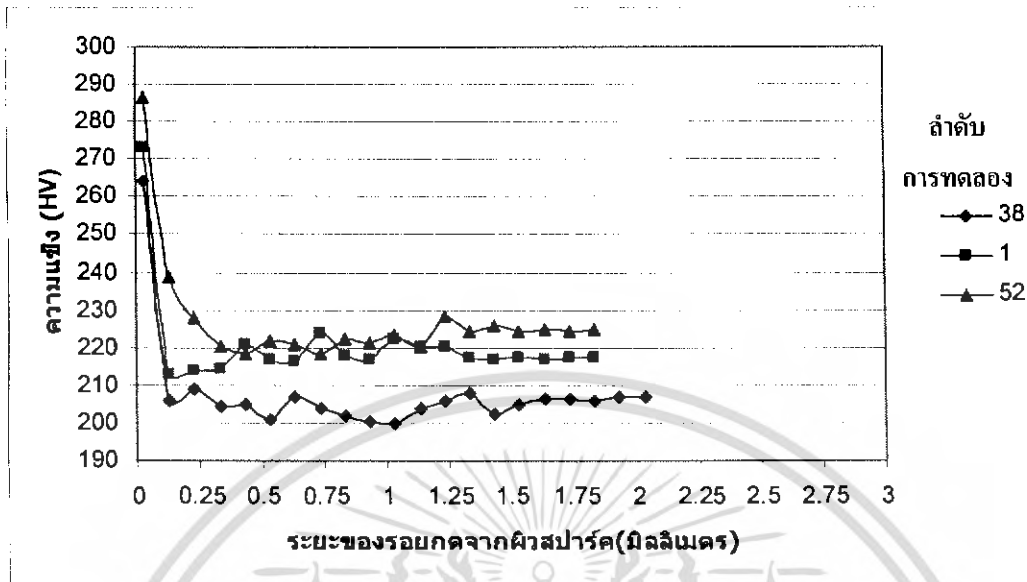
รูปที่ 4.86 แสดงความแข็งและระยะรอยกวดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์



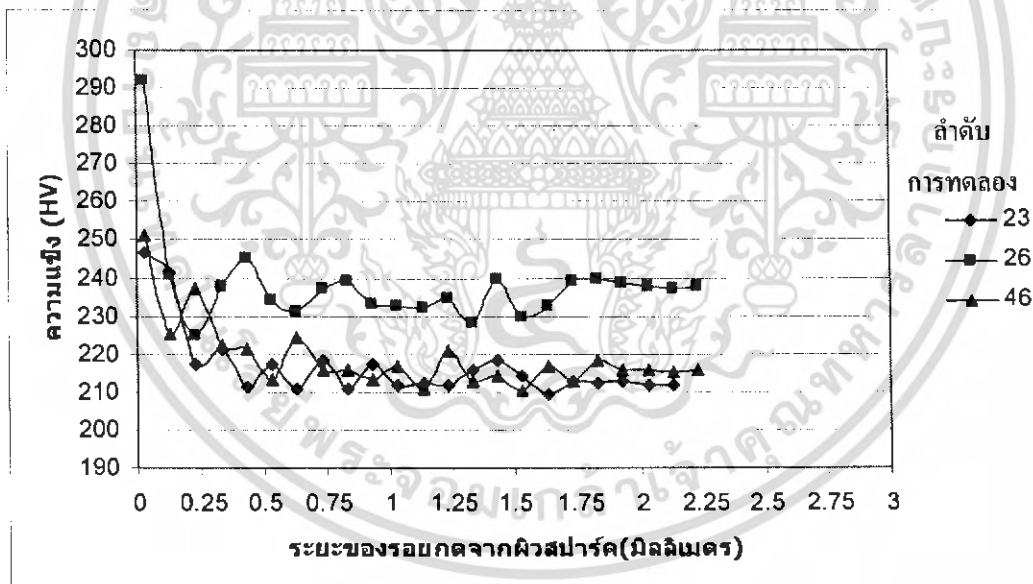
รูปที่ 4.87 แสดงความแข็งและระยะรอยกวดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 500 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 500 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 75 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งมากกว่าค่า IP ที่ 45 และค่า IP ที่ 75 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 45



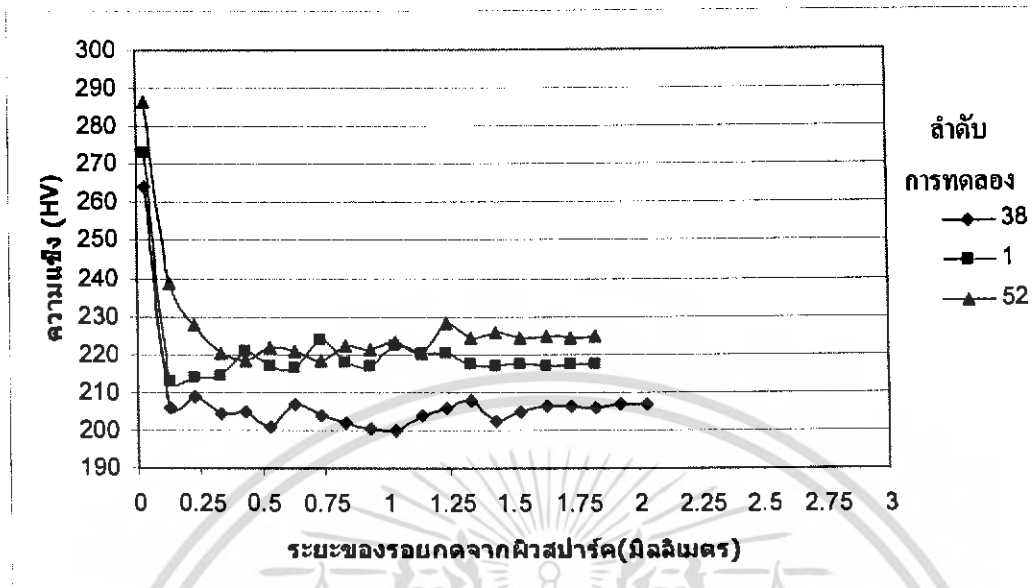
รูปที่ 4.88 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



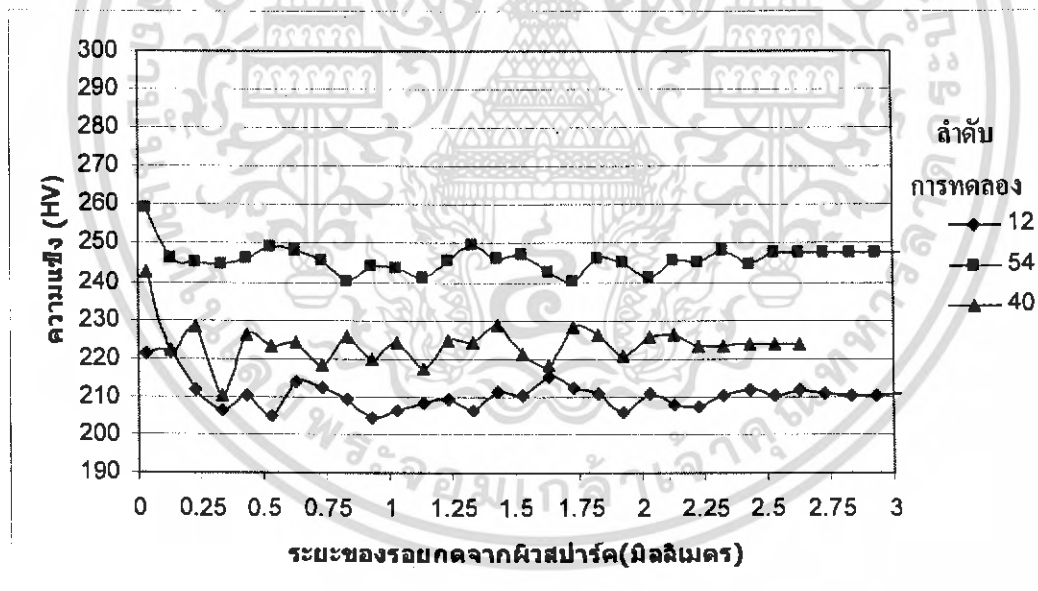
รูปที่ 4.89 แสดงความแข็งและระยะรอยกดจากผิวสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 15 และ IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 45 และค่า IP = 15 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งใกล้เคียงกันแต่ค่า IP ที่ 45 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



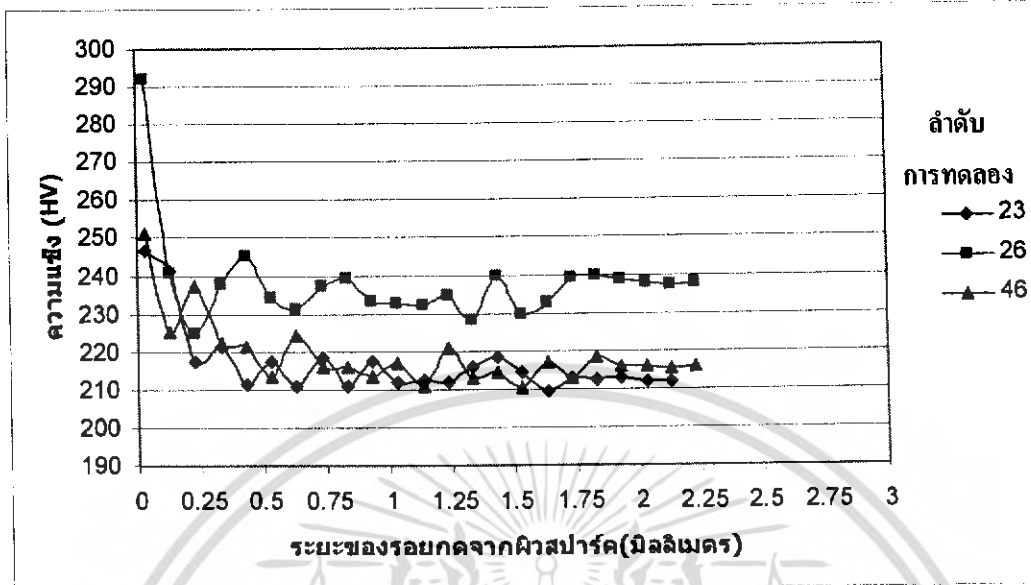
รูปที่ 4.90 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 15 อิเล็กโทรดกราไฟท์



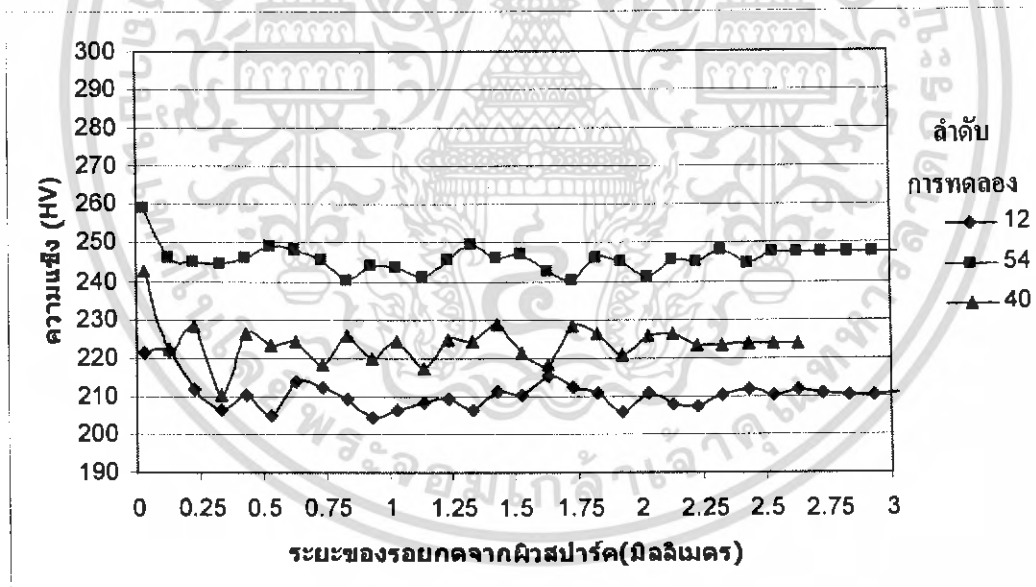
รูปที่ 4.91 แสดงความแข็งและระยะรอยกคจากผิวสปาร์คที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 15 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 15 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์คเกิดความแข็งมากกว่าค่า IP ที่ 75 แต่ค่า IP ที่ 75 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 15



รูปที่ 4.92 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 45 อิเล็กโทรดกราไฟท์



รูปที่ 4.93 แสดงความแข็งและระยะรอยกุดจากฉนวนสปาร์กที่พารามิเตอร์ ON = 900 IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปร ON คงที่ IP ต่างกันที่ ON = 900 IP = 45 และ IP = 75 อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า IP ที่ 45 จะมีผลทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งมากกว่าค่า IP ที่ 75 แต่ค่า IP ที่ 75 จะมีความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึกมากกว่าค่า IP ที่ 45

4.2 สรุปผลการเปรียบเทียบกราฟที่เงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ

1. ผลเปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP คงที่, อิเล็กโทรดต่างชนิดกัน

อิเล็กโทรดทั้งสองชนิดมีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่ อิเล็กโทรดทองแดงจะทำให้ผิวของชิ้นงานเกิดความแข็งและความแปรปรวนของความแข็งในแนวความลึกมากกว่าผิว ที่ได้จากการตัดด้วยอิเล็กโทรดกราไฟท์

2. ผลเปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรดทองแดง

ON มีผลกระทบทำให้ความแข็งที่ผิวสปาร์กเกิดความแข็งขึ้นจากการให้พลังงานแก่ชิ้นงาน ค่า ON มีผลกระทบต่อความแปรปรวนความแข็งในเชิงลึก ยิ่งค่า ON เพิ่มมากขึ้น ก็จะมีค่าแปรปรวนในลึกมากขึ้นด้วย

3. ผลเปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดทองแดง

ค่า IP มีผลกระทบต่อความแปรปรวนของความแข็ง ในเชิงลึกเนื่องจากค่า IP คือพลังงานที่ให้กับการสปาร์ก ถ้าค่า IP มากขึ้นผลกระทบในแนวลึกก็จะมากขึ้นด้วย

4. ผลเปรียบเทียบที่ ON ต่างกัน, IP คงที่, อิเล็กโทรดกราไฟท์

ค่า ON มีผลกระทบต่อความแปรปรวนของความแข็งในแนวความลึกเนื่องจากเวลาในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการสปาร์กยิ่งมากความร้อนจะเข้าไปในชิ้นงานลึกมากขึ้น

5. ผลเปรียบเทียบที่ ON คงที่, IP ต่างกัน, อิเล็กโทรดกราไฟท์

ผลกระทบในแนวลึก ถ้า IP มีค่ามากผลกระทบในแนวลึกก็จะมากขึ้นไปด้วย เนื่องจากถ้าพลังงานมากก็จะถ่ายเทเข้าไปในชิ้นงาน ได้ลึกมากขึ้น จึงทำให้ความแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลง

ในทุกกรณีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค เนื่องจากกรรมวิธีตัดที่เดิมซึ่งทำให้เกิดความร้อนสูงในขณะที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานและความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อสารไดอิเล็กทริกไหลผ่านบริเวณที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน หรือ อาจเกิดจากการแพร่ของคาร์บอนในสารไดอิเล็กทริกเข้าไปในขณะที่ทำการตัดขึ้นรูป

สาเหตุที่ทำให้ความแข็งของชิ้นงานมีความแข็งไม่เท่ากันที่ผิวแปรในการขึ้นรูปเดียวกันอาจเนื่องจากการที่นำชิ้นงาน ไปตัดเพื่อเตรียมทดสอบความแข็งอาจมีความเค้นตกค้างที่ผิวบริเวณที่ผ่านการตัด เมื่อนำชิ้นงานไปทำการขัดผิวให้เรียบเพื่อที่จะทำการทดสอบความแข็ง การขัดผิวไม่สามารถขจัดชั้นของความเค้นตกค้างออกไปได้หมดทำให้มีความเค้นตกค้างเหลืออยู่ในปริมาณที่ต่างกันขึ้นอยู่กับระดับความลึกที่ขัดลงไปและมีผลในการทดสอบความแข็งทำให้ความแข็งของชิ้นงานไม่เท่ากัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สำหรับการทดลองและการวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อความแข็งของชิ้นงาน เหล็กกล้าเครื่องมือ DC 53 ที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining) เพื่อทำการศึกษาผลกระทบต่อความแข็งขณะที่ทำการเปลี่ยนระดับตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง เพื่อนำผลที่ได้ไปปรับใช้กับการขึ้นรูปแม่พิมพ์ ด้วยวิธีการตัดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม จะทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของวัสดุ และแม่พิมพ์ที่นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงมักใช้การขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็ม ซึ่งกรรมวิธีอีดีเอ็มอาจส่งผลกระทบทำให้วัสดุที่ทำแม่พิมพ์มีประสิทธิภาพการใช้งานลดน้อยลงจากความแข็งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของ “การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีผลกระทบต่อความแข็งของเหล็กกล้าเครื่องมือ DC53 ที่ผ่านกรรมวิธี EDM”

จากการทดลองได้กำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้ค่า ON มี 3 ระดับ 100 500 และ 900 μsec ค่า IP มี 3 ระดับ 15 45 และ 75 A อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ อิเล็กโทรดกราไฟท์และอิเล็กโทรดทองแดง ในการทดลองนี้แต่ละเงื่อนไขการตัดได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 54 ครั้ง การทดลองได้นำผลการทดสอบความแข็งมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความแข็งกับความลึก และวิเคราะห์ผล โดยการเปรียบเทียบกราฟ

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลจากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่เลือกมาทำการทดลองทุกตัวมีผลกระทบทำให้ความแข็งของชิ้นงานเปลี่ยนไป โดยอิเล็กโทรดทองแดงจะส่งผลกระทบต่อความแข็งชิ้นงานมากกว่าอิเล็กโทรดกราไฟท์ เนื่องจากอิเล็กโทรดทองแดงนำไฟฟ้าได้ดีกว่า IP จะมีผลทำให้ค่าความแข็งมีความแปรปรวนในแนวลึกมากขึ้น ถ้าค่า IP เพิ่มมากขึ้น ค่า ON มีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นดังนั้นกรรมวิธีอีดีเอ็มทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนจากกรรมวิธีอีดีเอ็ม ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกระบายอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในลักษณะของการชุบแข็ง อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวงานเพิ่มขึ้นคือ การสปาร์กทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์บอนในสารไดอิเล็กตริกแทรกเข้าไปในผิวงานทำให้เกิดความแข็งเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอสำหรับการวิจัยงานอีดีเอ็ม

ควรตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุเพื่อดูความสัมพันธ์กับความแข็งของวัสดุ ที่เปลี่ยนไปรวมทั้งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงของความแข็งขึ้น

หนังสืออ้างอิง

- ก่อพงษ์ พ่วงรอดพันธ์ และ ดาวร ชาปัญญา, 2546. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอาร์คด้วยไฟฟ้า. ปรินูญานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 10 – 15, 23 – 40.
- ชาญวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ ศาโรช จูติเกียรติพงศ์, 2533. วัสดุในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : หจก.เอส – เอน การพิมพ์
- จักรินทร์ จงสวัสดิ์, โชคชัย ยาหะ และ สาคร สุบิน, 2543. อิทธิพลของการแปรค่าพารามิเตอร์ต่อคุณสมบัติของงานด้วยกระบวนการกัดเจาะด้วยไฟฟ้า. ปรินูญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 4 – 57.
- ทวีป จีระประดิษฐ, 2538. การศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 8 - 45
- ปัญญารัตน์ วงษ์ราษฎร์, กฤษดา เหล่าจันทร์ และ ภาคกร ดวงมณี, 2545. ผลของการแปรค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกัดเจาะด้วย EDM ต่อสมบัติงาน. ปรินูญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 1 – 27.
- พรศักดิ์ อรรถวานิช, 2546. โลหการวิศวกรรม, 500. เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา, 2546. วัสดุวิศวกรรม, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.
- Geoffrey Boothroyd, and Winston A. Knight, 1989. Fundamentals of Machining and Machine Tools. 2nd ed. New York : Marcel Dekker, pp. 491 – 497.
- Hassan El-Hofy, 2005. Advanced Machining Processes : Nontraditional and Hybrid Machining Processes. New York : McGraw-Hill Professional, pp. 115 – 129.
- Inoue, K., 1977. Fundamentals of Electrical Discharge Machining. Tokyo, The Society of Non – Traditional Technology, pp. 70 – 95.
- Metals Park, 1989. Metals Handbook. volume 16, machining, American Society for Metals, OH : ASM International, pp.557 – 564.
- Steve F. Krar, Arthur R. Gill, and Peter Smid, 2005. Technology of Machine Tool. 4th ed. Boston : McGraw-Hill, pp.831 – 836.
- Taylor Lyman, 1967. Metals Handbook. Vol.3, machining, Editor Ohio : American Society for Metals, pp. 227 – 230.



ภาคผนวก ก.
วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม

วิธีการใช้เครื่องอีดีเอ็ม

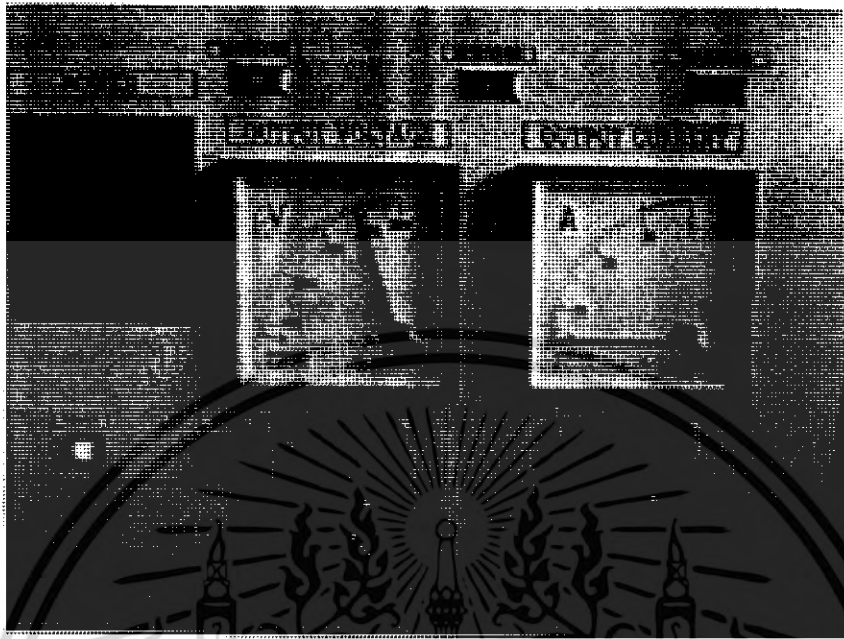


รูปที่ ผก 1 ภาพเครื่องอีดีเอ็มยี่ห้อ Sodick รุ่น AQ35L

วิธีการใช้เครื่องอย่างง่าย ได้ทำการแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

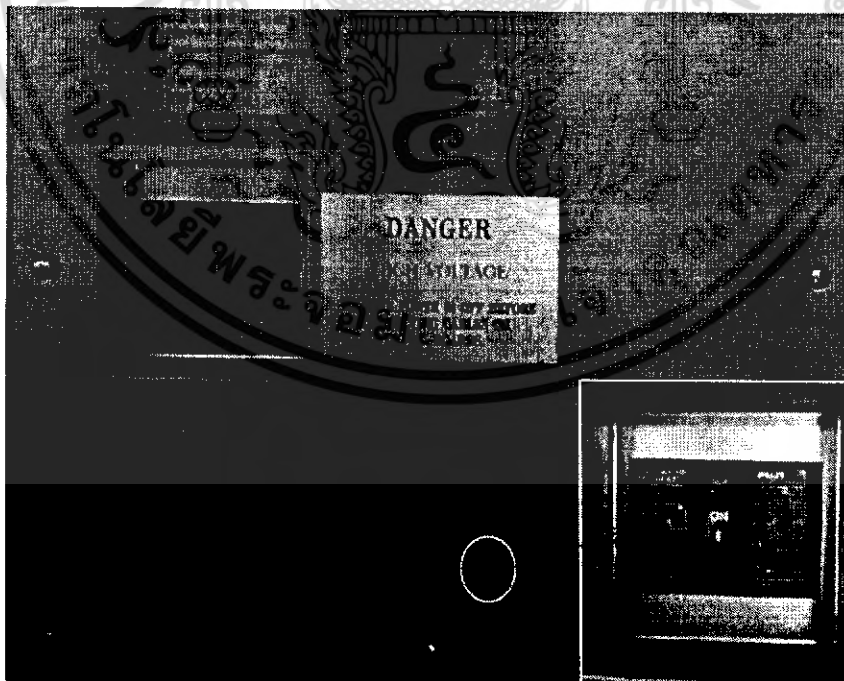
- 1 การเปิดเครื่อง
- 2 การติดตั้งชิ้นงานและการเซตศูนย์ชิ้นงาน
- 3 การป้อน โค้ดต่างๆและการเริ่มทำงาน
- 4 การถอดชิ้นงานและการปิดเครื่อง

1. การเปิดเครื่อง



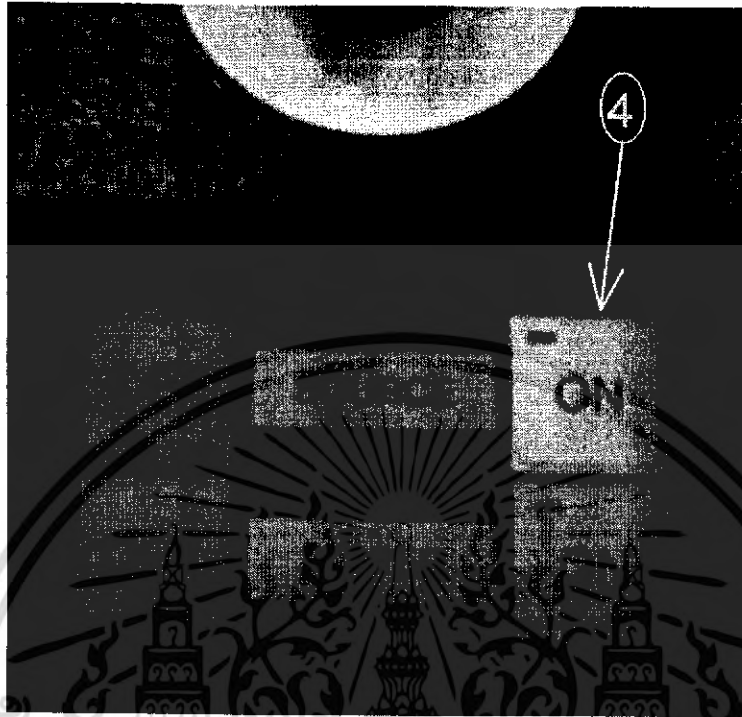
รูปที่ ผก 2 รูปหน้าปิดต่างๆของเครื่องแปลงไฟ

1.1 เปิดสวิตช์หมายเลข 1 จากนั้นกดปุ่ม RESET หมายเลข 2 ในรูปที่ ผก 2



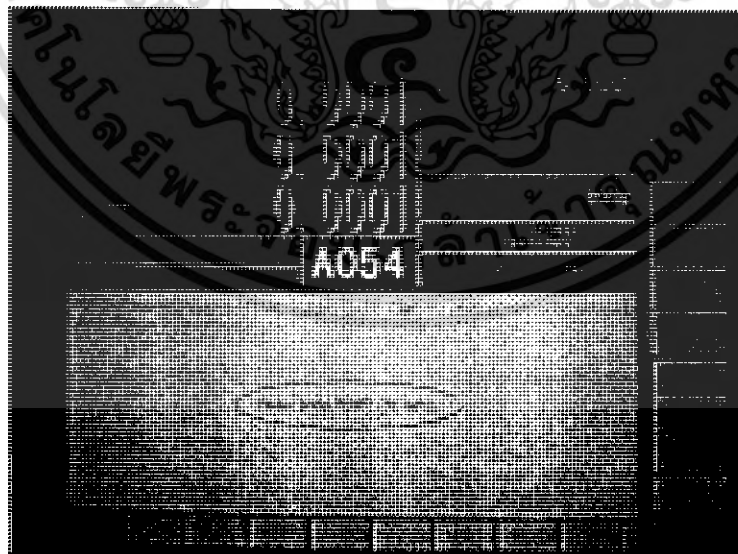
รูปที่ ผก 3 สวิตช์ด้านหลังเครื่องอีดีเอ็ม

1.2 เปิดสวิตช์หมายเลข 3 ดังรูปที่ ผก 3



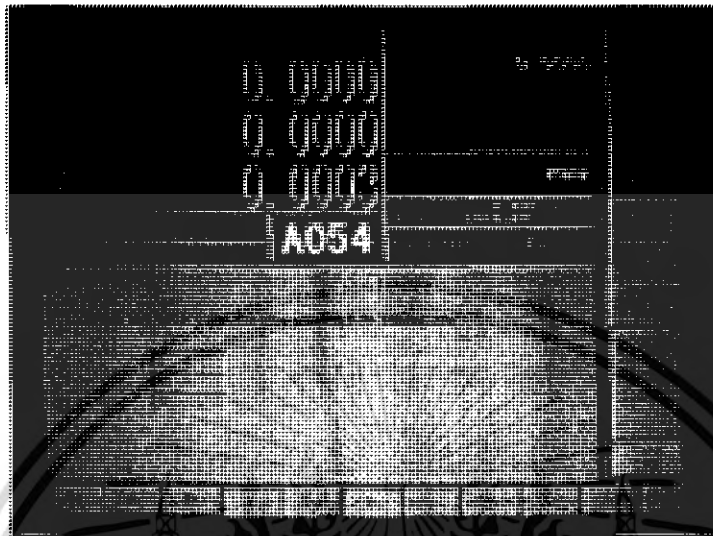
รูปที่ ผก 4 แสดงปุ่มเปิดเครื่อง

1.3 กดปุ่ม SOURCE ON หมายเลข 4 ดังในรูปที่ ผก 4



รูปที่ ผก 5 แสดงหน้าจอหลังจากเปิดโปรแกรมของเครื่อง

1.4 หน้าจอจะแสดงคำสั่ง Please Press Power On Switch ให้ทำการกดปุ่ม POWER ON สีเขียวในรูปที่ ผก 5 เพื่อเปิดในส่วนของแมคคานิค



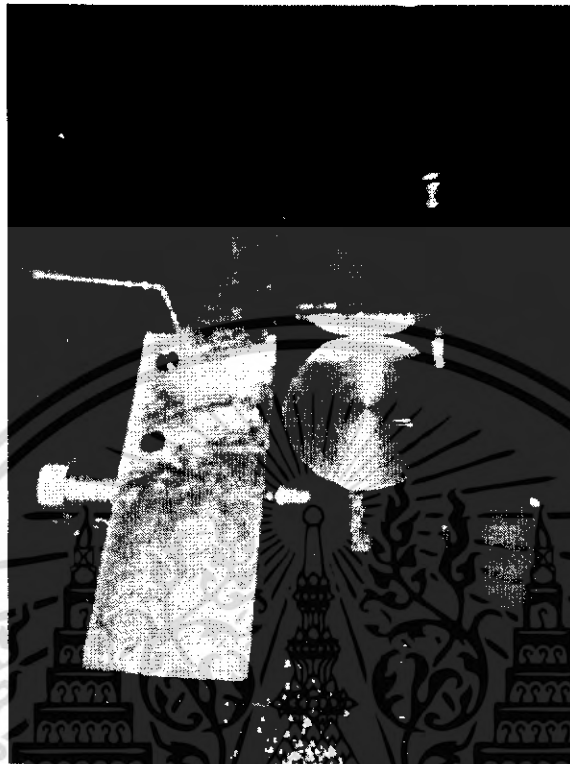
รูปที่ ผก 6 แสดงภาพหน้าจอหลังจากเปิดระบบแมคคานิค

1.5 เมื่อเห็นหน้าจอดังรูปที่ ผก 6 ให้กดปุ่ม ENT สีเขียวหมายเลข 5 ในรูปที่ ผก 7 เพื่อเครื่องจะทำการตรวจสอบความพร้อมก่อนการใช้งาน



รูปที่ ผก 7 แสดงปุ่มควบคุมต่างๆ

2. การติดตั้งชิ้นงานและการเชตศูนย์ชิ้นงาน

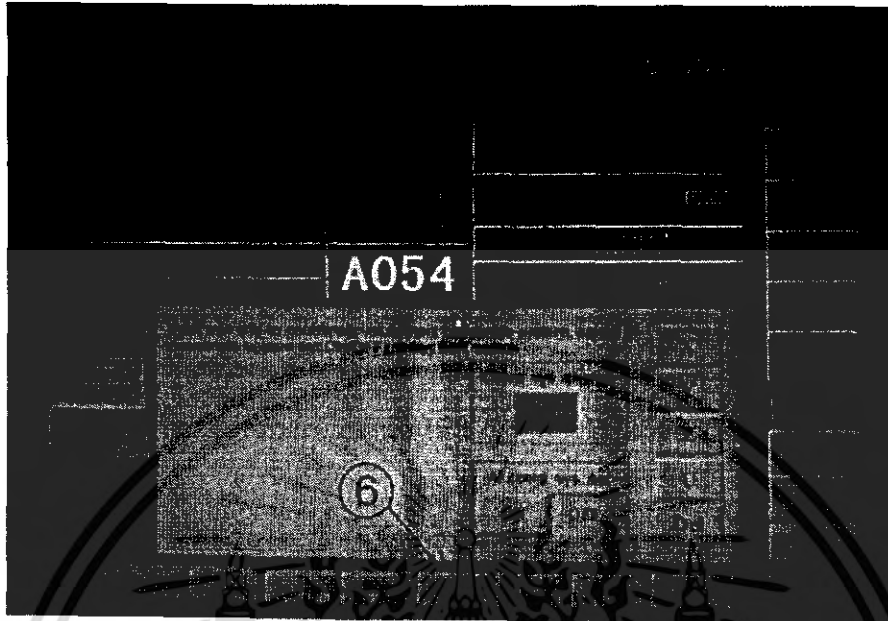


รูปที่ ผก 8 แสดงการติดตั้งชิ้นงาน



รูปที่ ผก 9 แสดงการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ทำการติดตั้งชิ้นงานดังรูปที่ ผก 8 และติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์บอร์ดดังรูปที่ ผก 9



รูปที่ ผก10 แสดงหน้าจอพร้อมใช้งานหลังจากเปิดเครื่อง

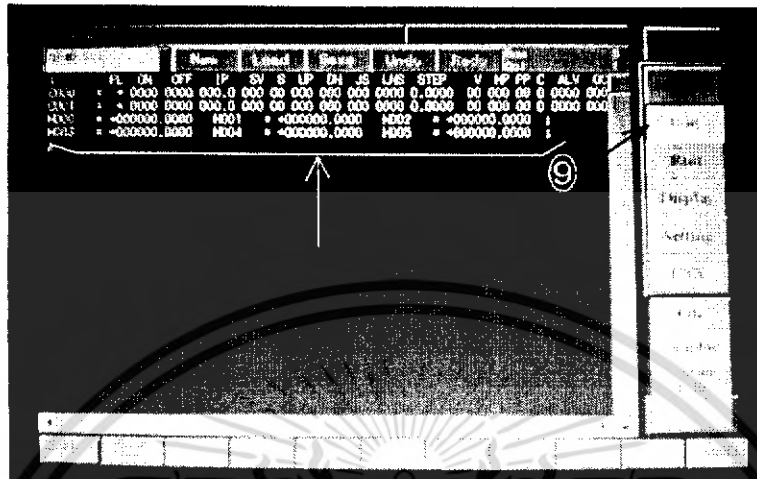
2.3 เลือกปุ่ม Appr Face หมายเลข 6 ในรูปที่ ผก 10 เพื่อทำการเชคศูนย์ชิ้นงาน



รูปที่ ผก 11 แสดงหน้าจอของ Appr Face

3. การการป้อนโค้ดต่างๆและการเริ่มทำงาน

3.1 เลือกแถบเมนู EDIT ด้านขวาของจอ ดังหมายเลข 9 ในรูปที่ ผก 14



รูปที่ ผก 14 แสดงหน้าต่าง EDIT

3.2 ทำการป้อนตัวแปรต่างๆที่ใช้งานบริเวณเหนือเส้นหมายเลข 10 และจีโค้ดเอ็มโค้ดที่ใช้งานได้เส้นหมายเลข 10 ในรูปที่ ผก 14 โดยจะมีโค้ด ที่สำคัญในการใช้งาน 2 ตัวด้วยกัน

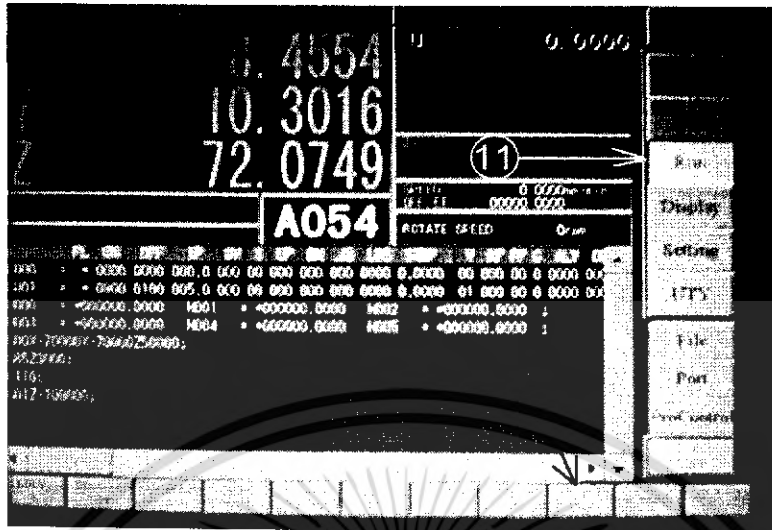
3.2.1 โค้ดที่ใช้ในการกำหนดเวลาตัดชิ้นงาน G85 ลักษณะการใช้ G85 Z3000 ที่ Z3000 คือตัดชิ้นงานในแนวแกน Z 30 นาที

3.2.2 โค้ดที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน G01 ลักษณะการใช้ G01 Z-90000 ที่ Z-90000 คือทำการตัดชิ้นงานในแนวแกน Z ไปในทิศทางลบ (-) เป็นระยะทาง 9 มิลลิเมตร ในโปรแกรมนี้ตั้งค่า Z ไว้ที่ -9, -14, -19 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการตัดชิ้นงานทะลุ โคนแท่นรองรับ

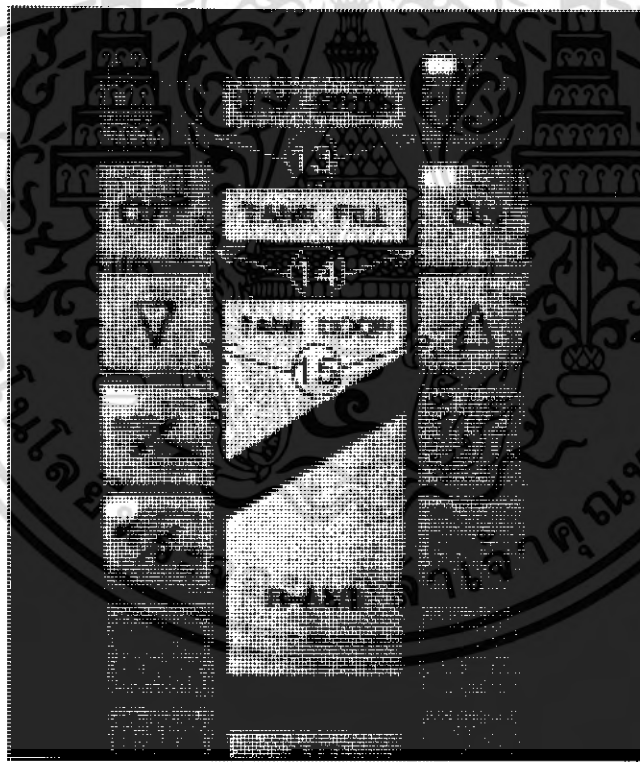
หมายเหตุ การใช้โค้ดG85 ร่วมกับโค้ด G01 G02 G03 เครื่องจะทำการหยุดตัดงานเมื่อทำงานครบข้อกำหนดของโค้ดใดโค้ดหนึ่งก่อน

3.3 นำแท่งค้ำขึ้น โดยการป้อนหมายเลข 15 ที่อยู่ทางขวามือ ในรูปที่ ผก 16

3.4 กดปุ่ม หมายเลข 13 และ 14 ตามลำดับในรูปที่ ผก 16 เพื่อทำการปิดวาล์วระบายสารทิ้ง และเปิดให้สารไดอเล็กทริกเข้ามาในแท่งค้ำ



รูปที่ ผก 15 แสดงหน้าต่าง RUN



รูปที่ ผก 16 ปุ่มควบคุมต่างๆ

3.5 เลือกเมนู RUN ที่ด้านขวาของจอ ค้างหมายเลข 11 ในรูปที่ ผก 15

3.6 เลือกปุ่ม START G30 หมายเลข 12 ในรูปที่ ผก 15 แล้วกดปุ่ม ENT หมายเลข 5 ในรูปที่ ผก 7 หลังจากนั้นเครื่องจะเริ่มทำงาน

4 การถอดชิ้นงานและการปิดเครื่อง

4.1 หลังจากทำการสปาร์กเสร็จ ให้ทำการกดปุ่ม OFF TANK FILL หมายเลข 14 ตามด้วย OPEN TANK DRAIN หมายเลข 13 และเมื่อน้ำมันลระดับจนแห้งกดปุ่ม TANK DOOR หมายเลข 15 ในรูปที่ ผก 16 เพื่อเอาแทงต์ลง

4.2 ทำการถอดชิ้นงาน และอิเล็กทรอนิกส์ออกจากเครื่อง

4.3 ทำการปิดระบบแมคคานิค โดยการกดปุ่ม POWER OFF

4.5 ปิดโปรแกรม โดยการกดปุ่ม SOURCE OFF

4.6 ทำการปิดสวิทช์ด้านหลังของเครื่องตามลำดับ





ภาคผนวก ข
ใบแสดงส่วนผสมของวัสดุ



JAMES COPPELL LEE

20 Merri Concourse
Campbellfield 3061
Phone: 03 9357 9613
Fax: 03 9357 9608

E-mail: sales@jacopplee.com
www.jlcopperalloys.com

INSPECTION REPORT

CUSTOMER: NGECK SENG CHIANG METAL CO.LTD.

DATE: 21/09/2004

ORDER No	ALLOY No	DESCRIPTION	SIZE	QYT
MN - ID1061	J47Z Cr, Zr, Cu.	Extruded & Drawn	1/2" Dia	500 Kgs

MECHANICAL PROPERTIES

SPEC:	CONDUCTIVITY I.A.C.S.	HARDNESS H.R.B.
BATCH No. 1/2" Dia	84 - 88 I.A.C.S.	78 - 84 HRB

CHEMICAL COMPOSITION

	Cu	Cr	Zr	P	Mn	S	Zn	N	A	P	S	Fe	Si
SPEC:	Bal	.5	0.03										
BATCH No. 1/2" Dia	Bal	.70 - .96	.031 - .042										

Paul McMaster.

INSPECTION CERTIFICATE

(NIPPON)

Messrs: NIPPON STEEL CO., LTD. Date: APR., 15, 2005 Packing List No: 4-53

Customer No: AC4NG1250001 Condition: SPHEROIDIZED ANNEALED

Bundle No.	Type of Steel	Heat No.	Quantity		Length (M)	P' ce	Weight (KGS)	Body Hardness (H)	
			Size (MM)	MM					
11	DC53	NC881	DIA	6	2.670-4.900	44	868	223	
Items	Chemical Composition								
	C %	CR %	MO %	%	%	%	%	%	
Unit	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Speci- fication	Mechanical Properties (Type of Specimen)								
Heat No	NC881	98	815	1.94	Yield Strength	Tensile Strength	Elon- gation of Area	Reduction of Area	Impact Value
					%	%	%	%	kgfm/cm ²

Kawasaki Plant. Chief of Quality Assurance Section

★ Daido Steel Co. Ltd.

T. Sugiura

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