



**เครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวดโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม**  
**SURFACE ROUGHNESS OF CNC WIRE CUT EDM**

โดย

นาย ประวิตร สวัสดิรักษ์  
น.ส. ยุพารณ์ นวลเพ็ญ  
นาย วงศ์วสุ สันติวราคม

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ทวี เทศเจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

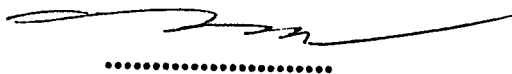
032747

ปีการศึกษา 2536  
เครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวดโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม  
CNC WIRE CUT EDM

โดย

1. นาย ประวิตร สวัสดิรักษ์
2. น.ส. ยุพาภรณ์ นวลเพ็ญ
3. นาย วงศ์วสุ สันติวาราคม

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. ทวี เทศเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032747

# สารบัญ

เรื่อง	หน้าที่
บทคัดย่อ	(1)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เครื่องมือกล	7
บทที่ 3 การใช้เครื่อง EDM	10
บทที่ 4 ความรู้พื้นฐานของการขึ้นรูปด้วยวิธีการสปาร์ค	12
บทที่ 5 โครงสร้างของเครื่อง EDM	40
บทที่ 6 ปรากฏการณ์พิเศษที่พบเห็นในการสปาร์ค	48
บทที่ 7 MACHINING PROCUDRES AND SURFACE CHARACTERIZATION	59
บทที่ 8 HIGH SPEED PULSE DISCRIMINATION FOR REAL-TIME EDM ANALYSIS	73
บทที่ 9 การทดลองและผลการทดลอง ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้เขียนในเครื่อง wire cut EDM	89
เอกสารอ้างอิง	132
กิตติกรรมประกาศ	134
	135

## เครื่องตัดโลหะด้วยเส้นลวดโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม

ประวิตร สวัสดิ์รักษ์.  
 ยุพาภรณ์ นวลเพ็ญ  
 วงศ์วสุ สันติวาราคม  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ทวี เทศเจริญ  
 ปีการศึกษา 2536

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่อง wire cut EDM และผลของการตัดโลหะด้วยเครื่องตัดชนิดนี้ แต่เนื่องจากในการใช้เครื่องตัดประเภทนี้จะมีการตั้งค่าของพารามิเตอร์หลายค่า ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีผลต่อความหยาบละเอียดของชิ้นงานที่ทำการตัด และในการทดลองนี้เราจะมีควมสนใจในพารามิเตอร์แต่เพียงค่าของกระแสที่ไหลในเส้นลวดเพื่อใช้ในการตัดเท่านั้น ส่วนพารามิเตอร์ตัวอื่นๆเราจะตั้งให้มีค่าที่คงที่ไว้ ต่อจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ผลของการตัด ณ ค่าพารามิเตอร์ที่สนใจ เพื่อจะเป็นตัวกำหนดที่ได้ผลดีที่สุดในงานที่ต้องการความละเอียดสูง

**CNC WIRE CUT EDM**

PRAWIT

SAWADIRAK

YUPAPORN

NUALPHENG

WONGWASU

SANTIWARAKOM

ADVISOR ASST.PROF. THAVEE

TESCHAREON

1992

**Abstract**

This project deal with the working process of wire cut EDM and the result of cut material with this instrument. By the way of cutting this material, there are a lot of parameters which has effected on cutting and roughness of working pieces. The experiment is determined on the current in the wire for cutting the material. Other parameters are stable. Then the result of cutting is analyzed to find the precious values.

# บทที่ 1

## บทนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันนี้มีความเจริญก้าวหน้าไปมาก มีการนำเอาความรู้ความสามารถทางด้านคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับความรู้ทางด้านเครื่องกล โดยได้มีการนำความรู้ทางด้าน CNC ( Computer Numerical Control ) ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างคอมพิวเตอร์และเครื่องจักร

ผลของการทำงานของเครื่อง CNC จะทำให้ชิ้นงานมีความเที่ยงตรงและละเอียดตรงตามที่เราต้องการ เป็นที่ต้องการของงานอุตสาหกรรมในอนาคต ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องศึกษาการใช้งานและผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานของเครื่อง CNC

เครื่อง wirecut EDM ก็เป็นเครื่อง CNC ชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการของความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานที่เพียงพอที่จะใช้ในการตัดโลหะโดยใช้เส้นลวดโลหะที่เป็นเสมือนขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่ง การตัดผ่านของเส้นลวดจะมีผลต่อผิวของชิ้นงาน ซึ่งเราสามารถกำหนดตัวแปรที่ใช้ควบคุมความหยาบและความละเอียดที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อผิวชิ้นงาน เพื่อจะใช้เป็นแนวทางในการใช้เครื่อง wirecut EDM ในอนาคต

### Wirecut EDM สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากแค่ไหน

อุปกรณ์ wirecut EDM จะใช้ระบบควบคุมเชิงตัวเลขโดยคอมพิวเตอร์ระดับต่ำสุด ซึ่งจะต้องโปรแกรมควบคุมทั้ง 2 แกน คือ แกน x และแกน y โดย แกน x จะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของโต๊ะชิ้นงานในแนวราบทางซ้ายไปขวา เมื่อผิวหน้าของชิ้นงานอยู่ด้านหน้า แกน y จะกำหนดการเคลื่อนที่ในแนวราบจากด้านหน้าไปหลัง แกน z จะประกอบด้วยระยะทางในแนวตั้ง ระหว่างจุดที่สูงกว่ากับจุดที่ต่ำกว่าของเครื่องตัดลวด ถึงแม้ว่า เครื่องนี้จะทำการปรับด้วยมือทั้งหมด แต่ก็ยังเป็นเครื่องมือที่ทันสมัยที่สุดแล้ว

ระดับที่สูงกว่า CNC และมีทางที่จะใช้ร่วมกันก็คือโปรแกรมควบคุม 4 ทิศทาง ในระบบนี้คอมพิวเตอร์จะทำการควบคุมแกน x,y,u และ v โดย แกน u จะมีทิศทางไปในแนวเดียวกับแกน x แต่จะแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่เหนือเครื่องตัดลวดมากกว่าโต๊ะชิ้นงาน ในทำนองเดียวกัน การเคลื่อนที่ของแกน v ก็จะขนานกับแนวแกน y เครื่องแบบ 4 แกนนี้สามารถให้แนวตัดด้านบนกับด้านล่างสัมพันธ์กันกับเท่ากัน เช่น รูปกรวย รูปทรงกระบอก และรูปทรงอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน

เมื่อให้คอมพิวเตอร์เพิ่มการควบคุมในแนวแกน z กลายเป็นเครื่องควบคุม 5 แกน ซึ่งสามารถทำให้เกิดรูปทรงที่สมบูรณ์แบบ โดยให้ความเอียงของลวดเปลี่ยนไปโดยการเคลื่อน wire guide ให้เข้าใกล้หรือสัมผัสชิ้นงาน

แกนที่เพิ่มขึ้นมาคือแกน A ต้องใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม ( การหมุนของโต๊ะรอบแกนในแนวระดับ ) และแกน B ( โต๊ะเอียงหรือหมุนรอบแกนในแนวตั้ง ) ระบบที่ประกอบด้วย 5 แกนหรือมากกว่า บางครั้งอาจถูกเรียกว่า เครื่องจักรเฉพาะประโยชน์ ซึ่งมันจะสามารถทำงานได้สะดวกกว่าเครื่องแบบ 2 หรือ 4 แกน

### ขอบเขตการทำงานของ EDM

เมื่อเร็ว ๆ นี้ บริษัท AGIE USA Ltd, Addison, IL ได้เผยแพร่เอกสารแผ่นพับเกี่ยวกับ wirecut EDM อายุการใช้งาน 5,000 ชั่วโมง ในรายงาน AGIE ชื่อว่าขอบเขต EDM บ่อยครั้งจะตีความผิดพลาดในการกำจัดวัสดุโดยใช้ความร้อนสูงบนวัสดุชิ้นงานระหว่างขอบเขต EDM วัสดุถูกนำออกจากชิ้นงานโดยการควบคุม electrical spark ซึ่งเกิดในแหล่งจ่ายไฟของเครื่องจักร และปล่อยออกจากลวดตัวนำสู่ชิ้นงาน ชิ้นงานจะทำจากวัสดุที่แข็งและสามารถนำไฟฟ้าได้

จะไม่มีรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้า และจะไม่มีแรงที่กระทำระหว่างกัน ขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานจะถูกบังคับให้ห่างกันโดยประมาณโดยการควบคุมของเครื่องจักร

ช่องว่างนี้จะมีช่องเคลวบรรจุอยู่ ซึ่งช่องเคลวเป็นฉนวนทำมาจากของเคลวที่เอาประจุออก ซึ่งทำหน้าที่ระบายความร้อนจากบริเวณที่เกิด spark และจะช่วยกำจัดอนุภาคส่วนเกินจากผิวงาน

เมื่อความต่างศักย์ DC จากแหล่งจ่ายจ่ายมาครั้งแรก จะไม่มีกระแสไหลระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน เพราะฉนวนระหว่างผิวงานกับขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าทำให้ฉนวนแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งไอออนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังประจุตรงข้ามกับตัวมัน จะเกิดกระแสไหลทำให้เกิดความร้อนและแรงดันมหาศาล

ในที่สุดของส่วนของวัสดุจะถูกหลอมและทำให้เป็นไอ ทิ้งไว้เพียง crater บนผิวงาน และความร้อนกับแรงดันก็จะหมดไป

การศึกษาแสดงให้เห็นว่า มันไม่ถ้ายนักที่กระแสไฟฟ้ามาตัดโลหะออกจากชิ้นงาน แต่การให้กระแสปิดเปิดเป็นจังหวะจะให้ผลดีกว่า ในขอบเขต EDM

ช่วงแรกจะเป็นช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะเมื่อนานขึ้นความร้อนจะไม่สามารถทำให้วัสดุระเหยเป็นไอได้ดี ทั้งนี้เพราะสาเหตุจาก crater และวัสดุนี้หลอมเหลว

## เราจะใช้ขบวนการนี้อย่างไร

AGIE อธิบายถึงข้อดีของ EDM ที่เครื่องจักรอื่นทำไม่ได้คือ

EDM มีความแม่นยำสูง มันสามารถตัดได้ละเอียดมากโดยใช้ลวดขนาด เส้นผ่า ศก. 0.001" และ สามารถตัดวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ทุกชนิดไม่ว่าเครื่องมือเหล็กชุบแข็ง tungstaen carbide วัสดุรีดร้อน และ ภายนอกเป็นเซรามิก CBN ( Cubic boron nitride ) และ PCD ( Poly crystalline diamond )

ซึ่งเราสามารถผลิตเครื่องใช้, dies, เบ้าหลอม และอะไหล่ที่ต้องการความละเอียดสูง ระบบ EDM นั้นเป็นชนิดเดียวที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งในระบบ 3 มิติ เช่น ทำแบบพิมพ์อัดของเหลว ไขปัดเครื่องจักรไอน้ำ และแบบพิมพ์ที่ซับซ้อนได้

อย่างที่ 2 ก็คือ EDM สามารถทำงานได้เร็วกว่า โดยใช้การกระทำเพียง 2-3 อย่าง แต่ก็มีเครื่องจักรหลายแบบที่สามารถตัดวัสดุได้เร็วกว่า EDM ซึ่ง EDM จะตัดได้ช้ากว่าการเจาะ เซาะ การทำเป็น เกลียว และการใช้เทคนิคใหม่ ๆ เช่น การใช้ Laser ในการตัด แต่เครื่อง EDM สามารถกำจัดขั้นตอนต่าง ๆ ได้ โดยใช้เพียงเครื่องเดียวและทำงานต่อเนื่องกัน

จากที่กล่าวมา ตัวอย่างเช่น การทำแบบหล่อง่าย ๆ ขึ้นมา จะต้องการ การ เซาะ การเจาะ การคว้าน การตัด และการเจียรไนด้วยเครื่อง EDM แบบพิมพ์นี้จะสมบูรณ์แบบด้วยเครื่องมือชนิดนี้เพียงเครื่องเดียวเท่านั้น

## ระบบฉนวน

น้ำที่แตกออกเป็นละอองจะเป็นฉนวนที่ใช้ในการตัดด้วย EDM มีหลาย ๆ เหตุผลที่ต้องใช้น้ำก็คือ มันสามารถตัดวัสดุได้รวดเร็ว สามารถทำให้เครื่องเย็นลงได้อย่างรวดเร็ว และรวมทั้งการขาดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นประกายไฟแคบ ๆ ที่ใช้ตัดวัสดุในระบบ EDM จึงต้องการฉนวนที่มีความหนืดต่ำ ๆ เพื่อที่จะสามารถทำการชะล้างได้เพียงพอ ( ชะล้างเศษวัสดุเล็ก ๆ ที่เกิดจากการตัด ) น้ำที่แตกออกเป็นละอองจึงมีความจำเป็น น้ำสามารถส่งผ่านความร้อนจากบริเวณที่ทำการตัดได้ง่ายกว่าน้ำมัน ซึ่งจะส่งผลให้ผนังวัสดุเย็นขึ้น

ในที่สุด ผู้ใช้เครื่องตัดไฟฟ้า EDM จะต้องใช้เวลาในการทำงานกับเครื่องนานมากถึงเป็นวัน เป็น สัปดาห์ หรือมากกว่านั้น การใช้วิธีการลดประจุไฟฟ้าของน้ำ เพื่อป้องกันการไหม้ที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ

การทำฉนวนไฟฟ้าโดยใช้การลดประจุไฟฟ้าของน้ำ จะทำให้น้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีกเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย ขบวนการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) จะกระทำโดยการกรองน้ำที่ใช้แล้วผ่านกระดาษกรองที่มีช่องขนาด 5 ไมครอน หรือ

เอกสารอ้างอิง Filter ซึ่งใช้กรองสารที่มีขนาดเล็ก ๆ น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกทำการปรับ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดความต้านทาน (Resistance) โดยผ่านกระบวนการยังประจุเพื่อลดประจุไฟฟ้าของ  
น้ำ

### Shopping the show

ส่วนใหญ่แล้ว วิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการเลือกหาผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ และ  
ลักษณะต่าง ๆ จะเลือกหาได้จากตัวอย่างสินค้าหรือแคตตาล็อก ซึ่งมีตัวอย่างสินค้า  
ต่าง ๆ จากผลิตภัณฑ์หลาย ๆ แห่ง

IMT 88 มีอุปกรณ์ตัดลวดไฟฟ้า EDM รุ่นใหม่ ๆ และนำเสนอจัดแสดงในรูปแบบ  
ซึ่งมีคำบรรยายถึง ลักษณะต่าง ๆ ของเครื่องในลักษณะรูปตัดขวาง

### การป้อนข้อมูลระบบปุ่มเดียว (One Touch Programming)

CNC wirecut EDM ได้ทำให้เกิดการพลิกโฉมหน้าทางอุตสาหกรรมครั้งใหญ่  
โดยวิธีการตัดที่ รวดเร็ว เทียบตรง และสามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งให้เป็นรูปร่าง  
ต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตาม เครื่อง CNC จะต้องอาศัยผู้ควบคุม ซึ่งม  
ความรู้ความชำนาญทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถป้อนข้อมูลและรหัส  
โดยใช้ KEYBOARD ได้ สำหรับโรงงานต่าง ๆ ที่ใช้เครื่อง CNC จะทำการอบรมพนักงาน  
เพื่อให้สามารถทำการควบคุมเครื่องได้โดยใช้มือและเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีผลต่ออัตร  
การผลิตและประสิทธิภาพในการทำงาน ค่าใช้จ่ายในการอบรมสำหรับคนงาน 1  
หรือ 2 คน จะน้อยมากเมื่อเทียบกับผลผลิตที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เครื่องตัดเหล็กไฟฟ้า  
อย่างมีประสิทธิภาพ

Wirecut EDM รุ่น DS-2 ของ Hansvedt ประกอบด้วยระบบ CNC ซึ่งผู้ควบคุม  
เครื่องสามารถเข้าใจและใช้งานได้ โดยจอภาพจะเขียนบรรยายด้วยภาษาอังกฤษ  
และระบบ SOFTWARE ภายในจะแสดงตัวเลือกสำหรับการทำงานในขั้นตอนต่าง ๆ ให้  
ผู้ใช้เลือกใช้งานได้อย่างสะดวก และข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่าง Wirecut EDM รุ่น  
DD-2 กับ CNC รุ่นอื่นคือการใช้ Keyboard ใช้งานการทำงานของคอมพิวเตอร์ที่  
เพียงแต่กดปุ่ม (A Single Knob) ก็จะสามารถควบคุมการทำงานได้ ซึ่งแต่ก่อนต้อง  
อาศัยการป้อนโปรแกรมด้วยมือให้เครื่องทำการตัดชิ้นส่วนในทิศทางแกน X-Y ทั้งหมด

การควบคุมแบบปุ่มเดียว (One-Knob) ของ Hansvedt มีหลักการเคลื่อนที่พื้น  
ฐานอยู่ 5 อย่างคือ การหมุนตามเข็มนาฬิกา การหมุนทวนเข็มนาฬิกา การกดอยู่กับที่ การกด  
และหมุนทิศทางตามเข็มนาฬิกา และการกดและหมุนทิศทางทวนเข็มนาฬิกา การใช้การเคลื่อนที่ทั้ง  
5 แบบนี้ผู้ใช้เครื่องจะใช้นิ้วมือเพื่อเลือกเอาตัวเลือกในรายการ หรือใช้  
ตัวอักษรและตัวแสดง หรือชุดของชิ้นงานได้

ระบบปฏิบัติการของเครื่อง DS-2 ทั้งหมดจะประกอบด้วยจอภาพที่แสดง 15 แบบ คือ

- Main Menu
- Load Program
- Program Directory
- การสร้างโปรแกรม (Create Program)
- รูปแบบการป้อนข้อมูล (input Pattern)
- การตั้งระบบจ่ายไฟ (Power Supply Settings)
- การจัดการและแก้ไขโปรแกรม (Edit Program)
- Wire Offset
- Rotate-Rescale-Mirror
- การใส่รูปแบบของข้อมูล (Pattern-Data)
- การแก้ไขรูปแบบ (Edit Pattern)
- การตั้งและการตัด ( Setup/Cut )
- การใส่จุดศูนย์กลางของการเจาะรู กับขอบ ( Jog-Edge-Hole Centering )
- Trace
- การตัด ( Cut )
- การปรับค่าพารามิเตอร์ ( Operating Parameter Adjust )

#### How it works ( สามารถทำงานได้อย่างไร )

หน้าจอแรกที่เรียกว่า Main Menu จะแสดงตัวเลือก 4 ตัวเลือกคือ LOAD PROGRAM การสร้างโปรแกรมใหม่ (Create Program) การแก้ไขโปรแกรมเก่า ( Edit Program ) การตั้งและการตัด ( Setup/Cut ) การหมุนปุ่มความเข้มหรือทวนเข็ม จะเป็นการเลื่อน Cursor เพื่อเลือกตัวเลือกทั้ง 4 นี้ ถ้ากดปุ่มจะเป็นการเลือกให้แสดงหน้าจอต่อไป ซึ่งวิธีการหมุนและการกดปุ่มเพื่อเลือกตัวเลือกบนหน้าจอจะต้องใช้อยู่ตลอดในการทำงานทั้งหมด

การเขียนโปรแกรมในเครื่องรุ่น DS-2 ง่ายมาก คำสั่งบนหน้าจอจะบอกให้ทราบว่าจะต้องทำอะไร เช่น ให้ชื่อโปรแกรม เลือกหน่วยนิ้วหรือเมตร ใส่ข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่างที่จะตัด แล้วการโปรแกรมโดยใช้เลขบรรทัด (Lime Number) ก็จะถูกกำหนดโดย SOFTWARE ของเครื่องโดยอัตโนมัติ รหัสตัวเลือกของการเคลื่อนที่ในทิศทางเชิงเส้นตรง ทิศทางทวนเข็ม ทิศทางตามเข็ม การหยุดชั่วคราว (pause) หรือการเลิกทำงาน (stop) จะถูกเลือกโดยการกดปุ่มให้คอมพิวเตอร์ทำงาน หลังจากที่มีการเลือกการเลือกขนาดปุ่มสำหรับใช้เลื่อน Cursor จะกลายเป็นปุ่มพิมพ์ตัวเลขสำหรับใส่ค่าของจุดตัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COORDINATE X-Y ทันทีที่มีการใส่ค่าจุดหนึ่งเสร็จ Cursor ก็จะไปยังตำแหน่งถัดไป บนหน้าจอโดยอัตโนมัติ และเมื่อป้อนโปรแกรมเข้าไป แบบที่ถูกตัดก็จะถูกทำการชยับ เพื่อปรับขนาดเป็นการปรับมาตราส่วน ( Rescale )

ในหน่วยการตั้งค่า ปุ่มใส่ค่าของคอมพิวเตอร์กลายเป็นอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของแกน X และ Y เป็นการลดตำแหน่งและหมุนของปุ่ม การคลายปุ่มจะสามารถคอยคุมการเคลื่อนไหวโดยการเพิ่มขึ้นทีละ 0.0001 นิ้ว ความเร็วสูงสุดของการหมุนจะเกิดขึ้นถ้าปุ่มหมุนเร็วกว่าการเคลื่อนไหวของโต๊ะ และจะหยุดเมื่อปุ่มถูกปล่อย ( ด้วยแรงของสปริง )

ตัวจ่ายพลังงานจะถูกตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้า หรือปรับโดยปุ่มรับข้อมูลของคอมพิวเตอร์เมื่อเครื่องจักรถูกตัด โดยสิ่งนี้จะทำให้สามารถปรับค่าละเอียดของการตัดสูงสุดทำงานได้

ถึงแม้ว่า DS-2 จะแทนที่เทคโนโลยีไมโครซีพียูและการระบบซอฟต์แวร์ มันจะมาแทนที่เครื่องมือเครื่องจักรในลักษณะเป็น สิ่งแวดล้อมของคอมพิวเตอร์ ที่แรกการทำงานของ CNC ไม่สามารถบังคับด้วยแป้นพิมพ์ รหัสของคอมพิวเตอร์และรูปแบบของคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเจ้าของร้านจะต้องหมั่นใช้เครื่อง EDM ของเขาและควรเข้ารับการอบรมในระยะเวลาสั้น ๆ

DS-2 มี 2 แกน ได้รับการปรับปรุงในเรื่องของระบบ EDM แบบ EDM electrodes วัสดุที่ไม่ต้องการ

## บทที่ 2

### เครื่องมือกล

ก่อนที่จะกล่าวถึงเรื่อง "เครื่อง EDM" เรามาพูดถึง นิยามของเครื่องมือกลกันก่อน

#### 2-1 นิยามของเครื่องมือกล

มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japan Industrial Standard : JIS) ได้ให้คำจำกัดความของเครื่องมือกลไว้ดังนี้

เครื่องมือกล หมายถึง เครื่องจักรต่าง ๆ ที่ขึ้นรูปชิ้นงานโลหะโดยการ ตัด ชั้ต สี่ ให้ส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกไป เพื่อให้ได้รูปร่างตามต้องการ. อนึ่งจะไม่รวมเครื่องจักรที่ลับชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดด้วยมือหรือใช้แม่เหล็กจับ

#### - วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน

เมื่อคิดถึงสภาพการใช้งานในอุตสาหกรรมแล้ว ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องมือกลนั้น เป็นจำพวกโลหะ โดยเฉพาะ เหล็กกล้า, เหล็กเหนียว แต่ในปัจจุบันได้มีการขึ้นรูปวัสดุอื่น ๆ เพิ่มขึ้น เช่น อลูมิเนียม, ทองเหลือง ซึ่งเป็นวัสดุนอกเหนือจากกลุ่มโลหะ (NCN-Ferrous) นอกจากนี้ยังมีการขึ้นรูป พลาสติก และวัสดุอื่น ๆ อีกด้วย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องระบุวัสดุที่ใช้ในนิยามของเครื่องมือกลอีกต่อไป สำหรับเครื่องจักรขึ้นรูปไม้ไม่ถือว่าเป็นเครื่องมือกล เพราะวัสดุไม้ไม่จัดเป็นวัสดุอุตสาหกรรม

#### - วิธีการขึ้นรูป

จากนิยามที่กล่าวไว้ว่า "ขึ้นรูปโดยการตัด ชั้ต สี่ เพื่อให้ส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกไป" และเครื่อง EDM เป็นเครื่องที่อาศัยพลังงานไฟฟ้าไปขึ้นรูปให้วัสดุส่วนที่ไม่ต้องการหลุดออกไป จึงจัดอยู่ในประเภทของเครื่องมือกล

ส่วนการขึ้นรูปวิธีอื่น เช่น เครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งทำการหลอมเม็ดพลาสติกแล้วฉีดอัดเข้าไปในแม่พิมพ์หรือเครื่องเชื่อม ซึ่งทำการหลอมวัสดุบางส่วนให้เชื่อมติดกับส่วนอื่น ๆ เหล่านี้ เราจะไม่นับเป็นเครื่องมือกล

เครื่อง PRESS แม้จะเป็นเครื่องจักรที่ขึ้นรูปเอาส่วนที่ไม่ต้องการออก แต่เราจะเรียกว่า เครื่องจักรอุตสาหกรรมมากกว่าเครื่องมือกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### - ความละเอียดแน่นอน

ขึ้นรูปให้ได้เป็นรูปทรงตามต้องการนั้นหมายถึง ความละเอียดแน่นอน ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.000$  มม. แต่ถ้าไม่สามารถขึ้นรูปได้ความละเอียดเช่นนั้น เครื่องมือกลนั้นก็ไม่ได้เกิดประโยชน์ ความจริงแล้วประวัติของเครื่องมือกล ก็พยายามที่จะขึ้นรูปให้ได้เป็นรูปทรงตามต้องการนั่นเอง

### - วิธีจับยึดชิ้นงานหรือเครื่องมือตัด

การจับยึดชิ้นงานหรือเครื่องตัดด้วยวิธีต่างๆ คือใช้แรงคนหรือสัตว์เลี้ยงในการหมุนแกนเครื่องเหล่านี้ เราไม่ถือว่าเป็นเครื่องจักร อย่างน้อยที่สุดต้องมีอุปกรณ์ในการใช้เคลื่อนย้าย เช่น มอเตอร์, ระบบแรงดันไฮดรอลิก (Hydraulic) หรือแรงดันลม (Pneumatic) เป็นต้น

จากวิวัฒนาการของเครื่องมือกลก็กล่าวได้ว่า สวิทช์ที่ละเอียดที่สุดเห็นจะได้แก่ การขึ้นรูปให้ได้รูปทรงตามต้องการ เมาจะเป็นการคัดค้านหาวิธีการขึ้นรูป การค้นคว้าวัสดุที่จะทำมีดตัด หรือการพัฒนาอุปกรณ์ระบบ NC เหล่านี้ล้วนแต่มีจุดประสงค์เช่นเดียวกันทั้งสิ้น

## 2-2 หลักการเคลื่อนที่ 3 ข้อของเครื่องมือกล

เครื่องมือกล เป็นการขึ้นรูปด้วยการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงหรือมุมระหว่างตัวชิ้นงานและเครื่องมือตัด (เช่น มีดตัด, END MILL, ฯลฯ)

### - หลักการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

#### 1. เคลื่อนที่เพื่อการขึ้นรูป

เป็นการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดบนชิ้นงานขึ้นงาน

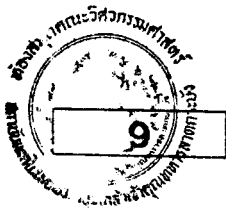
ตัวอย่าง เครื่องไส (Milling M/C) END MILL หมุนเพื่อตัดขึ้นรูปชิ้นงาน  
เครื่อง EDM ขั้วจะสปาร์คกับชิ้นงาน (อาจจะเรียกว่า "บรากฎการณ์" มากกว่า "การเคลื่อนที่")

#### 2. การเคลื่อนที่ส่งหรือป้อน

เป็นการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดหรือชิ้นงาน เพื่อที่จะให้ชิ้นงานถูกขึ้นรูปในส่วนต่อ ๆ ไป

ตัวอย่าง เครื่องไส ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแกนต่างๆ เพื่อขึ้นรูปต่อไป  
เครื่อง EDM ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแกนต่างๆ เพื่อขึ้นรูปต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 3. การเคลื่อนที่กินลึก

เป็นการเคลื่อนที่ในส่วนลึก (ส่วนใหญ่ได้แก่แกน Z) ของชิ้นงาน

ตัวอย่าง เครื่องไส END MILL จะเคลื่อนไปในแนวแกน Z เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน

เครื่อง EDM ชั่วเคลื่อนไปในแนวแกน Z เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน

เครื่องกลึง การตัดชิ้นงานให้ขนาดนั้น การเคลื่อนที่กินลึก เหมือนกับการเคลื่อนที่ส่ง

เครื่องเจาะ การกินลึกเท่ากับขนาดของดอกสว่าน

- การเคลื่อนที่ส่งและการเคลื่อนที่กินลึก ในบางครั้งจะเป็นการเคลื่อนที่พร้อมกัน แต่บางครั้งก็เป็นกรเคลื่อนที่อย่างใดอย่างหนึ่ง

- การขึ้นรูปพร้อมกันทั้ง 3 แกน (3 มิติ) นั้น การเคลื่อนที่กินลึกจะรวมอยู่ใน การเคลื่อนที่ส่ง

### 2-3 การกำหนดแกนของเครื่องมือกล

ทิศทางของการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน หรือเครื่องมือตัดของเครื่องมือกลนั้นจะกำหนด โดยใช้ตัวอักษรแทนแกนของเครื่อง แต่ละแกนจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน; (Rectangular Coordinate) และแสดงทิศทางด้วยเครื่องหมาย + หรือ -

### บทที่ 3

#### การใช้เครื่อง EDM

เครื่อง EDM เป็นเครื่องที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขึ้นรูปโดยไม่มีจุดสัมผัส ดังนั้นถ้าเป็นชิ้นงานที่เป็นสื่อไฟฟ้า เราสามารถขึ้นรูปได้แม้ว่าชิ้นงานนั้นจะมีความแข็งเพียงไร อีกทั้งการขึ้นรูปยังใช้แรงกระทำน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปที่มีความละเอียดแม่นยำสูง

นอกจากนี้ เครื่อง EDM ยังสามารถขึ้นรูปส่วนแหลมของมุมใหม่ ซึ่งการตัดขึ้นรูปวิธีอื่นไม่สามารถทำได้ และรูปทรงการขึ้นรูปจะสลับซับซ้อนเพียงไร ถ้าเราสามารถจะทำซ้ำที่ใช้ในการตัด (เปรียบเสมือนกับมีดตัด) ได้แล้ว การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ก็สามารถกระทำได้

เครื่อง EDM นี้ เหมาะสำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์ ซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีความแข็งและมีรูปทรงซับซ้อนซึ่งวิธีอื่นจะไม่สามารถใช้กันมากในอุตสาหกรรมการสร้างแม่พิมพ์

เครื่อง EDM ในปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นเพื่อการสร้างแม่พิมพ์ที่มีโครงสร้างละเอียดสลับซับซ้อน และกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ให้รวดเร็วยิ่งขึ้น กล่าวคือ เครื่อง EDM เป็นเครื่องจักรที่ขาดเสียมิได้ในกระบวนการสร้างแม่พิมพ์นั่นเอง

เหตุผลสำคัญของการใช้เครื่อง EDM ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์นั้น พอจะสรุปได้ดังนี้

#### 1. สามารถขึ้นรูปวัสดุที่ยากต่อการตัด

โลหะที่มีความแข็งมากยากต่อการตัดขึ้นรูป เช่น โลหะผ่านการชุบแข็ง โลหะ Cemented carbide โลหะ Sintered Alloy หรือโลหะพิเศษ เป็นต้น โลหะเหล่านี้ แม้จะมีความแข็งมากเท่าไรถ้าเป็นสื่อไฟฟ้าได้ก็สามารถจะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ได้

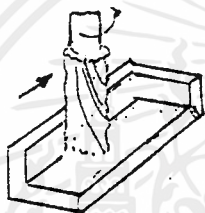
#### 2. สามารถขึ้นรูปรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนได้อย่างง่าย

การพัฒนา ระบบ NC ทำให้สามารถขึ้นรูปทรงระบบ 3 มิติได้ แต่ถ้าเป็นชิ้นงานที่มีความแข็งมากและมีรูปทรงสลับซับซ้อน เช่น แม่พิมพ์แล้ว การใช้เครื่องตัดหรือเครื่องไสนั้นจะดีสำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ไม่ได้แน่

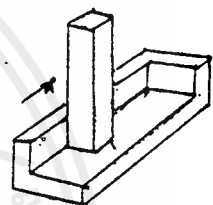
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สามารถขึ้นรูปรูปร่างที่ไม่สามารถตัดขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นได้

ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปมุมเหลี่ยมที่ไม่ต้องการให้เกิดมุมโค้ง R แม้ว่าจะตัดแปลงหัว END MILL ของเครื่องไส หรือหินขัดของเครื่องขัด อย่างไรก็ตาม ตามหลักการทางกายภาพแล้ว เราไม่สามารถจะขึ้นรูปลักษณะเช่นนั้นได้ แต่ถ้าเราทำซ้ำ EDM โดยไม่มีมุมโค้ง R ก็จะสามารถขึ้นรูปของรูที่ไม่มีมุมโค้งได้อย่างสวยงาม



ตัดขึ้นรูปโดยเหล็อมุมโค้ง R



ขึ้นรูปมุมเหลี่ยมด้วยเครื่อง EDM

รูปที่ 3.1

### 4. ลดกระบวนการผลิตลงได้

การลดกระบวนการผลิตนั้น เป็นตัวสำคัญที่จะนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตได้ ในช่วงเวลาสั้นและยังผลให้เกิดความเชื่อถือได้จากลูกค้าอีกด้วย ระบบ NC ในเครื่อง EDM นี้ นอกจากข้อดีในหัวข้อ 2 แล้ว การควบคุมกระแส (Pulse Control) และควบคุมแกนพักการขึ้นรูปนั้น ทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างถูกต้องแน่นอน ซึ่งทำให้ได้แม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูง และเป็นการลดกระบวนการผลิตของแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนลงได้

## บทที่ 4

### ความรู้พื้นฐานของการขึ้นรูป ด้วยวิธีการสปาร์ค

#### 4-1 ปราบปรามการสปาร์ค

ปรากฏการณ์การสปาร์ค เป็นชื่อเรียกโดยรวมของปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ฉนวนไฟฟ้า บริเวณของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซกั้นกลางอยู่ จนทำให้ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการสูญเสียความเป็ฉนวน (dielectric breakdown) และเกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้นอย่างรุนแรง

ดังนั้นปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จึงหมายถึง การขึ้นบังคับทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวกลางที่โดยปกติแล้วไฟฟ้าจะไหลผ่านได้ยาก และเมื่อถึงเวลาที่มีการขึ้นบังคับนี้ถึงขีดจำกัด ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ ไหลขึ้นมาอย่างกระทันหัน

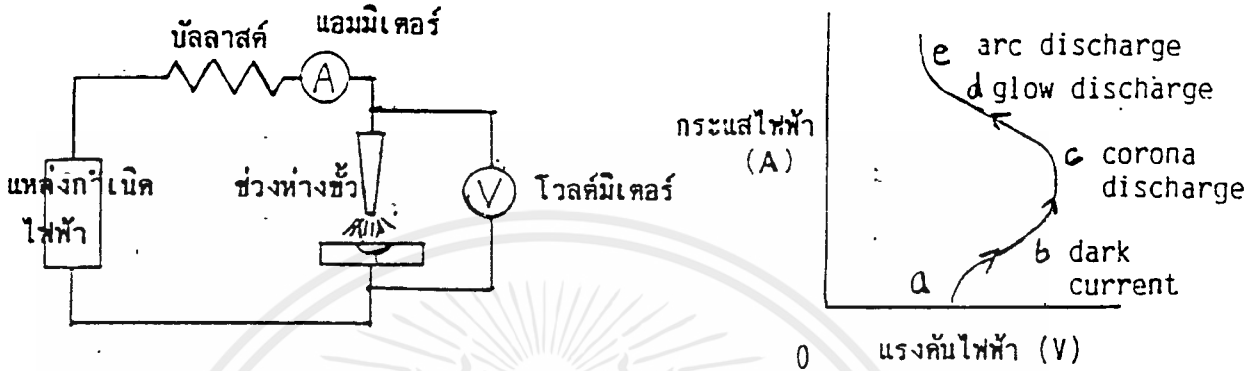
สำหรับปรากฏการณ์การสปาร์คที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีนั้น คือฟ้าผ่า นอกจากนั้นแล้วเวลาที่ลวดสื่อสารโทรคมนาคมในเขตรอบนอกซึ่งอากาศแห้งนั้นก็มักจะเกิดการสปาร์คที่มีเสียงดังเกิดขึ้นด้วย

การทำให้เกิดการสปาร์คโดยมนุษย์สร้างขึ้น และนำมาประยุกต์ใช้งานนั้น ได้แก่ หลอดฟลูออโรสเซนดหรือหลอดนีออน ซึ่งนับว่าเป็นปรากฏการณ์การสปาร์คในสุญญากาศ และนำหลักการดังกล่าวนี้มาประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเชื่อมแบบอาร์ค การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค (เครื่อง EDM)

ในรูปที่ 4-1 แสดงถึงคุณสมบัติพิเศษของแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษของการสปาร์คระดับพื้นฐานที่สำคัญที่สุดอันหนึ่ง โดยการสร้างวงจรสปาร์คแบบง่ายๆ ดังในรูปและทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นในอากาศ

#### 1. สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า (E) ดังเช่นในวงจรรูปนี้ให้สูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดหนึ่ง อากาศจะเริ่มแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าเล็กน้อย และอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะถูกดึงดูดจากฝั่งขั้วลบไปสู่ฝั่งขั้วบวก ซึ่งในช่วงระยะนี้จะเริ่มมีกระแสไฟฟ้าจะไหลขนาดเล็กมาก ประมาณ  $10^{-8}$  -  $10^{-10}$  A สภาพเช่นนี้มีชื่อเรียกกันว่า สภาพที่กระแสเริ่มไหล



รูป 4-1 คุณสมบัติพิเศษแรงดันไฟฟ้า-กระแสไฟฟ้า

2. การสปาร์คแบบโคโรนา (corona discharge)

ถ้าเพิ่มแรงดันไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า บางส่วนที่เกิดสนามไฟฟ้าแรงเป็นพิเศษ จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (dielectric breakdown) เราเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า การสปาร์คแบบโคโรนา (สภาวะ C) ซึ่งเป็นสภาวะ การสปาร์คที่ขาดเสถียรภาพอย่างมาก

3. การสปาร์คแบบโกลว (glow discharge)

บริเวณส่วนที่เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนแล้วนั้น อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ จะไหลในส่วนนี้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วย สภาวะการสปาร์คที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่สั้นมากเช่นนี้เรียกกันว่า การสปาร์คแบบโกลว หลอดนีออนต่าง ๆ ที่ใช้ตกแต่งในยามค่ำคืนก็อาศัยหลักการ ของการสปาร์คแบบนี้

4. การสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge)

หลังจากที่ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกปลดปล่อยออกมา และการ สปาร์คแบบโกลวได้มีขนาดถึงกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุดแล้ว การสปาร์คจะเข้าสู่สภาวะขั้น ตอนสุดท้าย (d ถึง e) ซึ่งหมายถึง การสปาร์คแบบอาร์ค สภาวะสปาร์คเช่นนี้จะเกิด ขึ้นในลักษณะที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ การใช้ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมพลังงานก่อนที่จะเข้าสู่สภาพการสปาร์คแบบอาร์คนี้

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ โดยทั่วไปนั้นเป็นสภาพการสปาร์คซึ่งเกิดขึ้นทุกขั้นตอน ตั้งแต่สภาพที่กระแสเริ่มไหล (dark current) จนถึงสภาพของการสปาร์คแบบอาร์ค (arc discharge) ภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะมีช่วงเวลาที่สั้นมากราว 10 ถึง 100 วินาที และยิ่งไปกว่านั้น ความหนาแน่นของกระแส (current density) จะมีค่าถึง  $10^4 - 10^5$  A/cm<sup>2</sup> ดังนั้นเราจึงทราบกันว่า การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ จะปลดปล่อยพลังงานที่มีระดับสูงมากออกมาภายในช่วงเวลาที่สั้นมาก

#### 4-2 ทฤษฎีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM หมายถึง วิธีการขึ้นรูปซึ่งใช้กับโลหะเสียเป็นส่วนใหญ่ โดยการประยุกต์ใช้การสปาร์คที่เป็นประกายไฟ (พลังงานไฟฟ้า) ซึ่งควบคุมสภาพอย่างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเราสามารถที่จะเปรียบเทียบวิธีการขึ้นรูปนี้ได้เสมือนการใส่ไฟฟ้าเข้าไปในช่องว่างแคบ ๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับวัตถุที่จะขึ้นรูป

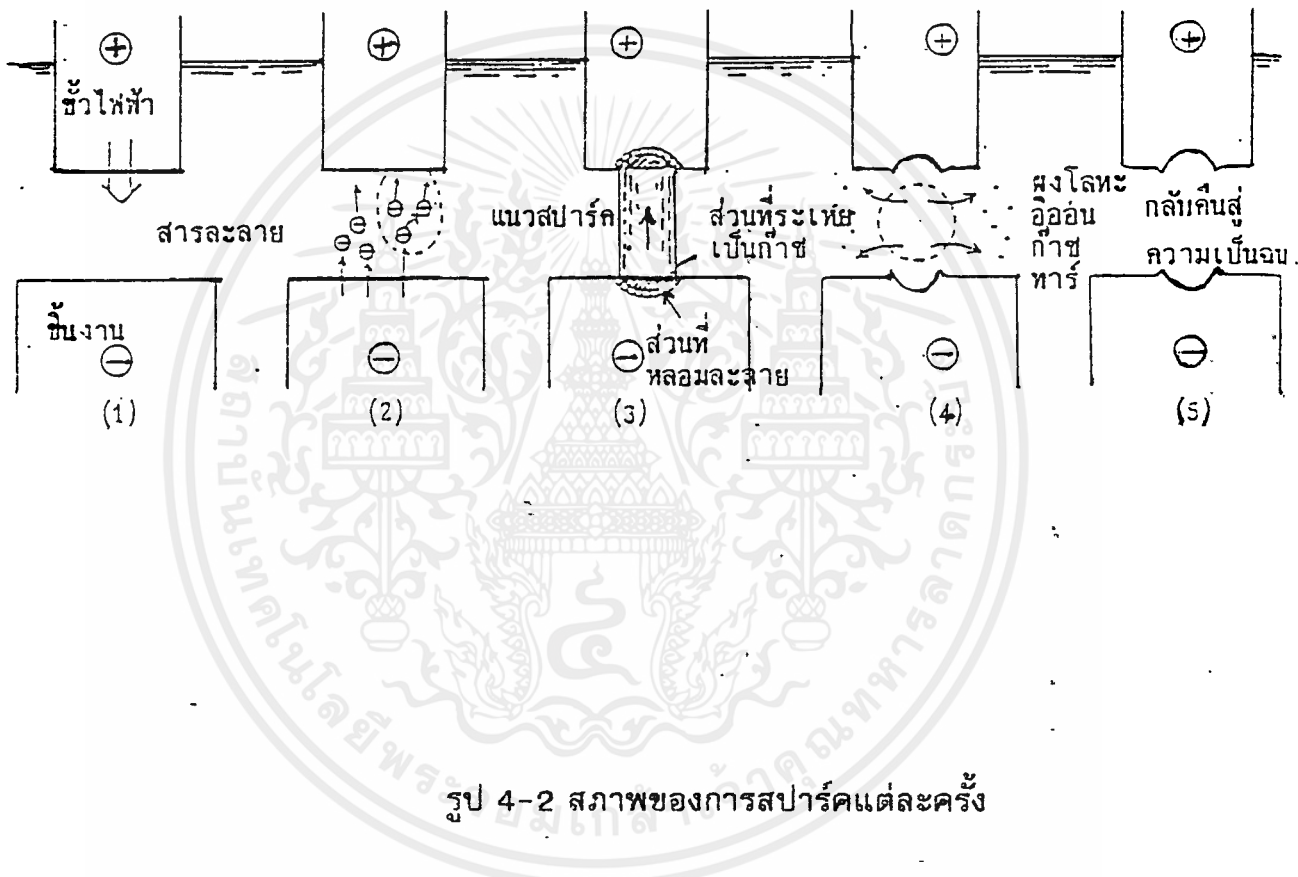
สำหรับการขึ้นรูปในทางปฏิบัติจริงนั้น จะทำขึ้นภายในสารละลาย โดยใช้ขั้วขด, กราไฟต์ เป็นขั้วไฟฟ้า และวัตถุที่จะนำมาขึ้นรูปได้นั้นจะไม่เกี่ยวกับความแข็งเพียงแต่ต้องเป็นวัตถุที่ไฟฟ้าไหลผ่านได้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง (EDM) นั้นจะไม่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่องกันเหมือนกับการเชื่อมแบบอาร์ค แต่ต้องใช้วิธีการเปิด/ปิด กระแสไฟฟ้าเป็นช่วงจังหวะ เพื่อป้องกันมิให้ความร้อนจากการสปาร์คหลอมละลายมากเกินไปจนเสียรูปทรง

วิธีการขึ้นรูปประเภทนี้อาศัยการใช้พลังงานที่ระดับสูง ซึ่งถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่สั้นมาก ดังนั้นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับวิธีการขึ้นรูปนี้ก็คือ ทำอย่างไรจึงจะทำให้เกิดการสปาร์คที่เป็นประกายไฟอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพสูง

ในการใช้งานจริงนั้น จะใช้ระบบ NC (Numerical control) ควบคุมให้เกิดการสปาร์คถึงหลายแสนครั้งใน 1 วินาที สภาพของพัลส์ (pulse) แต่ลักษณะของการสปาร์คจะเป็นไปดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-2 สภาพของการสปาร์คแต่ละครั้ง

1. ใส่แรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นด้วยการใส่แรงดันไฟฟ้า (ประมาณ 60-280 V) ที่ระหว่างชั้นงานกับขั้วไฟฟ้า (เรียกว่า ระหว่างขั้ว) ในการขึ้นรูปนั้นโดยปกติจะใช้น้ำมันเพื่อที่จะรักษาให้ความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง เพราะว่าถ้าค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วสูงก็สามารถลดระยะระหว่างขั้ว (ช่องว่างการสปาร์ค) ให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีในการขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูง

2. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อย่นระยะระหว่างขั้วให้ใกล้เข้าเรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่งสารละลายจะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน อีออนประจุลบจะถูกดึงไปสู่ฝั่งที่เป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น โปรดอย่าตีความไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สปาร์ค, หลอมละลาย

เมื่อเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นแล้ว อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะเริ่มไหลเป็นจำนวนมากอย่างรุนแรง ซึ่งก็คือการสปาร์คนั่นเอง บริเวณส่วนที่เกิดการสปาร์คนี้จะมีกระแสไฟฟ้าที่ความหนาแน่นสูงมากไหลในช่วงเวลาสั้น ๆ ในการขึ้นรูปงานจริงนั้น กระแสไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 A จนถึงหลายร้อยแอมแปร์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้ จะทำให้บริเวณที่เกิดการสปาร์คมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก (3,000 C ขึ้นไป) จนบางส่วนของชิ้นงานถูกหลอมละลาย นอกจากนั้นแล้วสารละลายบริเวณที่เกิดการสปาร์คก็จะถูกความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้กลายเป็นก๊าซ และเกิดความดันที่สูงขึ้นมากเป็นบางสวน

### 4. เหยินตัว

ความดันที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นไป ซึ่งเมื่อถูกสารละลายรอบข้างดูดแยงความร้อนไป ก็จะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นเศษผงชิ้นเล็ก ๆ

### 5. กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

หลังจากที่การสปาร์คหนึ่งครั้งได้จบลงแล้ว จะรองจนกว่าสารละลายจะกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน โดยไม่มีการใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไป การรอในช่วงนี้จะช่วยป้องกันการเกิดสปาร์คแบบผิดปกติ เช่น สปาร์คซ้ำ หรือสปาร์คเฉพาะเป็นบางจุดอันเนื่องมาจากการสะสมหรือทับถมจับตัวกันของหย่อนที่ตกค้างอยู่ระหว่างซี่ หรือเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค

ภายหลังจากที่กลับคืนสู่ความเป็นฉนวนแล้วก็จะทำการสปาร์คเช่นเดิมอีก โดยเริ่มจาก 1

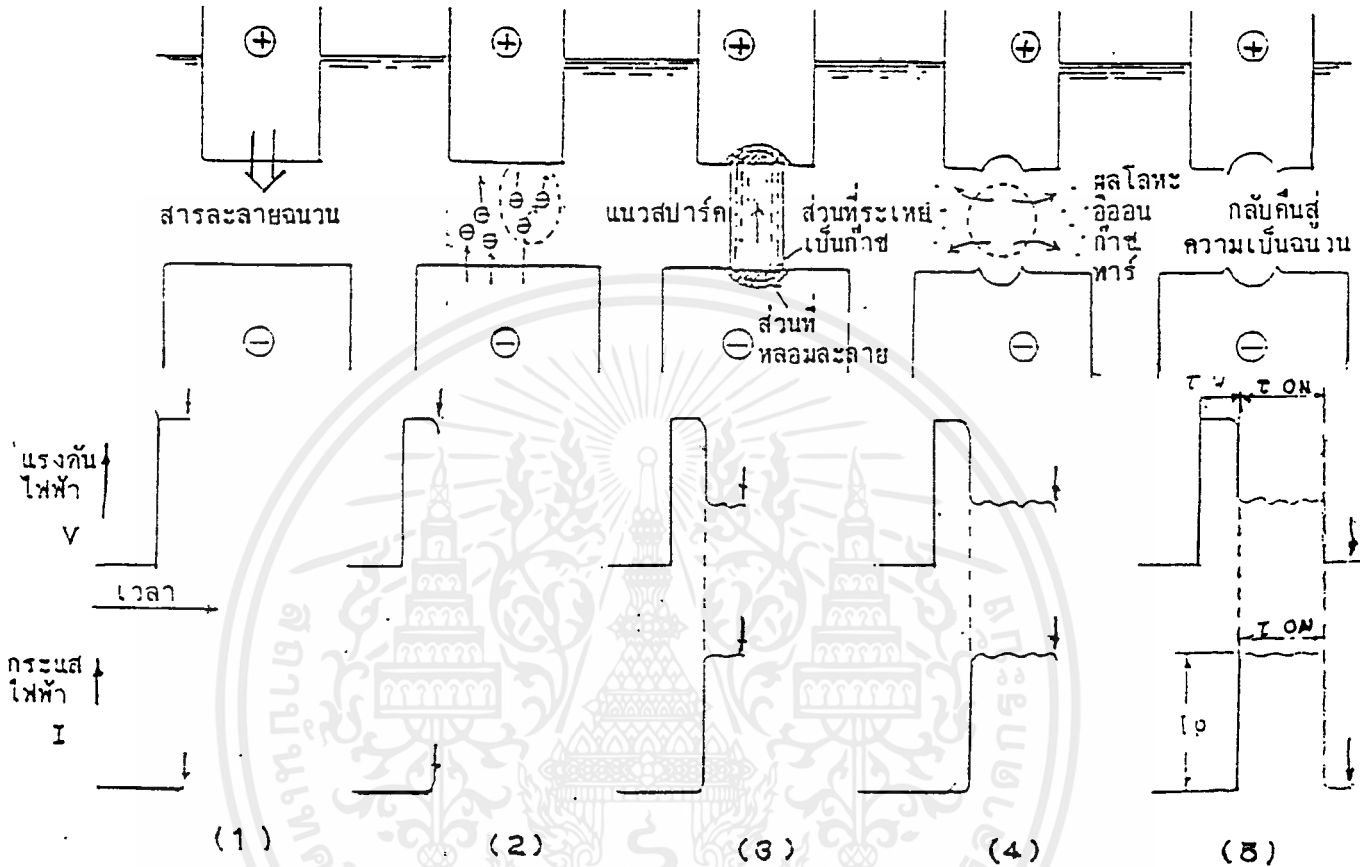
**การสปาร์คซ้ำ** : คือการสปาร์คที่เกิดขึ้นโดยไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมของระบบ NC ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมของการสปาร์คเลวลง อาจจะมีการสปาร์คขึ้นได้โดยไม่สัมพันธ์กับช่วงจังหวะของพัลส์ของการสปาร์ค ซึ่งถูกส่งมาจากวงจรการสปาร์ค เนื่องจากการสปาร์คประเภทนี้เป็นปรากฏการณ์ที่นอกเหนือการควบคุม จึงไม่อาจถือว่าเป็นสภาพการสปาร์คที่เหมาะสมได้

### 4-3 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ในที่นี่เราจะมาดูกันถึงว่า แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะเป็นเช่นไร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปต่อไปนี้จะนำรูปร่างคลื่นของพัลส์ในการสปาร์ค  
กระแส ไฟฟ้า) มาประกอบรวมอยู่ในรูปก่อนหน้านี้

(รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า,



รูป 4-3 รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง

EDM

1. ใส่แรงดันไฟฟ้า

ก่อนอื่นจะมีการใส่แรงดันไฟฟ้าที่ระหว่างขั้ว ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เรียกว่า แรงดันไฟ  
ฟ้าไร้โหลด (no-load voltage) (ประมาณ 60-280 V) ในสภาพเช่นนี้ระหว่างขั้วยังคง  
รักษาความเป็นฉนวนได้อยู่ จึงไม่มีกระแสไหล

2. สูญเสียความเป็นฉนวน

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงาน (ทำให้ระยะระหว่างขั้วแคบลง) จนถึงระยะหนึ่ง  
จะเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้น ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนที่มีประจุลบเริ่มไหล กล่าวคือ  
เริ่มมีกระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สปาร์ค, หลอมละลาย

เมื่อการสปาร์คเริ่มขึ้น เนื่องจากว่ามีฉนวน (สารละลาย) อยู่ระหว่างขั้ว จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่ำลง  $E = IR$  ตามกฎของโอห์ม แรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้ เราเรียกกันว่า แรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (discharge voltage)

### 4. เย็นตัว

ในช่วงที่เกิดการสปาร์คอยู่นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในระดับค่า ๆ หนึ่ง แต่ทว่าเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่ในระหว่างขั้วถูกปลดปล่อยออกมา แรงดันไฟฟ้าจะต่ำลงอย่างรวดเร็ว

### 5. กลับคืนสู่ความเป็นฉนวน

เมื่อการสปาร์คเสร็จสิ้นลงทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะกลับกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวางรูปร่างของคลื่นในการสปาร์คได้ดังรูปกล่าวนี้

#### พารามิเตอร์ที่สำคัญ

- เวลาทำการสปาร์ค,  $T_{on}$  = เวลาที่กระแสการสปาร์คไหล
- เวลาหยุดการสปาร์ค,  $T_{off}$  = เวลาตั้งแต่สปาร์คเสร็จจนถึงใส่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอีกครั้งถัดไป
- ค่ากระแส peak,  $I_p$  = ค่าสูงสุดของกระแสไฟฟ้า
- เวลารอกการสปาร์ค,  $T_w$  = เวลาจนถึงเริ่มที่จะเกิดการสปาร์ค(เวลาที่แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลอยู่) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะระหว่างขั้ว แรงดันไฟฟ้า ค่าความต้านทานของฉนวนสารละลายในตอนนั้น

$I_p, T_{on}, T_{off}$  แรงดันไฟฟ้าไว้ไหล (v) เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ปฏิบัติงานจะกำหนดตั้งขึ้นตามแต่สถานะในการขึ้นรูป ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญมากในการกำหนดระดับของพลังงานการสปาร์ค เมื่อเปรียบเทียบกับในหมู่พารามิเตอร์ต่างๆ ของเงื่อนไขการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ซึ่งมีจำนวนมาก

ต่อไปจะกล่าวถึงเงื่อนไขของการขึ้นรูปที่ใช้ในงานปฏิบัติจริง (ดูรูป 4-4 ประกอบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C170 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในเงื่อนไขของการขึ้นรูปหยาบ (roughing) C300 เป็นเงื่อนไขหนึ่งในเงื่อนไขของการขึ้นรูปละเอียด (finishing) เงื่อนไขทั้งสองนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลดเท่า แต่การขึ้นรูปหยาบจะใช้  $T_{off}$  ที่ยาว 350 ไมโครวินาที ในขณะที่การขึ้นรูปละเอียดใช้เพียง 12 ไมโครวินาที ซึ่งสั้นกว่า ดังนั้นค่าเฉลี่ยของกระแสในการขึ้นรูปสำหรับการขึ้นรูปหยาบคือ 1.4 A และสำหรับการขึ้นรูปละเอียดคือ 1 A

พลังงานการสปาร์คที่จะช่วยในการขึ้นรูปนั้น มีค่าเป็นผลคูณระหว่างขนาดกระแส I<sub>sp</sub> กับเวลาการสปาร์ค T<sub>on</sub> จากตัวอย่างที่ยกมานี้ พลังงานของการขึ้นรูปละเอียดจะมีค่าเพียง 1/400 ของการขึ้นรูปหยาบ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ค่ากระแสในการขึ้นรูป และเวลาการสปาร์คจะเป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

เวลาหยุดการสปาร์ค จะเป็นเวลาสำหรับรอให้สารละลายกลับคืนสู่ความเป็นฉนวน ซึ่งถ้าช่วงเวลานี้สั้นเกินไป จะทำให้แรงดันไฟฟ้าไว้ไหลดสำหรับการสปาร์คครั้งถัดไปถูกอัดเข้ามาในขณะที่ฉนวนยังไม่คืนสู่สภาพเดิม ซึ่งหมายถึงว่าได้เริ่มการสปาร์คต่อเนื่องไปโดยไม่มีเวลาการสปาร์ค การสปาร์คเช่นนี้เรียกกันว่า การสปาร์คแบบอาร์ค ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากำหนดตั้ง T<sub>off</sub> ให้ยาวจนเกินไป จำนวนของพัลส์ การสปาร์คต่อรอบเวลาจะลดลง ซึ่งก็คือ พลังงานการสปาร์คจะน้อยลง ทำให้ปริมาณที่ถูกตัดออกไปในการขึ้นรูปหรือความเร็วการขึ้นรูปลดต่ำลง ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการขึ้นรูปลดต่ำลงด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดช่วงเวลาดังกล่าวนี้ให้เหมาะสมพอดี

ค่ากระแสในการขึ้นรูป I<sub>sp</sub> และเวลาการสปาร์ค เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค ส่วนนี้จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมพลังงานการสปาร์ค

ในบางกรณี ถึงแม้ว่าสภาพการสปาร์คในการขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขหนึ่งจะดำเนินผ่านมาด้วยดีก็ตาม ถ้าหากว่าการขึ้นรูปได้ถูกดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ โดยที่ไม่สามารถขัดเศษผงที่เกิดจากการสปาร์ค หรือสิ่งเจือปนอื่น ซึ่งสลายตัวแยกออกมาจากสารละลายโดยความร้อนออกจากระหว่างขั้วได้หมด ซึ่งจะทำให้เกิดการสปาร์คซ้ำอันเป็น การลดประสิทธิภาพการขึ้นรูปให้ต่ำลง หรืออาจจะเปลี่ยนสภาพการสปาร์คไปเป็นแบบ อาร์ค ซึ่งทำให้การขึ้นรูปไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ในกรณีเช่นนี้จะต้องยืดเวลาให้ยาว ขึ้นเล็กน้อย เพื่อให้มีเวลาพอที่ระหว่างขั้วจะกลับคืนสู่สภาพปกติ

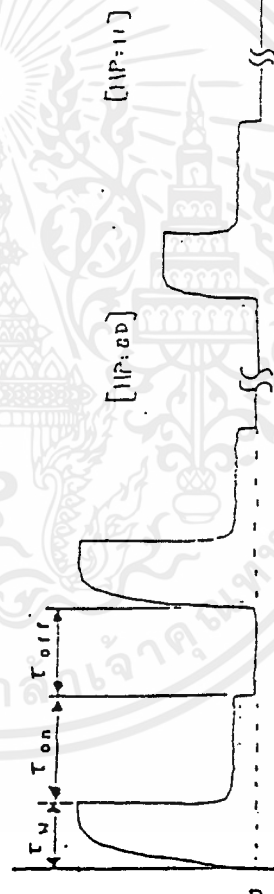
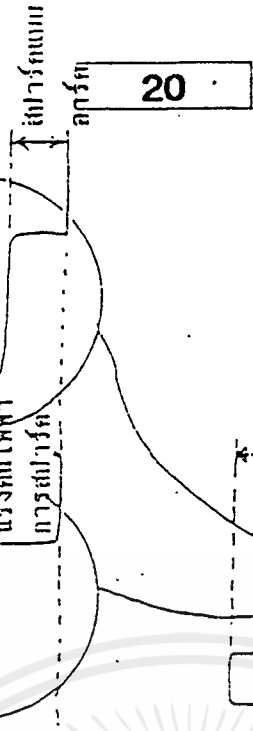
การคอยสังเกตรูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว จะทำให้สามารถทราบถึงสภาพดังกล่าวได้ และหัวข้อปัญหาที่สำคัญสำหรับเครื่อง EDM. ในปัจจุบันนี้คือ การควบคุมการขึ้นรูปให้มีเสถียรภาพโดยการใช้อุปกรณ์ระบบ NC เพื่อควบคุมพัลส์การสปาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเงื่อนไขการขับรูปในทางจริง

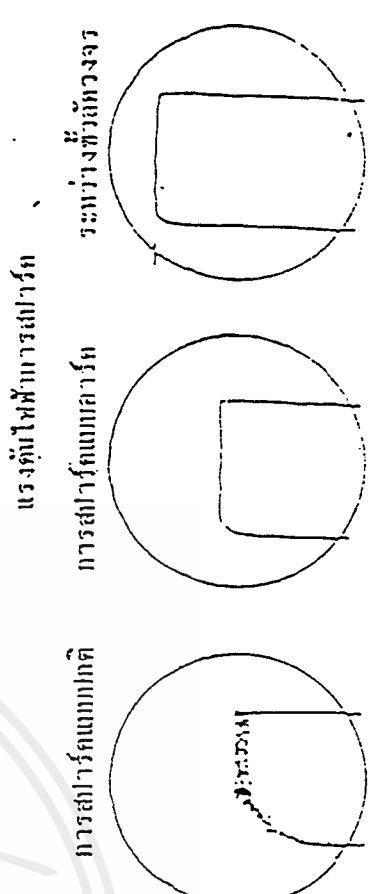
เงื่อนไขการขับรูป	$t_{on}$	$t_{off}$	I <sub>b</sub>	V	IIP	HA	เวลาการสลับ	เวลาหยุด	แรงดันไฟฟ้า	กระแส	
C170	19	19	10	1	11	1	350 $\mu$ sec	30 $\mu$ sec	90V	75V	14A
C300	5	4	1	1	52	3	12 $\mu$ sec	24 $\mu$ sec	90V	65V	1A

C170 เป็นเงื่อนไขในการขับรูปแบบ และเงื่อนไขแบบโวลเทจโวลเทจ  
 C300 เป็นเงื่อนไขในการขับรูปสุดท้าย และเงื่อนไขแบบโวลเทจโวลเทจ



รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในการสลับ

รูปร่างคลื่นของกระแสไฟฟ้าในการสลับ



$t_{on}$  = เวลาการสลับ  
 $t_{off}$  = เวลาหยุดการสลับ  
 $I_{cp}$  = เวลาที่แรงดันไฟฟ้าโวลเทจอยู่  
 $I_{cr}$  = ค่าสูงสุดของกระแส

#### 4-4 เครื่อง EDM ในปัจจุบัน

ถึงแม้ว่าเราจะสามารถทำให้การสปาร์คอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นได้หลายลูกคลื่น แต่จบลงเพียงแค่นั้นก็ไม่มี ความหมายในการใช้งาน อย่างไรก็ตามเรามีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมให้สภาพการสปาร์คสมบูรณ์อยู่ได้ตลอดเวลาอีกด้วย

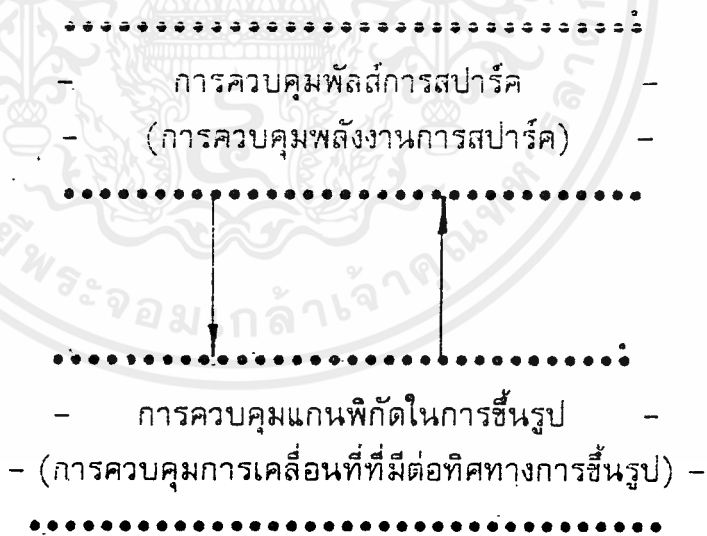
ดังนั้นปัญหาเกี่ยวกับหัวข้อนี้ก็คือ เราจะมึวิธีการเช่นใดที่จะสามารถควบคุมการสปาร์คซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เร็วมากได้ นอกจากนั้นการควบคุมเครื่อง EDM ซึ่งเป็นเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูป จะสามารถทำได้อย่างไร

##### 4-4-1 องค์ประกอบของการควบคุม

การควบคุมเครื่อง EDM นั้น มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ

1. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค (การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)
2. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

การควบคุมทั้ง 2 อย่างนี้ จะต้องถูกดำเนินการอย่างสัมพันธ์กัน ซึ่งถ้าขาดอย่างใดอย่างหนึ่ง ก็จะทำให้การขึ้นรูปตกเนินไปด้วยดีไม่ได้



##### 1. การควบคุมพัลส์การสปาร์ค (การควบคุมพลังงานการสปาร์ค)

การที่จะควบคุมพัลส์การสปาร์คนั้น ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วเสียก่อน หนึ่ง สิ่งที่ระบบ NC จะสามารถตรวจจับได้จริงโดยตรงนั้นคือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วและถ้าเราติดตามคอยบันทึกแรงดันไฟฟ้านี้ของแต่ละช่วงเวลา เราก็จะได้รูปร่างคลื่นของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์ค (บันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสถานะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟังก์ชันของเวลา) การติดตามจับดูรูปร่างคลื่นดังกล่าวนี้ จะทำให้เราสามารถรู้ถึงสภาวะระหว่างขั้วได้ในความเป็นจริงนั้น เราก็สามารถที่จะตรวจวัดได้จากรูปร่างคลื่นนี้

ยกตัวอย่างเช่น ระดับความเสถียร (stability) ของการสปาร์คนั้น เราสามารถคำนวณหาได้ โดยอินทิเกรตรูปร่างคลื่นแรงดันไฟฟ้าในสถานะฟังก์ชันของเวลา เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์ค (การกระจายของแรงดันไฟฟ้าการสปาร์คที่ดูในเชิงเวลา) ค่าเบี่ยงเบนความถี่ของการสปาร์คจะมีความหมายเช่นเดียวกับระดับความเสถียรของการสปาร์ค ดังนั้นถ้ามีการคำนวณเบี่ยงเบนดังกล่าวนี้อย่างสม่ำเสมอ ก็สามารถที่จะตรวจดูสภาพของความเสถียรของการสปาร์คได้

## 2. การควบคุมแกนพิกัดในการขึ้นรูป (การควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีต่อทิศทางการขึ้นรูป)

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

ถึงแม้ว่าจะได้รับคำสั่งแบบเดียวกันกับเครื่องมือกลขึ้นรูปประเภทตัด เช่น เครื่องที่ไปทางข้างหน้า 10 มิลลิเมตรก็ตาม ถ้าเพียงแต่ทำตามคำสั่งคือ เส้นแกนพิกัดในการขึ้นรูปไปข้างหน้าเพียงอย่างเดียว ขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานจะสัมผัสกัน (ระยะระหว่างขั้วกลายเป็น 0) ทำให้เกิดการลัดวงจรคือ ไม่สามารถเริ่มการสปาร์คขึ้นได้

การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คนั้น ระยะระหว่างขั้วที่ถูกต้องสมบูรณ์พอที่จะทำให้เกิดการสปาร์คได้จะถูกกำหนดให้มีพลังงานการขึ้นรูป หรือพื้นที่การสปาร์คที่ถูกกำหนดตั้งเอาไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดให้ระยะดังกล่าว นี้คงที่อยู่เสมอตลอดเวลาที่ทำการขึ้นรูป

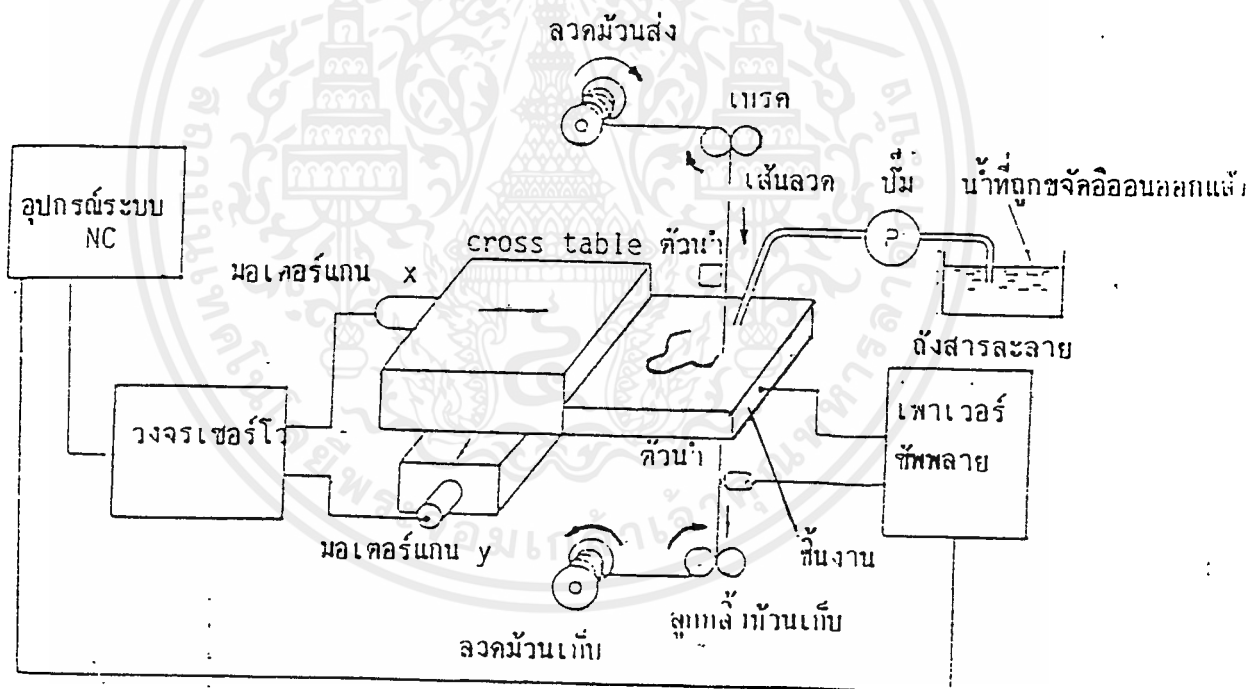
ถ้าเกิดการสปาร์คอย่างราบรื่นตลอดเวลาที่การขึ้นรูปกำลังดำเนินอยู่ ระยะระหว่างขั้วจะเปิดห่างออกรเรื่อย ๆ จึงต้องมีการควบคุมให้ระยะระหว่างขั้วคงที่อยู่เสมอ โดยการส่งป้อนแกนพิกัดให้สามารถทดแทนระยะที่คลาดเคลื่อนไป นอกจากนั้นแล้วในกรณีเศษผงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างขั้ว โดยการสปาร์คถูกขจัดระบายออกไปไม่เพียงพอและบรรยากาศที่เกิดการสปาร์คซ้ำขึ้นได้ ซึ่งสภาวะเช่นนี้จะเปรียบเสมือนระยะระหว่างขั้วแคบลง ดังนั้นต้องมีการควบคุมให้แกนพิกัดในการขึ้นรูปเคลื่อนที่ในทิศทางที่แยกขั้วออกจากกัน

ระยะระหว่างขั้วนี้สามารถทราบได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว ซึ่ง แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว หมายถึง แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ซึ่งถ้าระยะระหว่างขั้วแคบลง (ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้เกินไป) แรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้น แต่ถ้าระยะกว้างขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรนี้จะต่ำลง จากความสัมพันธ์ที่ว่า แรงดันไฟฟ้าแปรผกผันกับระยะทางระหว่างขั้วนี้เอง เราสามารถรู้ถึงระยะระหว่างขั้วได้โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว

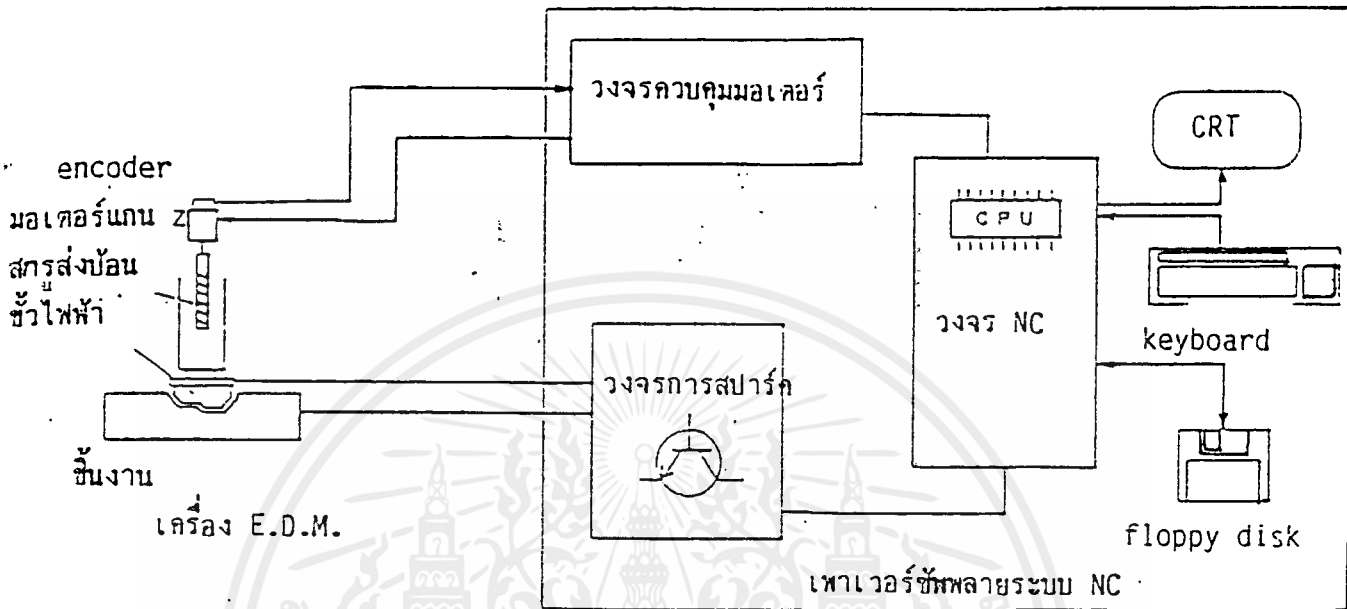
#### 4-4-2 ทฤษฎีการควบคุมเครื่อง NC-EDM

ระบบควบคุมต่าง ๆ ของเครื่อง NC-EDM นั้น สามารถที่จะอธิบายได้ดังต่อไปนี้ อุปกรณ์ระบบ (NC) จะรับข้อมูลเกี่ยวกับระยะระหว่างขั้วมาจากวงจรการสปาร์คและส่งคำสั่ง ซึ่งกำหนดปริมาณการส่งป้อนข้อมูลของแกนไปยังวงจรควบคุมมอเตอร์ นอกจากนี้แล้วหน้าที่ของ NC ก็ยังมีการรับคำสั่งจากผู้นับปฏิบัติการคุมเครื่องหรือบอกแสดงสภาพต่างๆของเครื่อง



รูป 4-5 แสดงระบบควบคุมของเครื่อง wire cut EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4-6 แผนผังระบบควบคุมเครื่อง EDM

### วงจรสปาร์ค

เป็นวงจรที่สร้างพัลส์การสปาร์ค วงจรนี้จะเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าชิ้นงานและทำหน้าที่ป้อนจ่ายพลังงานในการขึ้นรูป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นก็คือ เครื่องที่ถูกผลิตขึ้นมาในปัจจุบันนี้ โดยส่วนมากจะใช้ทรานซิสเตอร์ P-MOS เป็นส่วนหัวใจสำคัญของวงจร ซึ่งสามารถควบคุมพัลส์ได้ละเอียดในหน่วยเวลาระดับ nsec

นอกจากนั้นแล้ว คุณสมบัติพิเศษในการเริ่มไหลของกระแสไฟฟ้าการสปาร์คนั้น จะมีความเร็วสูงขึ้นถึง 800 A ได้ภายในเวลาเพียง 1 ไมโครวินาที

### วงจรควบคุมมอเตอร์ (เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า motor driver)

ระบบควบคุมมอเตอร์ ซึ่งรวมถึงมอเตอร์ด้วยนั้นเป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุมเครื่อง ในปัจจุบันเครื่องจักรในงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนของการกำหนดตำแหน่งการส่งป้อน

มอเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานดังกล่าวนี้ จะสตาร์ทและหยุดสลับกันไปบ่อยมาก คุณสมบัติพิเศษในช่วงเริ่มสตาร์ท จึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อระดับความละเอียดในการขึ้นรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้ว สมรรถนะการทำงานของวงจรถบคุมจะเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติพิเศษในการควบคุม

อนึ่ง มอเตอร์ที่เหมาะสมจะนำมาใช้งานดังกล่าวนี้ จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษดังต่อไปนี้คือ

- หมุนได้ทั้งทวนและตามเข็มนาฬิกาโดยที่คุณสมบัติพิเศษของสองทิศทางนี้สมมาตรกัน
- หยุดได้อย่างกะทันหัน
- แรงหมุนทั้ง starting torque และ holding torque มีค่ามาก
- โมเมนต์เฉื่อย (moment of inertial) ของตัวหมุน (rotor) มีค่าน้อย
- สามารถหมุนอย่างราบเรียบแบบความเร็วต่ำได้

มอเตอร์เหล่านี้โดยทั่วไปมีชื่อเรียกว่า เซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น พัลส์มอเตอร์, สเต็ปมอเตอร์, DE-AC มอเตอร์ เครื่องมือกลในปัจจุบันโดยส่วนมากใช้ DC, AC มอเตอร์ เป็นหลัก

#### Encoder

ตัว AC-DC มอเตอร์เองไม่สามารถรู้ถึงว่า เคลื่อนที่ไปเท่าไรได้ อนึ่งการที่จะควบคุมตำแหน่ง หรือปริมาณการส่งป้อนของแกนพิกัดในการขึ้นรูปให้ได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ถึงปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งตามปกติแล้วจะติดตั้งเครื่องตรวจวัดมุมการหมุน (rotary encoder) เข้าที่แกนของมอเตอร์และใช้วิธีการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ป้อนกลับ (feed back) ไปยังวงจรถบคุมมอเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเคลื่อนที่ ซึ่งถูกส่งไปยังมอเตอร์ ผลการเปรียบเทียบนั้น ถ้าวัดค่าแตกต่างเป็น 0 แสดงว่ามอเตอร์ได้ทำงานตรงตามคำสั่ง Semi closed feedback

ในกรณีที่ค่า lead angle ของสกรูส่งป้อนและแรงเสียดทานทางกลของแกนส่งป้อนมีค่าคงที่ เราสามารถถือได้ว่า มุมการหมุนของมอเตอร์ = ปริมาณการเคลื่อนที่ของแกนได้ ซึ่งหมายถึงว่า ถ้าควบคุมการหมุนของมอเตอร์ได้ก็สามารรถนับได้ว่าแกนได้เคลื่อนที่ตามระยะที่กำหนด

วิธีการตรวจวัดตำแหน่งและควบคุมเช่นนี้เรียกกันว่า (Semi closed feedback) เครื่องมือกลทุกวันนี้ โดยส่วนมากนำวิธีการนี้เข้ามาใช้

#### Full closed feedback

ส่วนวิธีการอื่นซึ่งเรียกว่า full closed feedback นั้น จะใช้วิธีตรวจวัดปริมาณการเคลื่อนที่แท้จริงของแกนโดยตรง และส่งข้อมูลป้อนกลับไปยังวงจรถบคุม เนื่องจากว่าแกนดังกล่าวจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง จึงจำเป็นที่จะติดตั้งเครื่องตรวจวัดตำแหน่ง (linear encoder) ที่เหมาะสมกับระยะชัก (stroke) ของเครื่องจักรขึ้นรูปไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็น ๆ ด้วยวิธีการเช่นนี้จะใช้กับเครื่องจักรซีเนอร์ที่ทำงานซีเนอร์ความละเอียดสูงใน ระดับ 1 ไมโครเมตร หรือละเอียดกว่านั้น

วิธีการนี้ใช้การตรวจวัดตำแหน่งที่แท้จริงโดยตรง จึงสามารถกำหนดตำแหน่ง ได้อย่างถูกต้องมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Semi closed feedback แต่ในทางกลับกัน วิธีการนี้ก็ยังมีปัญหาที่เหลืออยู่อีก คือ ปัญหาการจัดหาช่องว่างสำหรับติดตั้ง linear encoder ปัญหาการตอบสนองช้าของระบบกลไกอันเนื่องมาจากน้ำหนักเฉื่อยของส่วนที่ เคลื่อนที่ของแกน นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติพิเศษในการตอบสนองของระบบควบคุม โดยรวม จะมีแนวโน้มที่ไวเกินไบบอันเนื่องมาจากความละเอียดในการตรวจวัดสูง จึงทำ ให้การปรับตั้งต่าง ๆ ทำได้ยาก ผลสรุปก็คือ การใช้วิธีนี้จะต้องลงทุนสูงกว่ามาก

### อุปกรณ์ระบบ NC

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ NC จะมีความจำเป็นในการนำมาช่วยให้ควบคุมไว้ทั้ง 2 อย่างคือ การควบคุมพัลส์การถาวร และการควบคุมแกนที่กีดในการซีเนอร์ การนำ ระบบ NC เข้ามาใช้กับเครื่อง EDM ทำให้เครื่อง EDM สามารถที่จะทำงานซีเนอร์ละเอียด ได้

เราสามารถกล่าวได้ว่า CPU (Central Process Unit) เป็นสมองของอุปกรณ์ ระบบ NC ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ขนาด 16 bit เป็นหลัก แต่ทว่าแนวโน้มในปัจจุบันแสดง ถึงว่า ระบบที่ควบคุมจะถูกพัฒนาให้มีระดับสูงและซับซ้อนมากขึ้นไปอีกรวมทั้งจะมีการ เพิ่มเติมฟังก์ชันต่าง ๆ เข้าไปด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ระบบ NC ที่มีระดับสูงจะเริ่มมีการนำ CPU ขนาด 32 bit เข้ามาใช้แทนเพื่อที่จะให้ทำงานได้เร็วขึ้นเหมาะสมกับซอฟต์แวร์ ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นด้วย

นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์ระบบ NC ยังทำให้ขอบเขตของวิธีการควบคุมกว้าง ขวางหรือมีอิสระมากขึ้นด้วย ถ้าเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ระบบ NC เข้าระหว่างเซนเซอร์ (sensor) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดปรากฏการณ์กับส่วนที่เป็นกลไกการเคลื่อนที่ทำงาน เรา ก็สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงวิธีการควบคุมได้ เพียงแค่เปลี่ยนซอฟต์แวร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์ระบบ NC เท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้สามารถควบคุมระบบที่ซับซ้อนและมีระดับสูงได้ รวมทั้งควบคุมปรากฏการณ์ที่รวดเร็วมาก เช่น การสปาร์คได้ด้วย

เครื่องจักรในสมัยที่ผ่านมา นั้น จะใช้วิธีผลิตลึงค์หรือแคมขึ้นมาใหม่ และถ้ายังไม่ เพียงพออาจจะต้องออกแบบใหม่เลย ดังนั้นอุปกรณ์ระบบ NC จะช่วยทำให้ขั้นตอน การพัฒนาซึ่งจะต้องมีการทดลองและผิดพลาด (try & error) สลับกันไปจนกว่าจะ สำเร็จให้เร็วขึ้นมากได้

สำหรับวิธีการควบคุมนั้น จะอยู่ในรูปของซอฟต์แวร์ในดักกลางเก็บบันทึก เช่น ROM (Read Only Memory) หรือ floppy disk ซึ่งซอฟต์แวร์เหล่านี้จะสนับสนุนอุปกรณ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีระบบ NC เราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มเติมฟังก์ชันเกี่ยวกับวิธีการควบคุมได้อย่างง่ายดาย โดยการสับเปลี่ยนตัวกลางเก็บบันทึกเท่านั้น และยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้เข้ากับความต้องการของผู้ใช้ (users) ได้อีกด้วย

#### 4-5 บรรยากาศระหว่างขั้ว

ระหว่างขั้ว (ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับขั้วงาน) จะทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นนั้น จำเป็นต้องมีบรรยากาศอย่างไรบ้าง

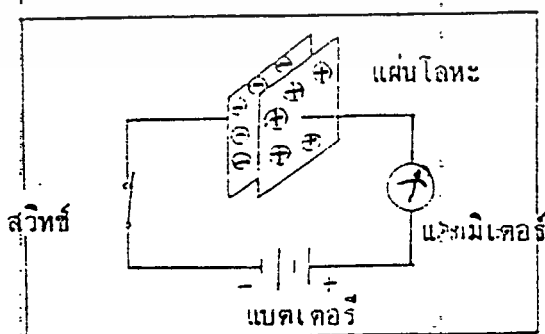
##### 4-5-1 คอนเดนเซอร์และความจุไฟฟ้าสถิตย์

ความสัมพันธ์ของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ระหว่างขั้วนั้น ถ้าคิดเช่นเดียวกับกับหลักการของคอนเดนเซอร์ก็จะทำให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น คอนเดนเซอร์เป็นชิ้นส่วนทางไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเก็บสะสมไฟฟ้าไว้ได้ชั่วคราวในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

เป็นที่ทราบกันว่า ถ้าจัดให้แผ่นโลหะ 2 แผ่น หักหน้าเข้าหากันและต่อแบตเตอรี่ แอมมิเตอร์ สวิตช์ จะมีกระแสไฟฟ้าผ่านแอมมิเตอร์ทันทีในจังหวะที่เปิดสวิตช์

สาเหตุก็คือ อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ จะไหลจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปยังแผ่นโลหะของคอนเดนเซอร์ และขั้วลบอิเล็กตรอนของแผ่นโลหะด้านบวกไปยังขั้วบวกของแบตเตอรี่ (การที่เข็มชี้ของแอมมิเตอร์แกว่งนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นเพราะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านคอนเดนเซอร์ เราจะเห็นคล้ายกับมีกระแสไฟฟ้าไหลในช่วงที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เท่านั้น)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าของระหว่างแผ่นโลหะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ จะเกิดความสมดุลขึ้นกับแบตเตอรี่ ทำให้กระแสไฟฟ้าหยุดไหล (การชาร์ตไฟเสร็จสิ้นลง) หลังจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าจะถอดแบตเตอรี่ออก ประจุไฟฟ้าก็จะยังคงเหลืออยู่ในคอนเดนเซอร์ ความสามารถในการเก็บสะสมประจุไฟฟ้าเช่นนี้เรียกว่า ความจุไฟฟ้าสถิตย์ (ความจุของคอนเดนเซอร์)



รูป 4-7 หลักการของคอนเดนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบที่จะกำหนดความจุไฟฟ้าสถิตย์นี้มี 3 อย่าง

1. การเปลี่ยนพื้นที่ของแผ่นโลหะ

ถ้าพื้นที่ใหญ่ขึ้นก็สามารถเก็บสะสมประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น

2. การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

ถ้าระยะห่างแคบลง ความจุจะสูงขึ้น แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทนทานได้จะต่ำ

ลง

3. การเปลี่ยนชนิดของสารไดอิเล็กตริก

ความจุไฟฟ้าสถิตย์จะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ค่าความต้านทานของฉนวน) ของวัสดุ (สารไดอิเล็กตริก) ถ้าความต้านทานสูง ความจุจะสูงด้วย ในรูปที่อธิบายหลักการนั้นได้จัดรวมแผ่นโลหะในอากาศ สารไดอิเล็กตริกก็คืออากาศ อื่น ๆ ที่มีค่าความต้านทานสูงกว่าอากาศ ซึ่งถูกใช้เป็นส่วนไดอิเล็กตริกในคอนเดนเซอร์ที่มีความจุสูงเสียเป็นเวลานาน ซึ่งเรียกกันว่า ออซิลี-คอนเดนเซอร์ นอกจากนั้นยังมี ไมก้า-คอนเดนเซอร์, บอรัล-คอนเดนเซอร์ ซึ่งล้วนแต่ใช้ชื่อตามสารไดอิเล็กตริกทั้งนั้น

4-5-2 ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว

ความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ถ้าจะนำมากล่าวในกรณีของระหว่างขั้วของเครื่อง EDM ประจุไฟฟ้าของระหว่างขั้ว (ความจุไฟฟ้าสถิตย์) จะมีขนาดความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. ถ้าพื้นที่การสปาร์คมีขนาดใหญ่ความจุจะสูง

พื้นที่การสปาร์ค หมายถึง พื้นที่ของส่วนที่เกิดการสปาร์คขึ้นจริงระหว่างขั้วไฟฟ้า และชิ้นงานในฝั่งตรงกันข้าม

2. ถ้าระยะระหว่างขั้ว (ระยะห่างการสปาร์ค) แคบ ความจุจะสูง

ถ้าระยะระหว่างขั้ว แคบ ความจุไฟฟ้าสถิตย์ก็จะมีค่าแรงสูงขึ้น

3. ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งหมายถึง สารละลายที่ใช้กับเครื่อง EDM สูง ความจุจะสูง

โดยปกติแล้วการสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศ แต่ในเครื่อง EDM นั้นจะใช้ช่องเหลว ซึ่งก็คือ ใช้ช่องเหลวเป็นสารไดอิเล็กตริกระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น จำเป็นต้องขจัดระยะห่างเฉพาะทางโลหะซึ่งเกิดจากการขึ้นรูปออกไป ดังนั้นช่องเหลวที่มีคุณสมบัติการไหลที่ดี จะเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

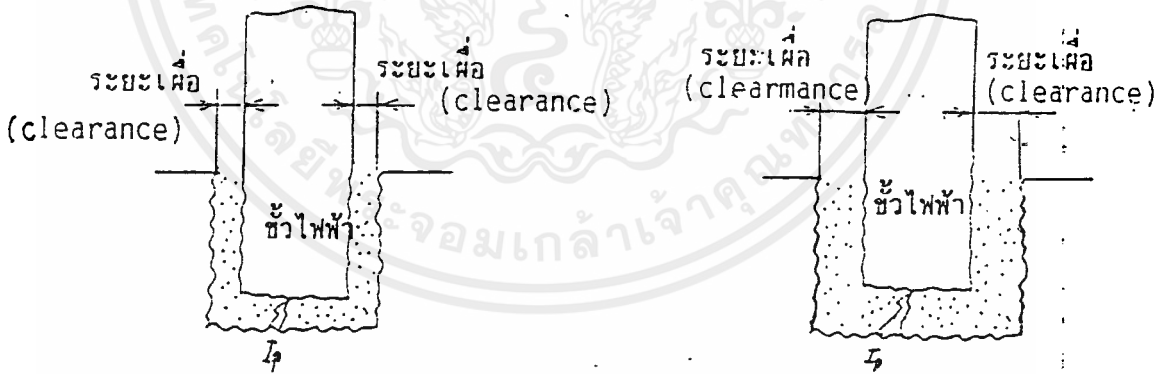
4-5-3 ระยะห่างการสปาร์ค (ระยะระหว่างขั้ว)

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงานนั้น จำเป็นต้องมีระยะห่างขนาดหนึ่ง ถ้าใกล้เกินไปจะเกิดการสปาร์คแบบอาร์คเช่นเดียวกับการเชื่อม หรือถ้าห่างกันเกินไปการสปาร์คก็จะไม่เกิดขึ้น ระยะห่างดังกล่าวนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการขึ้นรูป สภาพความสกปรกหรือสภาพการไหลของสารละลาย

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการสปาร์คกับค่าความต้านทานของฉนวน

การที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ให้มีความละเอียดสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้ชิ้นงานให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ระยะห่างการสปาร์คแคบลง เนื่องจากว่าพื้นที่การสปาร์คจะถูกกำหนดลงไปโดยรูปทรงการขึ้นรูป ดังนั้นการที่ย่นระยะห่างการสปาร์คให้แคบลง ก็ควรที่จะเพิ่มค่าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วให้สูงขึ้นด้วย

ค่าความต้านทานของฉนวนนั้น เจดยทวิเบแล้วน้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ เครื่อง EDM จึงใช้น้ำมันมาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก น้ำมันมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงถึงขนาดที่ถูกใช้เป็นน้ำมันฉนวนของหม้อแปลงขนาดใหญ่



สารละลายประเภทน้ำมัน—>ความต้านทานสูง  
—>ระยะห่างการสปาร์ค แคบ

สารละลายประเภทน้ำ—>ความต้านทานต่ำ  
—>ระยะห่างการสปาร์ค กว้าง

รูป 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างการสปาร์คกับค่าความต้านทานของ

ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น ถ้าค่าความต้านทานของสารไดอิเล็กทริคระหว่างขั้วสูง (ค่าความต้านทานของสารละลายสูง) จะทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนขึ้นได้ยาก ดังนั้นจึงต้องจัดวางให้ขั้วไฟฟ้าเข้าใกล้กับชิ้นงานมากขึ้น ผลที่ได้รับคือ เราสามารถย่นระยะห่างการสปาร์คให้แคบลงได้ ซึ่งจะมีผลดีสำหรับงานขึ้นรูปละเอียด

ในทางกลับกัน ถ้าใช้น้ำเป็นสารละลายในเครื่อง EDM ค่าความต้านทานจะต่ำกว่าน้ำมัน ดังนั้นการสูญเสียความเป็นฉนวนของสารละลายจะเกิดขึ้นได้ง่ายในระยะที่ห่างกันกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมัน ซึ่งก็หมายความว่า ระยะห่างการสปาร์คจะกว้างขึ้น แต่ถ้าเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวนและเกิดมีกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลขึ้นแล้ว กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดใหญ่ตามส่วนที่ค่าความต้านทานต่ำลง ดังนั้นเราสามารถที่จะให้พลังงานระดับสูงไว้ ซึ่งจะมีผลดีคือ สามารถที่จะใช้กับงานขึ้นรูปที่ต้องการความเร็วสูงได้

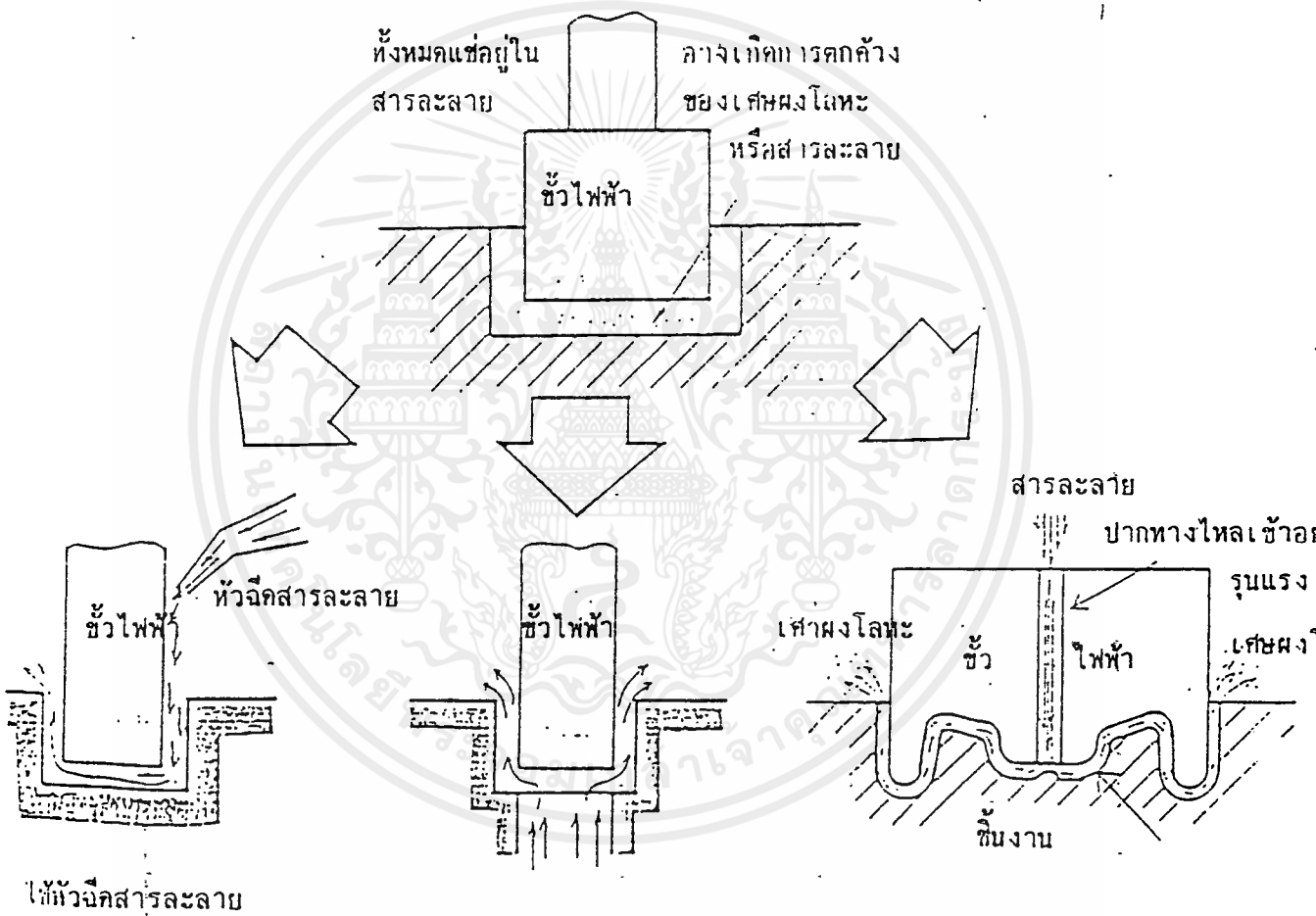
#### 4-6 สารละลายที่ใช้กับเครื่อง EDM

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น จำเป็นต้องใช้ฉนวนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน ซึ่งเรื่องนี้ได้อธิบายก่อนหน้ามาแล้ว บุคคลากรการสปาร์คจะเกิดขึ้นได้แม้แต่ในอากาศหรือในสุญญากาศ แต่ถ้าความต้านทานของฉนวนระหว่างขั้วมีค่าสูง เราก็สามารถที่จะให้เกิดการสปาร์คด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ รวมทั้งสามารถย่นระยะระหว่างขั้วให้แคบลงได้อีกด้วย

ถ้าจะพูดในทางกลับกัน การที่จะสร้างระยะห่างการสปาร์คที่แคบมาก ๆ ราว  $1/100 - 1/1000$  mm และทำให้เกิดการสปาร์คซึ่งได้ผลดีในการขึ้นรูปในระยะห่างขนาดนี้ นั้น เราจำเป็นต้องใช้ฉนวนระหว่างขั้วที่มีค่าความต้านทานที่สูง

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM เราจำเป็นต้องสร้างให้ระยะห่างการสปาร์คแคบ เพื่อที่การขึ้นรูปจะได้มีความละเอียดสูง ดังนั้นฉนวนระหว่างขั้วที่มีค่าความต้านทานสูงกว่า จะใช้ได้ผลดีกว่า โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานของน้ำจะสูงกว่าอากาศและน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ นอกจากนั้นแล้วของเหลวเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติการไหลดีจึงเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นฉนวนของเครื่อง EDM ดังนั้นน้ำมันจึงถูกใช้เป็นฉนวนในเครื่อง EDM มาตั้งแต่สมัยเริ่มแรก

โดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานของน้ำจะสูงกว่าอากาศ และน้ำมันจะสูงกว่าน้ำ จึงทำให้สามารถย่นระยะห่างการสปาร์คให้แคบลงได้



รูป 4-9 การใช้สารละลายในการขจัดระบายนอกเศษผงโลหะออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4-6-1 สารละลายที่สกปรกจากการใช้งาน

ในเวลาเดียวกันสารละลายยังทำหน้าที่อื่นอีกอย่างหนึ่งก็คือ ทำให้เกิดค่าขดความดันสูงเพื่อที่จะอัดดันให้ส่วนที่หลอมละลายของชิ้นงานหลุดกระเด็นออกไป ซึ่งได้อธิบายมาแล้วในเรื่องของทฤษฎีการสปาร์ค

นอกจากนั้นแล้ว วัสดุหลอมละลายที่ถูกดันให้หลุดออกมานั้นจะถูกละลายนี้ให้เป็นตัวลงอย่างกระทันหันและกลายเป็นเม็ดผงที่เล็กมาก (เศษผงโลหะที่เกิดจากการขึ้นรูป) เศษผงโลหะเหล่านี้จะทำให้ระหว่างขั้วสกปรก ซึ่งจะเป็นอุปสรรคกีดขวางการเกิดการสปาร์คที่สมบูรณ์ ดังนั้นการรักษาสภาพแวดล้อมของการสปาร์คที่ระหว่งขั้วให้ดีอยู่เสมอจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งเราสามารถทำได้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น ใช้ฉีดทำให้สารละลายเกิดการไหลอย่างรุนแรง เพื่อที่จะล้างขจัดเศษผงเหล่านี้ออกไปจากระหว่างขั้ว

ดังนั้น การขจัดระบายเศษผงโลหะออกไปดังที่กล่าวมานี้ ก็เป็นหน้าที่อันสำคัญของสารละลายเช่นกัน

สารละลายที่ผ่านการใช้งานนั้นจะสกปรกขึ้นเรื่อย ๆ เครื่อง EDM จึงมีการใช้ระบบส่งจ่ายสารละลายหมุนเวียนตลอดเวลาระหว่างการขึ้นรูป โดยที่สารละลายที่สกปรกจากการใช้งานจะถูกส่งกลับไปยังถังส่งจ่ายสารละลาย เพื่อผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์และใช้ป้อนในการส่งมายังขั้วขึ้นรูปของเครื่องอีกครั้ง

#### 4-6-2 สารละลายประเภทน้ำมันและสารละลายประเภทน้ำ

สารละลายประเภทน้ำมันมีค่าความต้านทานสูง จึงสามารถที่จะข่นระยะระหว่างขั้วให้แคบลงมาก ๆ ได้ แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะมีขนาดไม่ใหญ่ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วความเร็วในการขึ้นรูปจึงต่ำ แต่ในทางกลับกัน ผิวการขึ้นรูปจะละเอียด

ส่วนสารละลายประเภทน้ำนั้น ถ้าในสภาวะปกติแล้วจะมีปริมาณไอออนผสมอยู่มาก จึงมีค่าความต้านทานต่ำ เวลาที่จะขึ้นรูปก็จำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำให้ความต้านทานสูงขึ้น ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการสับเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การขึ้นรูปโดยปกตินั้นโดยส่วนมากจะตั้งกำหนดให้อยู่ในช่วง 50,000-100,000  $\Omega \cdot \text{cm}$

เนื่องจากว่าน้ำมีค่าความต้านทานต่ำกว่าน้ำมัน จึงสามารถที่จะทำให้กระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปโดยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ได้ ความเร็วในการขึ้นรูปจึงสูง แต่ในทางกลับกัน ความละเอียดของการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย โดยปกติจะด้อยกว่าน้ำมัน คุณสมบัติพิเศษเหล่านี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่า น้ำและน้ำมันมีคุณสมบัติกลับกันดังตาราง

เอกสารต่อไปนี้เป็นที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของสารละลาย	ความเร็วของการขึ้นรูป	ความหยาบของผิวที่ได้
น้ำ	สูง	หยาบ
น้ำมัน	ต่ำ	ละเอียด

**ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของความเร็วของการขึ้นรูปและความหยาบของผิวที่ได้ระหว่างน้ำกับน้ำมัน**

เครื่อง EDM ประเภท diesinking โดยส่วนมากจะสารละลายประเภทน้ำมัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในทางตรงกันข้ามเครื่อง EDM ประเภท wire cut โดยทั่วไปจะใช้ น้ำจืดหรือสารละลายที่ใช้กับเครื่อง EDM ประเภทต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นจะเป็นการปฏิบัติตามที่เคยปฏิบัติกันมาเสียมากกว่า

**4-7 ขั้วไฟฟ้า**

การขึ้นรูปประเภทตัดจะใช้เครื่องมือ เช่น cutting tool, end mill สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน ส่วนการขึ้นรูปด้วยวิธีสบาร์คก็เป็นเช่นเดียวกันคือ จำเป็นต้องมีเครื่องมือสำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน ในกรณีของการขึ้นรูปด้วยวิธีการสบาร์คนั้น อาศัยไฟฟ้าในการขึ้นรูป จึงเรียกเครื่องมือนี้ว่า ขั้วไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้วการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น ขั้วไฟฟ้าจะมีรูปทรงเหมือนกับผลิตภัณฑ์และชิ้นงานในการขึ้นรูป ซึ่งจะใช้เป็นพิมพ์ของผลิตภัณฑ์จะมีรูปทรงกลับกันตรงข้าม กล่าวคือ ส่วนที่ยื่นออกมาของขั้วไฟฟ้านี้จะตรงกับส่วนที่เป็นหลุมลงใบของชิ้นงาน การขึ้นรูปด้วยขั้วไฟฟ้าเช่นนี้เรียกกันว่า การขึ้นรูปประเภทถ่ายแบบ

**4-7-1 วัสดุและคุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปของขั้วไฟฟ้า**

**ทองแดง**

คุณสมบัติในการขึ้นรูป (machinability) ค่อนข้างไม่ดี แต่มีค่าความแข็งที่ต่ำจึงนำมาขึ้นรูปได้ง่าย ราคาก็ไม่สูงนัก ถ้าชิ้นงานเป็นวัสดุประเภทเหล็กกล้า ก็สามารถที่จะทำการขึ้นรูปแบบไม่สึกหรอ (อัตราสึกหรอของขั้วไฟฟ้าต่ำกว่า 1%) ได้ เพียงแต่ว่าทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวด้วยความร้อนที่สูง เวลาที่จะขึ้นรูปชิ้นสุดท้ายแบบละเอียด จึงจำเป็นต้องคอยระวังเกี่ยวกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของส่วนที่ขึ้นรูปด้วย ในประเทศ

เอกสารนี้เป็น**บัญชีขั้วไฟฟ้าทองแดงถูกใช้มากที่สุด**เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กราไฟต์

คุณสมบัติในการขึ้นรูปดีมาก แต่เปราะ จึงจำเป็นต้องระวังมากในการใช้งาน การใช้ขั้วกราไฟต์สำหรับเครื่อง EDM จะทำให้คุณสมบัติพิเศษของการขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์ค ดีมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น (อัตราการกัดไฟฟ้าสูง จึงทำให้ มีขนาดใหญ่ได้) เจื่อนใจที่ทำให้การขึ้นรูปดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะเป็นเงื่อนไขการขึ้นรูป ที่มีอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าต่ำ สำหรับการขึ้นรูปละเอียด ดังนั้นขั้วกราไฟต์จึงมีความเหมาะสมกับงานขึ้นรูปความเร็วสูง เพียงแต่ว่าในปัจจุบันได้มีการพัฒนากราไฟต์ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นมา ซึ่งได้ผ่านการปรับปรุงให้ดีขึ้นทั้งด้านความเปราะและอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นกราไฟต์จึงได้ถูกนำมาพิจารณาในฐานะวัสดุทำขั้วไฟฟ้า อีกครั้งหนึ่ง

### คอปเปอร์ทังสเตน

คุณสมบัติในการขึ้นรูปดีกว่าทองแดง ถ้านำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้านี้ก็จะใช้งานได้ อย่างมีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปที่ดีกว่าทองแดงเช่นกัน แต่ราคาสูงกว่าทองแดง ประมาณ 40 เท่า ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทังสเตนนี้เหมาะสมกับการขึ้นรูปความละเอียด สูง การขึ้นรูปก็พื้นที่การสปาร์คมีขนาดเล็ก โดยเฉพาะถ้าเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานที่เป็น โลหะผสมประเภทคาร์ไบด์นั้น ขั้วไฟฟ้าทองแดงจะมีอัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าที่สูง แต่ถ้าใช้ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์ทังสเตน จะทำให้สามารถลดอัตราการสึกหรอดังกล่าวให้ เหลือราว 15% ได้และได้คุณสมบัติพิเศษในการขึ้นรูปที่ดีอีกด้วย

### ซิลเวอร์ทังสเตน

คุณสมบัติต่างๆ คล้ายกับคอปเปอร์ทังสเตน แต่มีราคาสูงกว่าทองแดงประมาณ 100 เท่า ขั้วชนิดนี้มักถูกใช้ในงานขึ้นรูปโลหะผสมประเภทคาร์ไบด์

### ทองเหลือง

อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าสูงและความเร็วในการขึ้นรูปต่ำ จึงไม่มีการใช้ขั้ว ทองเหลืองในเครื่อง EDM แต่ทว่าทองเหลืองมีความเหนียวแน่น (ductility) ประเภท wire cut กันอย่างกว้างขวาง บริษัทผู้ผลิตวัสดุเส้นโลหะต่าง ๆ ได้มีการ ทดลองนำวัสดุอื่น เช่น อลูมิเนียมมาผสมด้วย เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติเกี่ยวกับแรง ตึงและการมันให้ดีขึ้น ลวดที่ทำจากทองเหลืองจะเป็นประเภทใช้แล้วทิ้ง เพราะว่ามี อัตราการสึกหรอที่สูง

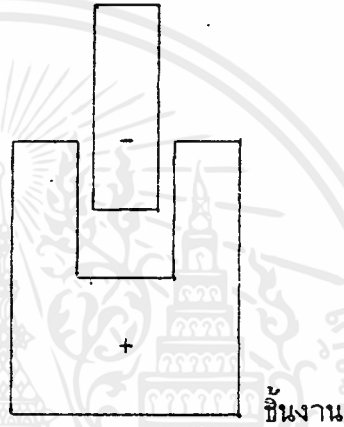
สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่ใช้กันโดยทั่วไปนั้น คือขนาด 0.2 mm แต่สำหรับงานขึ้นรูปความเร็วสูง จะใช้ขนาด 0.3 mm และสำหรับงานขึ้นรูปละเอียดจะ ใช้ขนาด 0.03 mm (ทำจากทั้งสแตน)

คุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าและชิ้นงาน แยกตามวัสดุที่ทำ

วัสดุขั้วไฟฟ้า	วัสดุชิ้นงาน	ขึ้นรูปด้วยอัตราเร็วหรือของขั้วที่ต่ำ	ทิศทางการขั้ว
ทองแดง	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
ทองแดง	โลหะผสมคาร์ไบน์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวก
คอปเปอร์	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
ทั้งสแตน	โลหะผสมคาร์ไบน์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวก
ซิลเวอร์	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
ทั้งสแตน	โลหะผสมคาร์ไบน์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวก
กราไฟต์	เหล็กกล้า	ได้	ตรงข้าม
กราไฟต์	โลหะผสมคาร์ไบน์	ไม่ได้	ชิ้นงานเป็นบวก
ทองเหลือง	เหล็กกล้า	ไม่ได้	ตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วไฟฟ้า



ทิศทางขั้วแบบชิ้นงานเป็นบวก

(ทิศทางขั้วแบบตรงข้าม คือ ทิศทางที่ชิ้นงานเป็นลบ)

## 4-8 องค์ประกอบ 4 ข้อที่ควรทราบ

ผู้ใช้เครื่อง EDM ในการขึ้นรูปนั้น คงจะมีเป้าหมายต่าง ๆ เหมือนกัน คือ ความเร็วในการขึ้นรูปที่สูง ผิวการขึ้นรูปที่สวยงาม และความละเอียดในการขึ้นรูปที่สูง ซึ่งเป้าหมายเหล่านี้ก็กลายมาเป็นหัวข้อในการพัฒนาของบริษัทผู้ผลิตเช่นเดียวกัน เวลาที่จะขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM นั้น เราจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบ 4 ข้อต่อไปนี้ตลอดเวลา

## 1. ความเร็วในการขึ้นรูป (g/min)

ถ้ามองจากจุดยืนของประสิทธิภาพการผลิตแล้ว ความเร็วในการขึ้นรูปเป็นหัวข้อปัญหาที่สำคัญมาก การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คนั้น ถ้าจะเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่น ๆ เช่น การตัด ก็จะถูกจัดอยู่ในประเภทที่มีความเร็วต่ำมาก การใช้เงื่อนไขที่การขึ้นรูปดำเนินไปอย่างช้า ๆ นั้น จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตต่ำ แต่ถ้าจะเปลี่ยน

มาก ใช้เงื่อนไขที่ทำให้ความเร็วสูงขึ้น ก็อาจจะทำให้ผิวชิ้นรูปที่หยาบได้ ระยะห่างการสปาร์คก็กว้างขึ้นทำให้ความละเอียดถูกต้องของขนาดต่าง ๆ ไม่ดีพอ

ดังนั้น เราจึงจำเป็นที่จะต้องหาความเร็วที่เหมาะสม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย

ความเร็วในการขึ้นรูปสำหรับเครื่อง EDM นั้น จะบอกแสดงด้วยปริมาณของเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ถูกขจัดออกไปต่อหน่วยเวลา ปริมาณที่ถูกขจัดออกไปนี้ มีทั้งวิธีที่บอกแสดงด้วยปริมาตรและวิธีที่บอกแสดงด้วยน้ำหนัก ในประเทศญี่ปุ่นส่วนมากจะบอกแสดงด้วยน้ำหนัก

$g/min$  (ญี่ปุ่น)  $mm^3/sec$  (ยุโรป)  $in^3/h$  (อเมริกา)

สำหรับเครื่อง EDM ประเภท wire cut นั้น จะบอกแสดงด้วยพื้นที่หน้าตัดการขึ้นรูปต่อหน่วยเวลา และมีการบอกแสดงความหนาของชิ้นงานด้วยในเวลาเดียวกัน

ความเร็วการส่งป้อน  $\times$  ความหนาของชิ้นงาน = ความเร็วในการขึ้นรูป

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

ในการบอกแสดงความเร็วในการขึ้นรูปนั้น จะมีการบอกแสดงเงื่อนไขต่าง ๆ เวลาขึ้นรูปประกอบด้วย

- กัสดูที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า ชิ้นงาน (เช่น ขั้วไฟฟ้า = Cu, ชิ้นงาน = 3XC-1...)
- ประเภทของสารละลาย (น้ำมันหรือน้ำ ถ้าเป็นน้ำจะบอกค่าความต้านทานด้วย)
- เงื่อนไขการขึ้นรูป (เช่น  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ , ...)
- ความหยาบของผิว ( $R_{max}$ )

## 2. ความหยาบของผิว ( $R_{max}$ )

ความหยาบของผิวขั้นสุดท้ายของแม่พิมพ์ จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตมาจากแม่พิมพ์นั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติก ความหยาบของผิวด้านในแม่พิมพ์ จะถ่ายทอดกลายเป็นความหยาบของผิวผลิตภัณฑ์ไปโดยปริยายตามปกติแล้ว จะมีการขัดซึ่งเรียกว่า lapping (ผู้ปฏิบัติงานขัดด้วยมือ) แต่แต่งผิวของแม่พิมพ์ให้ละเอียดขึ้น แต่เนื่องจากว่ากระบวนการขัด lapping นี้ใช้เวลายาวมาก ดังนั้นถ้าสามารถแต่งผิวให้ละเอียดไปในตัวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM ก็จะช่วยลดเวลาการขัด lapping ให้สั้นลงได้

นอกจากนั้นแล้วเครื่อง EDM สมัยนี้ยังได้มีการติดตั้งวงจรช่วยแต่งผิวละเอียด (PIKA) ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ผิวที่มีค่าความหยาบต่ำกว่า  $1 \mu R_{max}$  ซึ่งถ้าเป็นผิวด้านที่เป็นรอยจับของผลิตภัณฑ์ ก็อาจจะใช้ผิวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยตรงไม่váกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลข โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการขัด (lapping) อีกครั้ง

ความหยาบของผิวนั้น บอกแสดงถึงระดับความราบเรียบของพื้นผิวด้วยความแตกต่างของระดับสูงต่ำ ระหว่างส่วนที่เป็นรูเว้ากับส่วนที่เทวในวงระยะความยาวหนึ่งๆ โดยใช้หน่วยเป็นไมโครเมตร วิธีการบอกแสดงนั้นมีหลายวิธี ใหญ่ๆ จะใช้วิธีการบอกแสดง ซึ่งเรียกว่า ค่าสูงสุดของความสูงกันมาก

### 3. ระยะห่างการสปาร์ค (um)

ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชิ้นงาน จำเป็นต้องมีช่องว่างขนาดหนึ่ง ینگถ้าใกล้กันเกินไป จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การสปาร์คแบบอาร์คเช่นเดียวกับการเชื่อม แต่ถ้าห่างกันเกินไป การสปาร์คก็อาจจะไม่เกิดขึ้น

ระยะทางนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการขึ้นรูป สภาพความสกปรก และสภาพการไหลของสารละลาย ถ้าเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับงานขึ้นรูปประเภทต่างๆ จะต้องคำนวณระยะห่างที่ล่วงหน้า เพื่อเตรียมผลิตขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กพอแล้ว

นอกจากนี้แล้วในการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย จะต้องคำนวณระยะห่างภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว เพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้าย

โดยทั่วไปการขึ้นรูปหยาบซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดใหญ่นั้นมีระยะห่างที่กว้าง แต่ก็เป็นกรณีการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ซึ่งกระแสไฟฟ้าการขึ้นรูปมีขนาดเล็กกว่าระยะห่างนี้จะแคบลง

### 4. อัตราการสึกหรอของขั้วไฟฟ้า (%)

การขึ้นรูปด้วยวิธีสปาร์คเป็นวิธีการขึ้นรูปที่แยกออกอยู่อย่างหนึ่งคือ ระยะห่างที่ทำการขึ้นรูปชิ้นงานจะเกิดการสึกหรอ (ถูกกัดหรือกัดออกใบ) นั้น โดยที่ขั้วไฟฟ้าไม่เป็นเช่นนั้นแต่ตามความเป็นจริงแล้ว ขั้วไฟฟ้าจะมีอัตราการสึกหรอที่เปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น เงื่อนไขการขึ้นรูป หรือการเลือกใช้วัสดุของขั้วไฟฟ้ากับวัสดุที่ทำงาน สภาพการไหลของสารละลาย เราจำเป็นต้องคำนวณการสึกหรอที่ล่วงหน้า เพื่อกำหนดปริมาณขั้นสุดท้ายของขั้วไฟฟ้า

สำหรับอัตราการสึกหรอดังกล่าวนี้ ถ้าต่ำกว่า 1% จะเรียกว่า ไม่สึกหรอ 1-10% จะเรียกว่า อัตราสึกหรอต่ำ และถ้าสูงกว่า 10% จะเรียกว่า มีการสึกหรอ การขึ้นรูปด้วยเครื่อง EDM โดยปกติแล้วถ้าเป็นการขึ้นรูปละเอียดจะอยู่ในประเภท อัตราสึกหรอต่ำ หรือมีการสึกหรอหนึ่ง การที่ไม่คำนึงการขึ้นรูปขั้นสุดท้ายด้วยเงื่อนไขที่กล่าวไว้ไม่ว่าการสึกหรอนั้น มีเหตุผลคือต้องการยอมรับผลเสียจากการสึกหรอของขั้วไฟฟ้าเล็กน้อย เพื่อที่

จะยกระดับให้เงื่อนไซ (องค์ประกอบ) ขึ้น ๆ ตีเด่นขึ้นมาหนึ่ง ะทำให้ได้ประสิทธิภาพ การขึ้นรูปที่สูงกว่า

$$\text{อัตราการสึกหรอของซีเมนต์ไฟฟ้า (\%)} = \frac{\text{ปริมาณที่ซีเมนต์ไฟฟ้าสึกหรอไป (g หรือ mm<sup>3</sup>)}}{\text{ปริมาณการขึ้นรูป (g หรือ mm<sup>3</sup>)}} \times 100$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### โครงสร้างของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่อง EDM และเครื่อง Wire Cut EDM แต่ทั้งสองประเภทก็มีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกัน คือ จัดวางขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานในสารละลายและให้แรงดันไฟฟ้าที่ระหวางขั้ว เพื่อให้เกิดการสปาร์คขึ้นโดยมีจังหวะเกิดและหยุดสลับกันไป

#### 5-1 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM ประเภทนี้เป็นเครื่องที่ใช้ในงานขึ้นรูปประเภท die casting โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้กันเป็นหลักจะเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแม่แบบ วิธีขึ้นรูปเองนี้ทรงของรูปที่ถูกขึ้นรูประบบนี้จะสืบทอดลักษณะผลิตภัณฑ์โดยตรงกับขั้วแม่แบบของขั้วไฟฟ้า

ตัวอย่างการขึ้นรูปที่ใช้กันมากคือ การขึ้นรูปแม่พิมพ์สำหรับงานพลาสติก นอกจากนี้แล้วถ้าติดตั้งแกนควบคุมการหมุนที่แกนหลัก (แกนตั้ง) ก็ทำให้สามารถวิ่งงานแบบมุม หรืองานขึ้นรูปประเภทกัดเกลียว โดยการควบคุม 2 แกนในเวลาเดียวกันได้

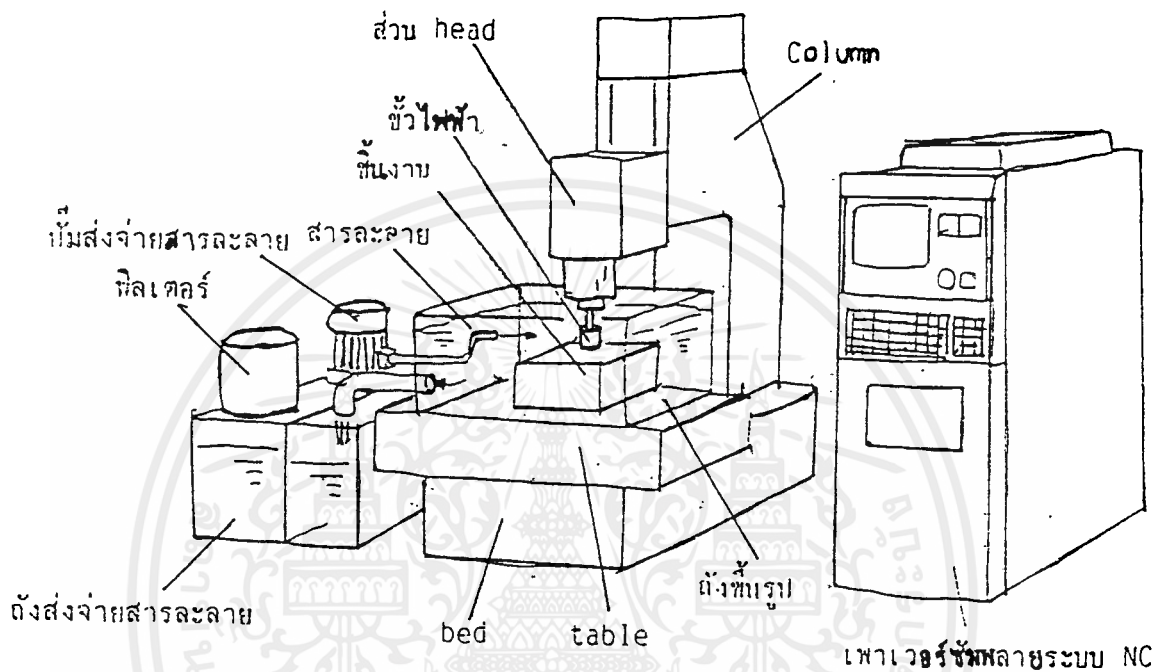
นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ฟังก์ชันต่าง ๆ ของระบบ NC ให้ทำงานอย่างเต็มความสามารถในการขึ้นรูปตามเส้นขอบโดยการควบคุมแกน X-Y-Z พร้อมกันนั้นทำให้สามารถที่จะขึ้นรูปที่รูปร่างซับซ้อนได้ด้วย

#### 5-1-1 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง EDM

เครื่อง EDM มีโครงสร้างส่วนประกอบที่คล้ายกับ mill machine มากคือ บนฐานที่เรียกกันว่า bed จะมีองค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า แท่น (table) และเสา ค้ำ (column) ประกอบติดอยู่ เสาค้ำนี้จะทำหน้าที่ประคองส่วน head ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าประกอบติดอยู่ ถ้าฐานดังกล่าวนี้ไม่มั่นคงหนาแน่นเพียงพอ ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้จะขาดความละเอียดไปด้วย และถ้า head ไม่มั่นคงพอ เครื่องก็ไม่สามารถทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้

#### -องค์ประกอบเคลื่อนที่

การที่จะทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรง 3 มิติได้นั้น อย่างน้อยก็จำเป็นที่จะต้องมีส่วนประกอบที่สามารถเคลื่อนที่ 3 มิติได้ สำหรับเครื่อง EDM นั้น โดยทั่วไปจะมีแท่นซึ่งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ X-Y และมี head เคลื่อนที่บนเสาค้ำในแนวแกน Z ซึ่งตั้งฉากกับผิวระนาบ X-Y



รูป 5-1 เครื่อง NC-EDM

วิธีการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนมีหลายอย่าง แต่ในปัจจุบันจะควบคุมด้วยอุปกรณ์ระบบ NC ดังนั้นส่วนมากจึงใช้แรงขับเคลื่อนจากไฟฟ้า (มอเตอร์) หนึ่ง สมรรถนะขององค์ประกอบเคลื่อนที่ซึ่งรวมถึงตัวนำ (guide) ด้วยนั้น จะเป็นปัจจัยในการกำหนดระดับความละเอียดของเครื่องจักร

#### - ถังขึ้นรูป

ลักษณะจำเพาะอย่างหนึ่งของเครื่อง EDM คือใช้สารละลาย (ขึ้นรูปในของเหลว) ที่จะให้ระหว่างขั้วมีความต้านทานของฉนวนสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมียังถังขึ้นรูปเพิ่มที่จะเก็บสารละลายนี้ไว้ ถังขึ้นรูปดังกล่าวนี้จะมีหน้าที่ปรับระดับผิวของสารละลาย เพื่อที่จะปรับตั้งระดับความสูงของผิวหน้าสารละลายให้เหมาะสมกับคามสูงของชิ้นงาน การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่งส่งจ่ายสารละลาย

เป็นถึงสารรองเพื่อคอยส่งจ่ายสารละลายไปยังถังขึ้นรูป ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปั๊มส่งจ่าย, ฟิลเตอร์สำหรับกรองเศษผงโลหะ ในกรณีที่จำเป็นอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบบหล่อเย็นสารละลาย เพื่อป้องกันสิ่งให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงมากเกินไป

- อุปกรณ์เพิ่มเติมอื่น ๆ

เช่น : 1.70 (อุปกรณ์ระบบเปลี่ยนหัวในท่าโคดซ์อัตโนมัติ), อุปกรณ์ประเภท C, ระบบเครื่องมือช่วยเหลือนการติดตั้งหัวไฟฟ้า

5-2 ลักษณะจำเพาะของเครื่อง EDM ประเภท Wire Cut

เครื่อง EDM ประเภทที่มีเครื่องใช้ลวดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก ๆ มีหัวขุดไฟฟ้าและชุดอุปกรณ์ระบบ NC สำหรับควบคุมจับตัวชิ้นงานให้เคลื่อนที่ ในลักษณะเช่นเดียวกับขุดรูขึ้นรูป เพื่อตัดเอาส่วนที่เป็นรูปนั้นออกไป

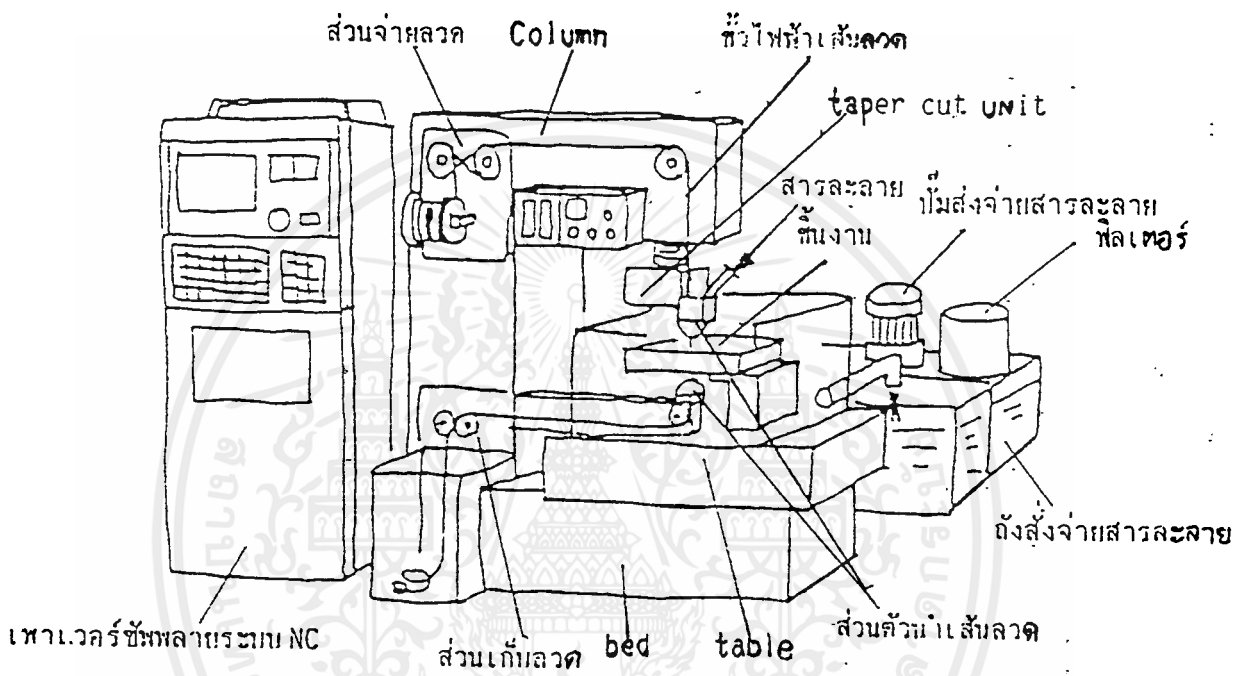
เครื่อง EDM ประเภท wire cut นี้ จำพวกขึ้นมากจากการประยุกต์เครื่อง EDM ประเภท diesinking เครื่องประเภทนี้ขึ้นรูป ด้วยการวาดรูปโดยที่แกน X-Y เครื่องที่ในเวลาเดียวกันทั้ง 2 แกน จึงต้องมีอุปกรณ์ระบบ NC ไว้สำหรับควบคุม ดังนั้นเราจึงสามารถกล่าวได้ว่าถ้าไม่มีการพัฒนาอุปกรณ์ระบบ NC ขึ้นมา เครื่อง EDM ประเภท wire cut นี้ ก็ไม่สามารถกำเนิดขึ้นมาได้

เครื่อง EDM ประเภท wire cut ถูกใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การขึ้นรูปที่มีรูปทรงซับซ้อน เช่น แม่พิมพ์เพชร, การขึ้นรูปประเภทรูปทรงเฟือง นอกจากนี้แล้วการใช้ อุปกรณ์ระบบ NC ควบคุมมุมเอียงของลวดก็สามารถใช้ในงานขึ้นรูปประเภท taper หรือ งานขึ้นรูปที่มีรูปทรงบนล่างต่างกันได้อีกด้วย

ตัวลวดเองจะมีการสึกหรออันเนื่องมาจากการสปาร์ค ดังนั้นลวดที่ใช้งานไป

ครั้งหนึ่งแล้วจะถูกทิ้งไปเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 5-2 เครื่อง Wire Cut EDM

5-2-1 โครงสร้างส่วนประกอบของเครื่อง

โครงสร้างส่วนประกอบของแกน x-y-z ในเครื่อง EDM ประเภท wire cut นั้น เกือบจะเหมือนกันกับเครื่อง EDM ประเภท diesinking แต่เนื่องจากว่าใช้ลวดเป็นขั้วไฟฟ้า จึงต้องมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุมประกอบติดอยู่ที่เสาด้วย

- ส่วนที่ส่งป้อนลวดออกมา ทำหน้าที่ส่งป้อนลวดออกมาและควบคุมแรงดึงของลวด
- เอกสารนี้เขียนที่ม้วนเก็บลวดสำหรับการใช้ทำหน้าที่เก็บรวบรวมลวดที่ใช้งานเรียบร้อยแล้วนั้นค่าและราคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ควบคุมความเร็วของลวด
- ส่วนที่เป็นตัวนำลวด ทำหน้าที่ขั้วระดมของลวด, เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับพัลส์การสปาร์ค, การไหลของสารละลาย
  - taper cut unit อุปกรณ์แกนเสริมสำหรับการขึ้นรูปประเภท taper
  - AWT (Automatic Wire Threader) อุปกรณ์เชื่อมตอลวดโดยอัตโนมัติ

เครื่อง EDM ประเภท wire cut ก็มีการใช้สารละลายเช่นกัน และจำเป็นที่จะต้องมียุบกรณ์ที่เหมะสมกับสารละลาย (เช่น น้ำบริสุทธิ์, น้ำมัน ฯลฯ) ที่ใช้ด้วย

ในกรณีที่ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลายในเครื่อง EDM นั้น โดยทั่วไปแล้วถึงขึ้นรูปจะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวปกคลุมเท่านั้น กล่าวคือ มีหน้าที่เพียงป้องกันสารละลายที่กระพือจากหัวกัด (เช่น EPCO, A series)

ถ้ากรณีที่ใช้น้ำมันเป็นสารละลายนั้นจะใช้วิธีขึ้นรูปแบบแช่ในของเหลว กล่าวคือ ทำให้เกิดการสปาร์คในสารละลาย ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดออคซิไดซ์ ถึงขึ้นรูปจึงมีโครงสร้างเหมือนกับที่ใช้น้ำในเครื่อง EDM ประเภท diesinking (เช่น AP series)

และในปัจจุบันนี้ การขึ้นรูปโดยใช้น้ำมันเป็นของเหลวได้ถูกพัฒนาให้มีความละเอียดสูงยิ่งและสามารถขึ้นรูปที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ ดังนั้นจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้วิธีการขึ้นรูปแบบแช่ จึงทำให้เครื่อง EDM ประเภท wire cut ก็มีถึงขึ้นรูปอยู่ด้วยมีจำนวนเพิ่มขึ้น

#### หมายเหตุ

น้ำมันที่ใช้ในเครื่อง EDM นั้น จะระเหยยาก, ความร้อนจำเพาะมีค่าสูงและ ติดไฟยาก ถึงแม้ว่าจะเกิดการสปาร์คในน้ำมันก็ตาม ความร้อนจะถูกดูดซึมไปในน้ำมัน ทำให้อุณหภูมิไม่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิจุดติดไฟ แต่ทว่าบริเวณใกล้เคียงผิวหน้าของน้ำมันนั้น จะมีน้ำมันที่กำลังระเหยปะปนอยู่ด้วย อุณหภูมิต่อหน่วยปริมาตรจึงเพิ่มขึ้นได้ง่าย ซึ่งอาจมีอันตรายเกิดการติดไฟได้ ดังนั้นเพื่อความเตรียมพร้อมสำหรับป้องกันเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ เครื่อง EDM ที่ใช้น้ำมันจึงมีอุปกรณ์ดับไฟติดตั้งอยู่ด้วย

MAS (มาตรฐานของสภาอุตสาหกรรมเครื่องมือกลแห่งประเทศไทย) ได้กำหนดไว้ว่าสารละลายที่ใช้ในเครื่อง EDM นั้น ต้องมีจุดติดไฟสูงกว่า 70 องศาเซลเซียสขึ้นไป

- ส่งจ่ายสารละลาย

เป็นถึงสารรองซึ่งมีหน้าที่ในการส่งจ่ายสารละลาย ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐาน เช่น บีมส่งจ่าย, พิลเตอร์สำหรับกรอง เช่นเดียวกับเครื่อง EDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันความต้องการที่จะใช้เครื่อง EDM ประเภท wire cut นี้ในงาน ขึ้นรูปที่มีความละเอียดสูงมีมากขึ้น ดังนั้นจึงเริ่มมีเครื่องจำนวนมากที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบบหล่อเย็นสารละลายเพื่อป้องกันมิให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากเกินไป

### 5-2-2 การควบคุมเส้นลวด wire cut

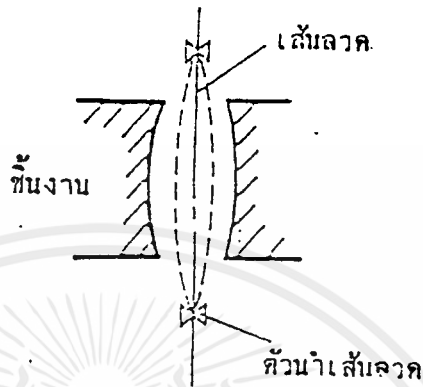
การควบคุมเส้นลวดสำหรับเครื่อง EDM ประเภท wire cut เป็นหัวข้อปัญหาสำคัญที่จะกำหนดคุณภาพการขึ้นรูป

-แรงดึงของเส้นลวด ดูรูป 5-3 ประกอบ

เส้นลวดที่ใช้ในการขึ้นรูปดังกล่าวจะต้องมีความตึงที่เหมาะสม ถ้าเส้นลวดซึ่งเป็นเครื่องมือของเครื่อง EDM ประเภท wire cut หย่อน จะทำให้ความละเอียดในการขึ้นรูปต่ำลง และควบคุมระยะห่างการสปาร์คได้ยาก ในระหว่างการขึ้นรูปนั้นแรงดันการสปาร์คที่เกิดขึ้นจะถ่ายทอต่อเส้นลวดซึ่งถูกขึงยึดไว้กับตัวนำเส้นลวดบนล่าง ทำให้เส้นลวดเกิดการสั่นไปด้วย ถ้าแรงดึงในเส้นลวดต่ำเกินไป จะทำให้ช่วงระยะการสั่นกว้างมากขึ้น จนมีอิทธิพลต่อความละเอียดของงาน ซึ่งผลเสียที่ตามมาคือ จะเกิดปรากฏการณ์ที่ว่าผิวชิ้นงานจะเว้าเข้าเป็นลักษณะแอ่งที่มีก้นอยู่ตรงกลางชิ้นงาน ดังในรูป 5-3

ในทางกลับกัน ถ้าใช้แรงดึงกับเส้นลวดมากจนตึงเกินไป โอกาสที่จะเกิดปรากฏการณ์นี้จะน้อยลง แต่เวลาที่สภาพการสปาร์คเกิดการเปลี่ยนแปลงจนมีกระแสไฟฟ้าไหลมากเกินไป อาจทำให้เส้นลวดขาดได้

นอกจากนั้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงของแรงดึงในเส้นลวด ก็มีผลต่อความละเอียดในการขึ้นรูปด้วย ดังนั้นเครื่อง EDM ประเภท wire cut รุ่นที่มีระดับเกรดสูง บางรุ่นจะมีกลไกระบบ tension servo ประกอบติดไว้เพื่อควบคุมให้แรงดึงคงที่อยู่ตลอดเวลา



รูป 5-3 การสั่นของเส้นลวดระหว่างตัวนำ

- ความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวด

เส้นลวดที่ใช้ในเครื่อง EDM ดังกล่าว จะมีขนาดเล็ก (โดยปกติ 0.2) ซึ่งถ้าเกิดการสปาร์คขึ้นหลาย ๆ ครั้ง ที่ตำแหน่งเดียวกัน ก็จะทำให้สึกหรองจนขาดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการส่งป้อนเส้นลวดความเร็วคงที่ระดับหนึ่ง เพื่อสำหรับส่งจ่ายเส้นลวดใหม่มาใช้งานอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่ความเร็วในการส่งป้อนเส้นลวดนี้ช้าเกินไป ถ้าเป็นการขึ้นรูปหยาบ ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าขนาดใหญ่ เส้นลวดก็อาจจะขาดได้ แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปขั้นสุดท้าย ก็จะมีผลเสียต่อความละเอียดของงาน ในทางกลับกันถ้าเร็วจนเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง (เส้นลวดใช้แล้วทิ้ง) ซึ่งถ้าปริมาณขนาดของลวดที่เตรียมไว้มีไม่มากพอ ก็อาจจะไม่สามารถทำงานขึ้นรูปที่ใช้เวลานานได้

- ตัวนำ (guide)

เส้นลวดไม่สามารถทำงานตามลำพังได้ด้วยตัวเอง จึงต้องมีตัวนำคอยยึดประคองที่ด้านบนและล่างของชิ้นงาน ส่วนที่เป็นตัวนำนี้เป็นส่วนสำคัญมากในเครื่อง EDM ประเภท wire cut ที่มีอิทธิพลต่อความละเอียดในการขึ้นรูป เส้นลวดทองเหลืองนี้ถึงจะอ่อนก็จริงแต่จะวิ่งอยู่ตลอดเวลาที่ใช้งาน ดังนั้นตัวนำซึ่งทำหน้าที่รองรับเส้นลวดนี้ จึงใช้วัสดุประเภทหินแร่ที่มีความแข็งสูง เช่น ruby, sapphire ในบางกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

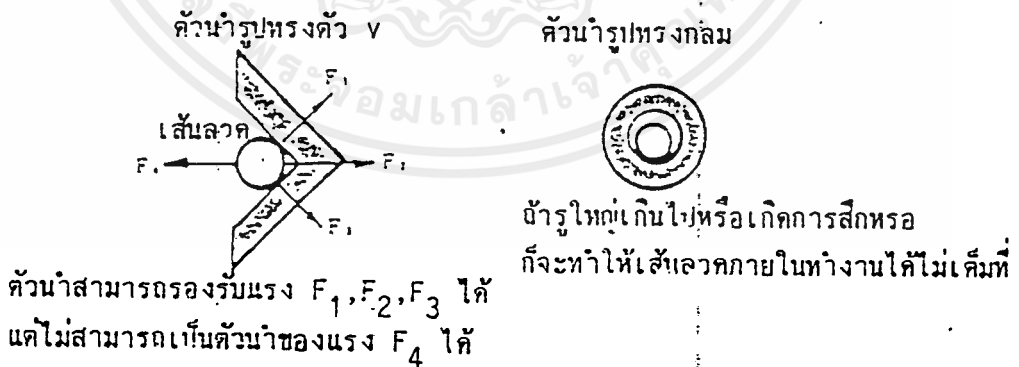
ก็มี การใช้ diamond ซึ่งมีราคาสูงมาก

**ตัวนำหน้าตัดตัว v**

ตัวนำรูปทรงตัว v จะมีต้นทุนผลิตที่ไม่สูง แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปในทิศทางที่ปิดของตัว v แล้ว ตัวนำจะต้องรับแรงดันการสปาร์คจากผิวการขึ้นรูป ทำให้แรงดันสัมผัสตัวนำของเส้นลวดต่ำ ซึ่งอาจจะมีผลทำให้สูญเสียความละเอียดในการขึ้นรูปใบ

**ตัวนำหน้าตัดทรงกลม**

สำหรับตัวนำที่รูปทรงหน้าตัดกลม (die) นั้น ลวดที่มีสัมผัสกับของตัวนำและเส้นลวดจะเป็นส่วนโค้งของวงกลมทั้งคู่ จึงทำให้ความดันการสัมผัสต่ำและสีแรงดันทั่วทั้งทุกทิศทาง กล่าวคือ ขึ้นรูปได้สม่ำเสมอโดยไม่เลือกทิศทาง ผลการผลิตตัวนำรูปทรงนี้จะยากและจะเป็นที่ที่จะต้องคอยระวังเกี่ยวกับช่องระยะเมื่อ (clearance) ระหว่างขนาดเส้นลวดกับขนาดรูตัวนำในการบำรุงรักษาประจำวันอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ปรากฏการณ์พิเศษที่พบเห็นในการสปาร์ค

ในบทนี้จะกล่าวถึงปรากฏการณ์พิเศษและปัญหาต่าง ๆ ที่พบเห็นในการสปาร์ค

#### 6-1 สารละลายและช่วงห่างระหว่างขั้ว

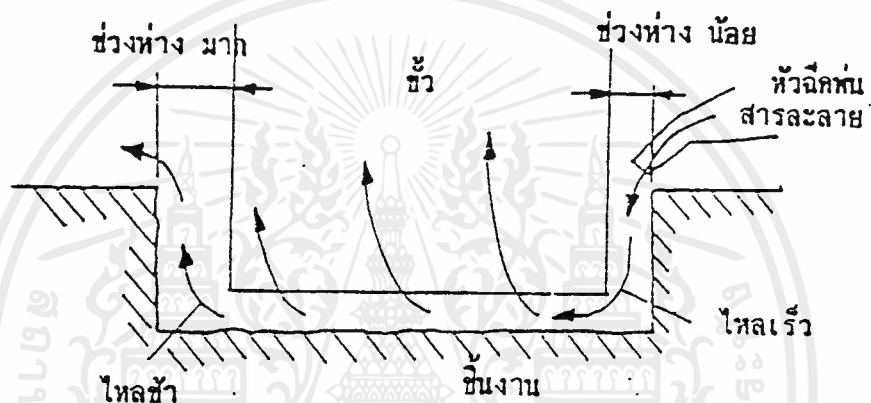
เศษที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการสปาร์ค ถ้าติดค้างอยู่ช่วงห่างระหว่างขั้วแล้วเศษนั้น จะเป็นตัวใบัดขวางไม่ทำให้สามารถสปาร์คได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติจริงเราจะพบสารละลายที่ใช้เข้าไปในระหว่างขั้ว เพื่อล่อลวงให้เศษเหล็กนั้นไหลออกมาทำให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในรูป 6-1 จะเห็นว่าความเร็วของสารละลายที่พุ่งเข้าไป ถ้ามีความแตกต่างกับความเร็วของการไหลแล้ว ในส่วนที่สารละลายไหลตัวช้า ช่วงห่างระหว่างขั้วจะกว้างขึ้น การที่สารละลายไหลตัวช้านั้นมักเกิดมาจากปริมาณเศษที่ลอยค้างอยู่ในช่วงระหว่างขั้วมีอยู่มาก ทำให้ค่าความต้านทานความเป็นฉนวนของสารละลายนั้น ๆ ลดต่ำลงและช่วงห่างระหว่างขั้วก็จะกว้างขึ้นเท่ากับค่าความต้านทานฉนวนที่ต่ำลงไป

ลักษณะการเกิดนี้จะเกิดขึ้นเช่นกันกับการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Wire Cut EDM ซึ่งในการขึ้นรูปลวดของ wire cut จะขึ้นรูปคล้ายกับการเจาะร่อง และสารละลายที่พุ่งออกมาจาก guide จะไหลเข้าเข้าไปในร่องอย่างสมบูรณ์ เพื่อนำมาให้เศษที่ได้จากการตัดหลุดออกไป

ในการขึ้นรูป ถ้าแรงดัน (ความเร็ว) ของการฉีดพ่นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ก็จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นที่ช่วงห่างระหว่างขั้วด้วย นอกจากนี้การพ่นสารละลายในทิศทางความหนาของชิ้นงาน ควรจะกระทำให้สมดุลย์ทั้งส่วนบนและล่าง แต่ในความเป็นจริงแล้ว เราไม่สามารถจะทำให้สมดุลย์ได้เนื่องจากมีส่วนเกี่ยวข้องกับแรงโน้มถ่วง ดังนั้นเราจะพ่นสารละลายทางส่วนบนให้ค่อนกว่าสารละลายที่พ่นจากทางส่วนล่าง หรืออาจจะขึ้นรูปโดยการปิดสารละลายส่วนล่างและพ่นแต่สารละลายส่วนบนเพียงอย่างเดียว

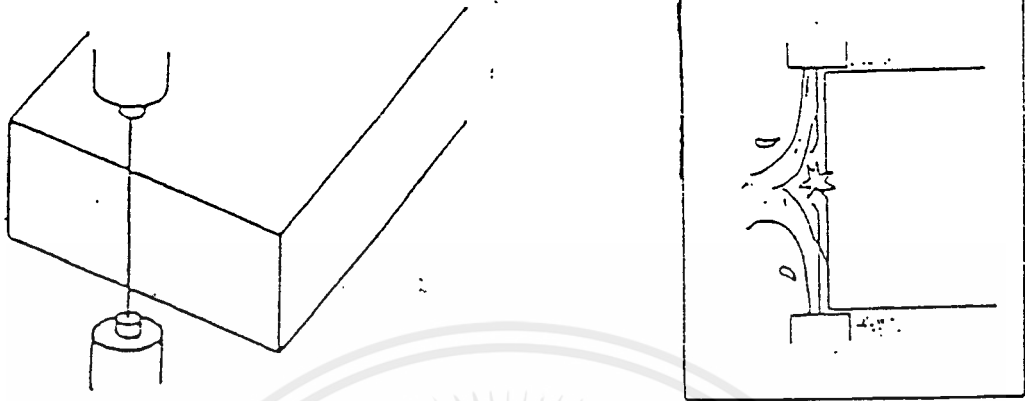
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6-1 ความแตกต่างของการไหลของสารละลายและช่องว่างระหว่างขั้ว

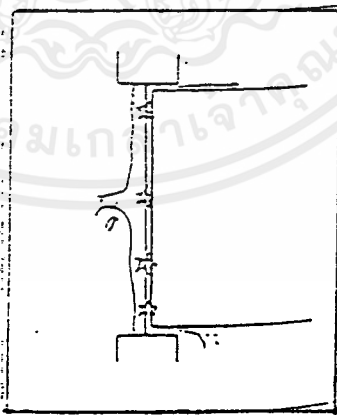
## 6-2 การกระจายหลุดของสารละลาย

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM เมื่อเริ่มตัดจากด้านปลายของชิ้นงานเข้าไป ถ้าเราเปิดแรงดันของสารละลายแรงเกินไป จะทำให้สารละลายนั้นกระจายหลุดจากด้านปลายที่ขึ้นรูปได้ เมื่อเกิดการกระจายหลุดขึ้นเท่ากับเป็นการสปาร์คในอากาศ ทำให้สภาพการสปาร์คไม่สมบูรณ์เป็นผลให้ลวดเกิดการขาดขึ้นได้ ดังนั้นเราจะป้องกัน การกระจายหลุดของสารละลาย โดยการพ่นสารละลายให้ค้อยลงในช่วงแรกหลังจาก ขึ้นรูปได้สักระยะหนึ่ง จึงเพิ่มแรงดันของการพ่นสารละลายขึ้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6-2 ขึ้นรูปจากด้านปลายขึ้น

พ่นแรงทำให้สารละลายกระจาย  
หลุดเกิดการสปาร์คในอากาศขึ้น



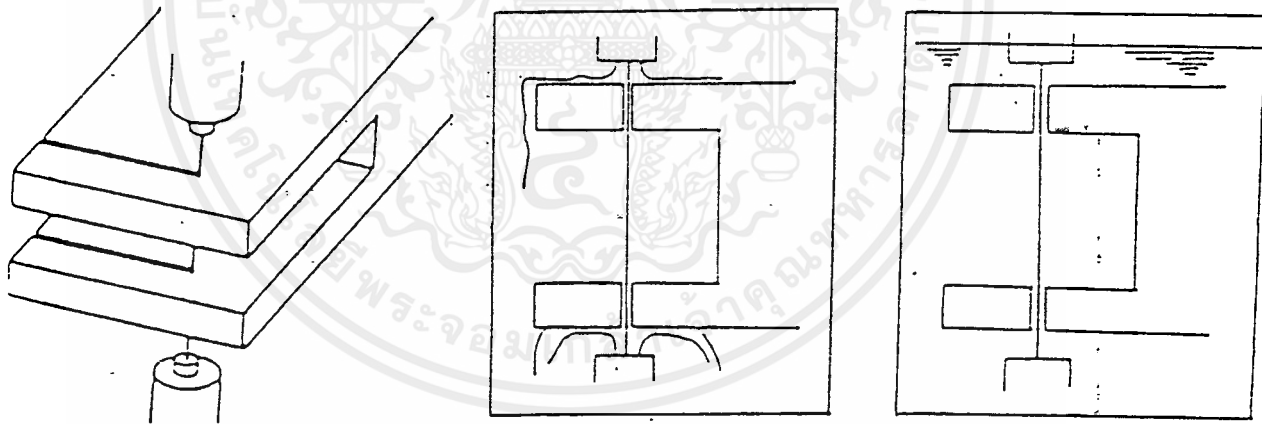
ลดแรงพ่นสารละลายลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6-3 การขึ้นรูปแบบแซ่

การขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ในบางครั้งอาจเกิดปัญหาขึ้นในเรื่องของสภาพการฟั่นสารละลายเป็นไปไม่ได้ไม่ดีพอ หรือแรงดันของการฉีดพ่นไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาวิธีป้องกันขึ้น และวิธีหนึ่งก็คือ การขึ้นรูปแบบแซ่ เป็นวิธีการขึ้นรูป โดยการแซ่ชิ้นงานในสารละลาย เพื่อช่วยป้องกันการกระจายหลุดของสารละลาย หรือแรงดันพ่นที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้วิธีการขึ้นรูปแบบแซ่นี้ ยังเป็นการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานเกิดขึ้นได้น้อย สามารถขึ้นรูปที่มีความละเอียดแม่นยำสูงได้ อนึ่งเมื่อความต้านทานจำเพาะของสารละลายที่เป็นน้ำลดต่ำลง อาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แยกตัวของไอออน Electrolyte ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน



รูป 6-3 การขึ้นรูปชิ้นงาน สารละลายที่ฟ่นออกจะเข้าไป การขึ้นรูปแบบแซ่ในสารที่ตรงกลางกลวง ในส่วนกลวงได้ยาก ทำให้ละลายจะช่วยแก้ปัญหเสถียรภาพในการขึ้นรูปไม่ดี สามารถขึ้นรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

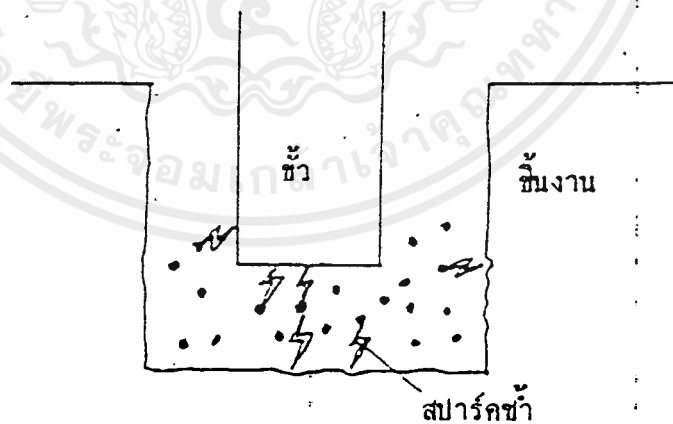
### 6-4 การสปาร์คซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
 ดังได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนว่า ปรากฏการณ์สปาร์คจะถูกควบคุมด้วยระบบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NC แต่ไม่ว่าจะเป็นเครื่อง EDM หรือเครื่อง wire cut EDM ก็ตาม ลักษณะการสปาร์คในระหว่างขั้วไม่ดีพอ เศษที่ได้จากการขึ้นรูปจะติดค้างอยู่ในช่องระหว่างขั้ว ไม่สามารถหลุดออกมาได้ทำให้เกิดการสปาร์คขึ้นระหว่างเศษกับขั้ว หรือเศษกับชิ้นงาน โดยไม่เกี่ยวข้องกับจังหวะ (timing) ของคลื่น pulse ที่ส่งจากวงจรสปาร์ค เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสปาร์คซ้ำ

ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างขั้วกับชิ้นงาน (ระยะสปาร์ค) นั้น จะกำหนดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าไรโซลด์ พื้นที่สปาร์คและสภาพการพันสารละลาย ถ้ามีเศษที่ได้จากการขึ้นรูปลอยติดค้างอยู่ระหว่างขั้ว ก็จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานฉนวนของสารละลายในส่วนนั้นต่ำลง การเกิดสปาร์คเป็นไปได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดสปาร์คที่ไม่สามารถควบคุมได้ขึ้น

ปรากฏการณ์สปาร์คที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะไม่ใช้สภาพการสปาร์คที่เหมาะสม ดังนั้นผิวชิ้นงานที่ออกมาก็จะหยาบ ร่องความถี่ในช่วงเวลา  $T$  (ช่วงเวลา สปาร์คแรงดันไฟฟ้าไรโซลด์) จะสั้นลง ในบางครั้งอาจทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 6-4 การสปาร์คซ้ำ

## 6-5 ชั้นผิวที่เกิดจากการขึ้นรูป

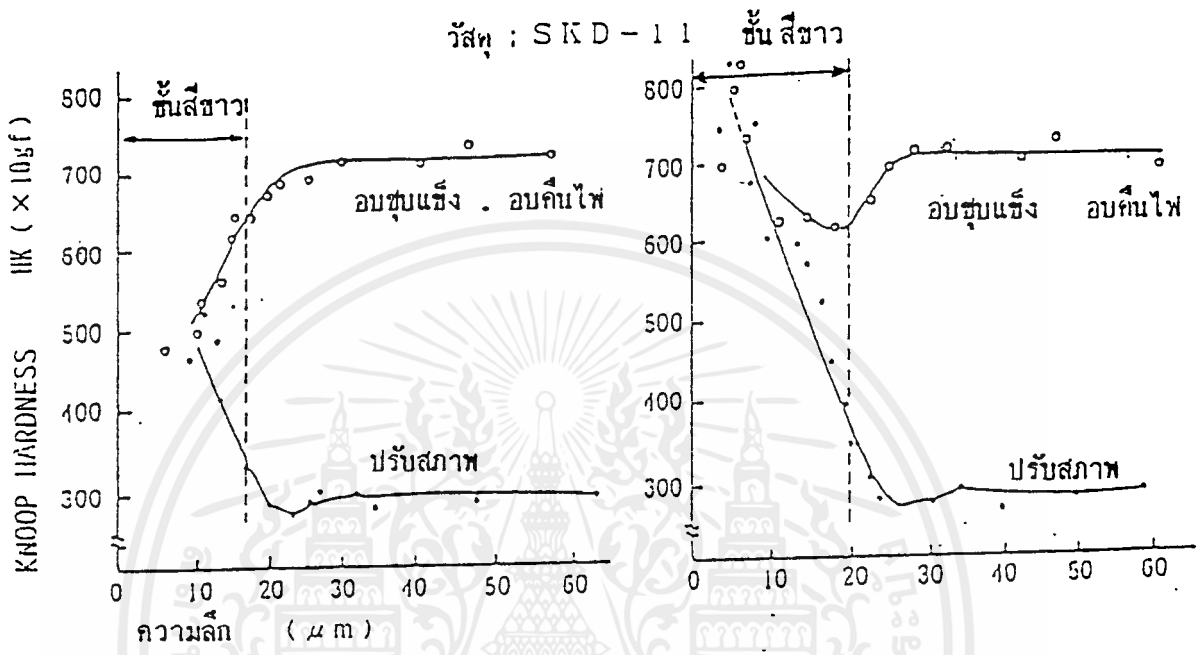
การขึ้นรูปโดยการสปาร์ค เป็นวิธีการขึ้นรูปโดยอาศัยพลังงานจากการสปาร์คไป ทำให้ชิ้นงานบางส่วนมีอุณหภูมิสูงขึ้น และวัสดุเกิดการละลายตัว ดังนั้นผิวของชิ้นงานบางส่วนที่ขึ้นรูป จะมีชั้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง (affected zone) ขึ้น

เหล็กกล้า เมื่อหลอมตัวและถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าเราส่องดูหน้าตัดของด้านที่ขึ้นรูปด้วยกล้องขยายจะเห็นเป็นสีขาว ซึ่งเราเรียกว่า ชั้นสีขาว (white zone) (ดูรูป 6-5 ประกอบ) ชั้นสีขาวนี้เกิดจากโครงสร้าง martensite ที่แตกตัวออกและโครงสร้าง austenite ที่เหลือค้าง ส่วนใต้ของชั้นสีขาวแม้ว่าจะไม่ถูกหลอมตัว แต่ก็ได้รับความร้อน ทำให้โครงสร้าง martensite แตกตัวออกและแข็งตัวกลายเป็นชั้น heat-affected zone ขึ้น ซึ่งเราเรียกรวมชั้นสีขาวและชั้น heat-affected zone นี้ว่า ชั้นเปลี่ยนแปลง (affected zone)

รูป 6-5 แสดงกราฟเปรียบเทียบความแข็งของชั้นผิวตามความลึกจากผิวหน้า ทั้งการขึ้นรูปในสารละลายน้ำและน้ำมัน เราจะเห็นได้ว่าในช่วงของชั้นสีขาว ความแข็งของบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้าของวิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำจะต่ำลง แต่ความแข็งแรงของวิธีการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมันจะแข็งขึ้น

ความลึกของชั้นผิวที่เปลี่ยนแปลงนี้ แตกต่างกันตามวิธีการให้พลังงานในการขึ้นรูป โดยทั่วไปจะลึกประมาณความหยาบของผิวหรือประมาณ 2 เท่าตัว วงการวิเคราะห์รอยสปาร์คที่เกิดจากการสปาร์คหนึ่งครั้งแล้ว ความลึกของชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจะเกี่ยวข้องกับเวลาที่ความร้อนจะแผ่ซ่อนอยู่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการนำความร้อนของวัสดุด้วย

การทำชั้นผิวเปลี่ยนแปลงให้น้อยลงนั้น ทำได้โดยการตั้งกระแสไฟฟ้าสูงสุด ให้สูงและช่วงกว้างของคลื่น pulse ให้สั้น เพื่อทำช่วงเวลาที่ความร้อนจะคงอยู่ให้สั้น และในการขึ้นรูปละเอียด พยายามให้โลหะที่หลอมตัวลอยหลุดออกไปไม่เหลือค้างติดอยู่ที่ผิว



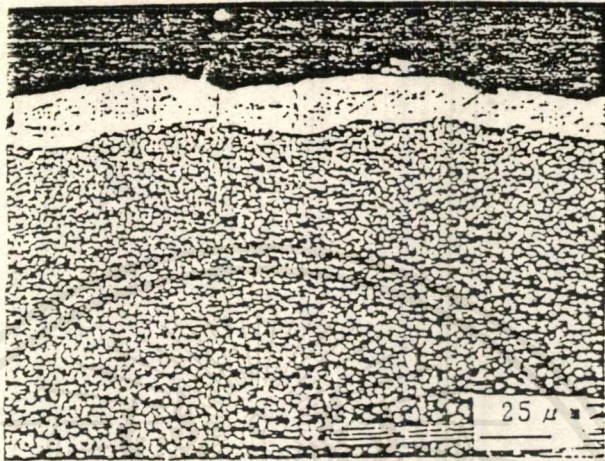
ชั้นรูปแช่ในสารละลายน้ำ      ชั้นรูปแช่ในสารละลายน้ำมัน  
 รูป 6-5 ความแข็งของชั้นผิวเปลี่ยนแปลง

6-6-1 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน

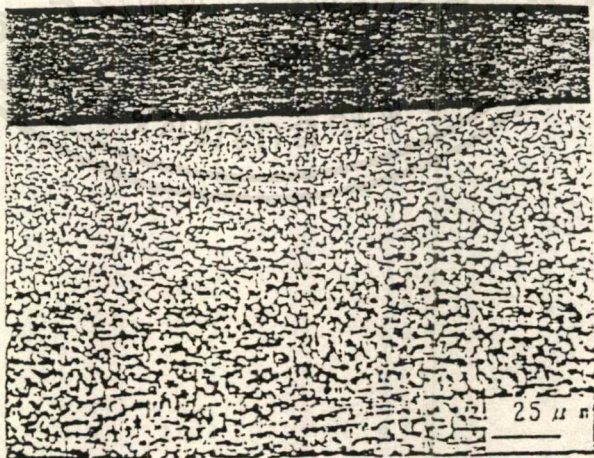
ผิวของเหล็กกล้า ที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คในสารละลายน้ำมันมีแนวโน้มที่จะแข็งกว่าวัสดุเดิม นั่นเป็นเพราะความร้อนจากการสปาร์คจะทำให้คาร์บอนที่แตกตัวออกจากน้ำมัน ถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Carburization) แม้ว่าชั้นของผิวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วนี้จะแข็ง แต่จะเปราะได้ง่าย ซึ่งเราจะเห็นว่ามียรอยแตกร้าวเล็ก ๆ (microcrack) ในชั้นสีขาวของเหล็กกล้าผสมที่มีส่วนผสมของโครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสองอย่าง (เหล็กแม่พิมพ์ เหล็กไฮดรีด เป็นต้น)

รูป 6-6 เป็นชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปแบบหยาบในสารละลายน้ำมัน จะเห็นชั้นสีขาว และรอยแตกร้าวเล็ก ๆ ได้อย่างชัดเจน รูป 6-7 เป็นการขึ้นรูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ฝิวหน้าที่มีคุณภาพดีมีความแข็งแรงเหมาะสม  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6-6 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปหยาบในสารละลายน้ำมัน  
 ความละเอียดของผิว 33 um  
 วัสดุ : Stavax ESR (เหล็กกล้าโครเมียม C = 0.33%, Cr = 13.6%)



รูป 6-7 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงจากการขึ้นรูปละเอียดในสารละลายน้ำมัน

ความละเอียดของผิว 1.5 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 วัสดุ : Stavax ESR (เหล็กกล้าโครเมียม C = 0.33%, Cr = 13.6%)  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6-6-2 ชั้นผิวเปลี่ยนแปลงของการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ

ผิวของเหล็กกล้าที่ถูกขึ้นรูปด้วยการสปาร์คในสารละลายน้ำ จะตรงข้ามกับสปาร์คในสารละลายน้ำมันคือ ความแข็งของผิวมีแนวโน้มที่จะอ่อนกว่าวัสดุเดิม นอกจากนี้จะเป็นสาเหตุจากสารละลายน้ำที่ไม่มีการเกิด Carburization แล้ว ยังเกิดเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ชั้นเล็กน้อย ที่ผิวอันเนื่องมาจากค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำซึ่งมีค่าต่ำ ดังนั้นบางส่วนของทองแดงที่ใช้ทำขั้วจะละลายหลุดออกรวมออกกรรมกับเหล็กกล้า เหลือติดบนผิวเป็นผลให้ความแข็งของผิวลดลงได้

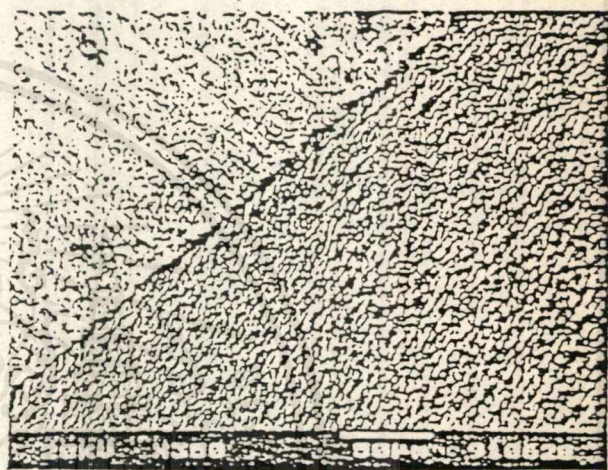
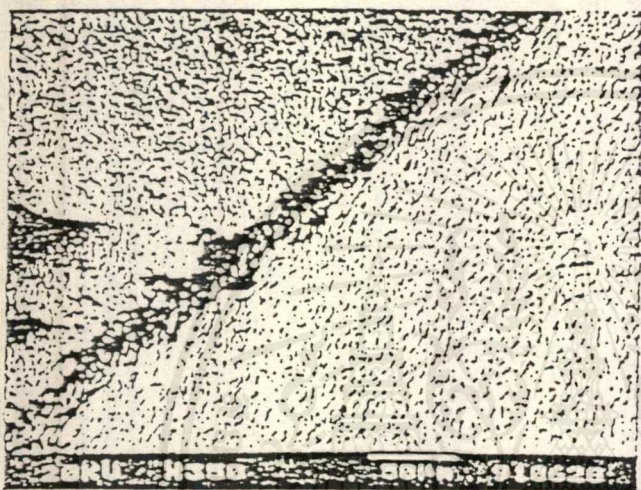
การขึ้นรูปในสารละลายน้ำ นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ซึ่งเราจะพยายามไม่ให้เกิดการแยกตัวเป็นอ็อกไซด์ โดยหาวิธีทำค่าความต้านทานจำเพาะ (ความต้านทาน) ของสารละลายน้ำให้สูงขึ้น แต่ค่าความต้านทานจำเพาะของน้ำ เมื่อถูกความสลับปรกของเศษโลหะจะทำให้ค่าความต้านทานต่ำลงได้ง่าย การที่จะทำค่าความต้านทานให้สูงกว่าปกติ (50,000 - 100,000 Ohm) จะทำให้ควบคุมดูแลค่าความต้านทานจำเพาะยุ่งยากขึ้น

นอกจากนี้ การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์แยกตัวของอ็อกไซด์ ยังมีการพัฒนาวงจรสปาร์คกระแสสลับ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้กลับ (Reverse Voltage) เข้าไป เลี้ยววงจรในช่วงเวลาหยุดสปาร์ค ( T<sub>off</sub> )

### 6-6-3 ข้อดีของการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ในสารละลายน้ำมัน

รูป 6-8, 6-9 แสดงให้เห็นถึงภาพขยาย (350 เท่า) ของด้านบนและมุมเหลี่ยมของด้านขึ้นรูป ซึ่งผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM

รูป 6-8 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำ จะสังเกตเห็นการเกิดการแยกตัวของอ็อกไซด์ที่ด้านบนเห็นเป็นผิวหยาบ และบางส่วนของมุมเหลี่ยมไม่เป็นระเบียบ ส่วนรูป 6-9 เป็นการขึ้นรูปในสารละลายน้ำมัน จะเห็นว่าด้านบนของผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการแยกตัวของอ็อกไซด์ และเหลี่ยมของมุมก็เป็นระเบียบดี



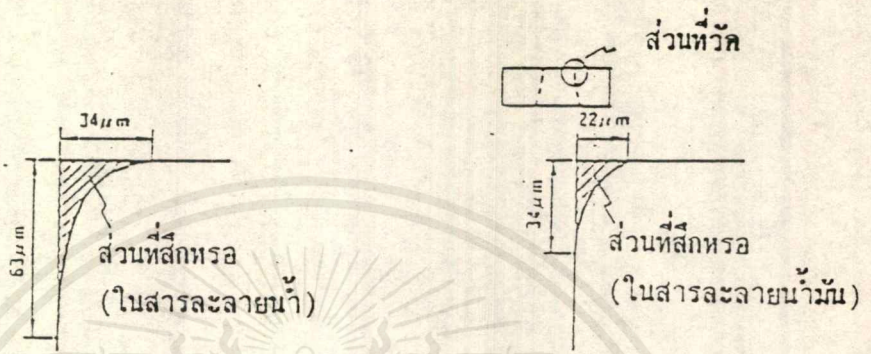
รูป 6-8 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูป  
ในสารละลายน้ำ

รูป 6-9 เหลี่ยมที่เกิดจากการขึ้นรูป  
ในสารละลายน้ำมัน

รูป 6-10 เป็นการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมมีดของ die แม่พิมพ์  
press ตัดเจาะ ซึ่งขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ในสารละลายน้ำและน้ำมัน และ  
ผ่านการใช้งานในสภาพเงื่อนไขเดียวกัน

ในการขึ้นรูปด้วยเครื่อง wire cut EDM ถ้าเราขึ้นรูปละเอียดส่วนปลายคมมีดของ  
punch และ die ของแม่พิมพ์press ในสารละลายน้ำมันแล้ว จะทำให้ผิวหน้า ขึ้นงาน  
มีความแข็งและสึกหรอได้ยาก ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของปลายคมมีดยาวนานกว่า

เอกสารนี้คมมีดที่ขึ้นรูปในสารละลายน้ำ (ดูรูป 6-10 ประกอบ) เอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชั้นรูปในสารละลายน้ำ

ชั้นรูปในสารละลายน้ำมัน

รูป 6-10 เปรียบเทียบการสึกหกรของปลายคมมีดของ Die (ชั้นรูปด้วย wire cut EDM) วัสดุ : SKD-11, ความแข็ง HRC 59, ชั้นรูปขึ้นงานแล้ว 7 หมั่นขึ้น

## บทที่ 7

### Machining Procedures and Surface Characterization

องค์ประกอบของ WC-Co ถูกใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับชิ้นส่วนที่ทนต่อการสึกกร่อน และการตัดของเครื่องมือ การที่มีความแข็งและมีความต้านทานต่อการสึกหรอมาก ทำให้มันยากต่อการที่จะทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ดังนั้นจึงมีการนำเครื่องจักรชนิดพิเศษมาใช้ในการทำงาน

เทคนิคหนึ่ง ที่ใช้เครื่องจักรในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่มีความแข็งมาก ๆ ก็คือใช้ electrical discharge machine (EDM) วิธีนี้ถูกนำเสนอโดย Petrofes และ Gadalla ขั้นตอนของขบวนการ EDM เริ่มจากการกัดกร่อนโดยใช้ controlled electrical sparks

จะไม่มีสัมผัสโดยตรงระหว่าง electrode และชิ้นงาน และไม่มีแรงทาง physics ดังที่กล่าวมาแล้วนี้ ความแข็งและความเปราะของวัสดุสามารถที่จะนำมาทำงานได้ง่าย

จากการตรวจสอบผลงานที่ออกมา แสดงให้เห็นว่างานประกอบที่ออกมานั้น เกิดจากการที่ขบวนการ EDM เป็นสาเหตุทำให้เกิดครaters หลายตัวของ WC-Co และค่าให้ coast หมดไป

การผลิตโดยใช้วิธี EDM ถูกกล่าวหาว่าเป็นผลผลิต carbide ของการผลิตที่บกพร่องของวัสดุที่ทำออกมาไม่ดี เหตุผลจริง ๆ สามารถแสดงให้เห็นข้อเท็จจริงที่ว่าไม่มีข้อจำกัดของการทำงานในการใช้การเรียงแถวของตัวเก็บประจุ ที่เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้า พลังงานนี้ถูกปล่อยออกมาเพื่อทำให้เกิดประกายไฟ เมื่อเกิดความแตกต่างของความต่างศักย์ของฉนวนอ็อกอนที่มากถึง

ภายหลังจากการที่พลังงานถูกปล่อยออกมา ตัวเก็บประจุเริ่มสะสมพลังงานใหม่ สำหรับการ spark ครั้งต่อไป ปัญหาที่เกิดขึ้นกับ power supply ชนิดนี้ก็คือ ตัวเก็บประจุอาจจะ charged สำหรับ spark ครั้งหนึ่ง ๆ สามารถปลดปล่อยพลังงานได้มากที่สุดและเคลื่อนย้ายวัสดุจำนวนมาก อย่างไรก็ตามสำหรับการ spark ครั้งอื่น ความแตกต่างของ voltage (gap voltage) อาจจะได้ค่าที่เหมาะสมก่อนที่ capacitor จะเต็ม ดังนั้นการปลดปล่อยพลังงานจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคุณภาพที่ไม่ค่อยดี โดยได้บอกในแคตตาล็อกแล้ว ในเครื่องชนิดใหม่ Power Supply ชนิดที่ให้สัญญาณ pulse จะถูกใช้ และพลังงานที่ถูกปลดปล่อยโดยการ spark จะถูกควบคุมและให้รูปสัญญาณ pulse ที่เที่ยงตรง โดยให้เป็นช่วง ๆ ในจุดนี้จะสามารถอธิบายได้อีกดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 1 ( ต่อ )

Cobalt content	WC grain size	Elastic modulus	K <sub>1c</sub>
(%)	( μm )	( kg/mm <sup>2</sup> )	( Nipam - 1/2 )

6	1-3	65.0 ± 2.5	9.1 ± 0.7
12	1-3	60.5 ± 2.3	11.1 ± 0.9
24	1-3	44.2 ± 3.2	16.9 ± 2.6

6	1-3	65.0 ± 2.5	9.1 ± 0.7
6	2-4	60.6 ± 1.9	6.4 ± 0.3
6	3-6	59.4 ± 2.3	17.4 ± 2.6

## ตารางที่ 1 ( ต่อ )

Cobalt content	WC grain size	Electrical conductivity	Thermal conductivity
(%)	( μm )	( mhcs/cm. )	( W/m-k )

6	1-3	0.0585	100
12	1-3	0.0585	105
24	1-3	0.0560	93

6	1-3	0.0585	100
6	2-4	0.0610	105
6	3-6	0.0620	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### เทคนิคการทดลอง

ลักษณะของการพิจารณาที่ประกอบขึ้นจากสิ่งต่าง ๆ

การพิจารณาครั้งนี้ใช้ WC-CO 3 ตัว ที่มี WC grain ขนาด 1-3, 2-4 และ 3-6  $\mu$ m และมีส่วนประกอบที่เป็น Cobalt อยู่ 6, 12 และ 24% จะถูกเลือกมาศึกษาถึงผลของส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของ WC grain จะพิจารณาว่าส่วนประกอบทั้ง 3 มี cobalt 6% และขนาด grain 1-3, 2-4 และ 3-6  $\mu$ m ผลสรุปของคุณสมบัติที่ได้จากส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 ค่าความแข็ง (hardness) และ modulus ของความยืดหยุ่นจะลด เมื่อส่วนประกอบที่เป็น Cobalt เพิ่ม ในขณะที่ค่าความเหนียวหัก และสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย คุณสมบัติจะลง ขณะอุณหภูมิและค่าความนำไฟฟ้าของส่วนประกอบที่เป็น Cobalt สูงจะถูกรักษาไว้ ความพรุน 2.0%, 3.0%, 7.3% ได้รวมส่วนประกอบที่เป็น Cobalt 6, 12 และ 24% ตามลำดับ

ตารางที่ 1

Cobalt content (%)	WC grain size ( $\mu$ m)	Hardness (RA)	Thermal expansion ( $\times 10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> )
6	1-3	31.4 + 0.4	4.55
12	1-3	39.4 + 0.5	5.36
24	1-3	86.9 + 0.6	6.30
6	1-3	31.4 - 0.4	4.55
6	2-4	38.6 + 0.5	4.68
6	3-6	87.3 + 0.5	4.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 จำนวน cobalt, ค่าความแข็ง, ค่า modulus ยึดหยุ่น จะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของ WC grain มีขนาดลดลง ขณะที่สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุณหภูมิ ความเหนียวแตกหัก, อุณหภูมิ และค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงต่างๆ นี้เชื่อว่าจะเกิดจากบริเวณที่มีพันธะต่ำ และการเพิ่มจำนวน Cobalt หมายถึง ระยะทางระหว่าง EC grain ที่ทำให้ WC grain ใหญ่ขึ้น

### Machining Procedures and Surface Characterization

WIRE CUT EDM ซึ่งผลิตโดย Agieutron Characterization ใน Switzerland ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะใช้วิธีการตัดจะใช้ขนาด 5:1.2 และสารที่ใช้ในการควบคุมจะใช้รุ่น CNC-100 ส่วนของการ control จะใช้ pulse ที่เปลี่ยนตามเวลา ความหนาแน่นของกระแสและความถี่ ขณะที่กำลังรักษาอัตราการละลายอยู่ที่ 30 mm<sup>3</sup>/min. สายลวดประกอบด้วยทองแดง 63% และ สังกะสี 37% ส่วนผสมของน้ำที่ 1:1 และเกลือ และถูกทำให้จะถูกใช้เป็นของเหลว dielectric และอัตราส่วนจะถูกปรับที่ 2:1 เพื่อให้ค่าความจุอยู่ที่ 6 s / cm. การใช้กำลังงานจะถูกกำหนดไว้ให้แตกต่างกันของอัตราการทำงาน เช่น rectangular pulse ดังนั้น โดยการหารค่ากำลังด้วยอัตราที่เคลื่อนเข้า มีการตัดชิ้นส่วนตัวอย่าง และผิวตามขวางที่ถูกตัด

JSM-25 S Scanning Electron Microscope ถูกใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบและ โครงสร้างของพื้นผิว X-ray photoelectron spectroscopy XPS ทำขึ้นจากการ Kratos XSAM 300 ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว

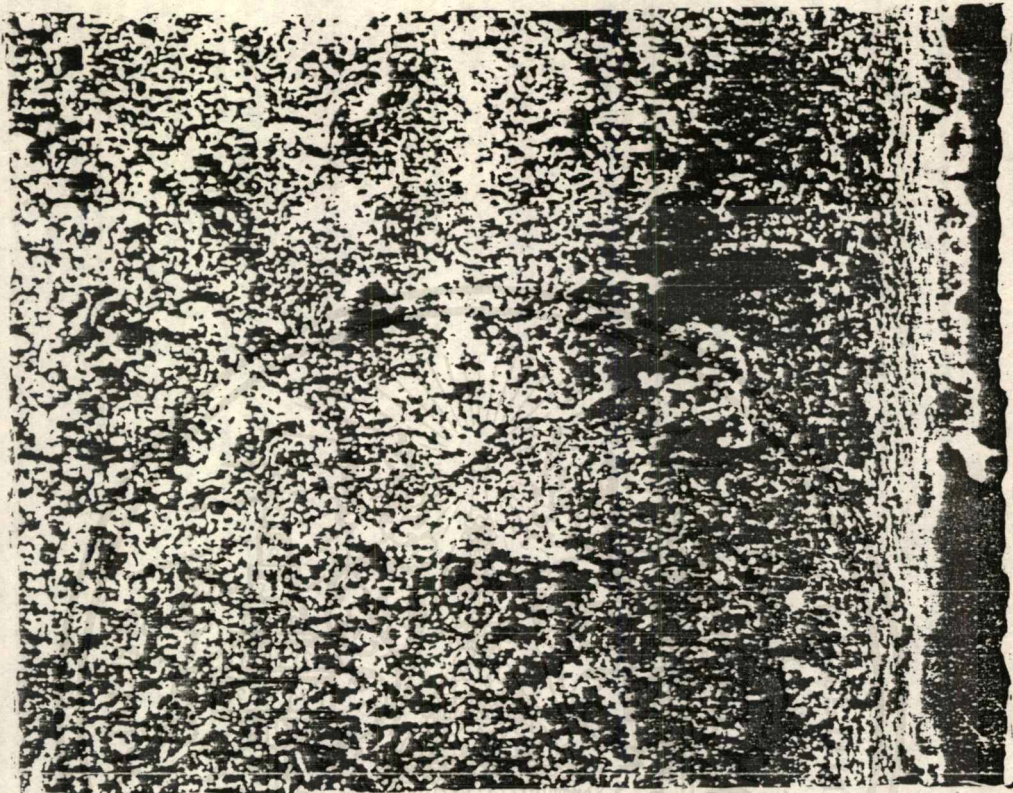
ตัวเลขของ Vickers micronardness ถูกกำหนดโดย EDM-ed, diamond sawed (เหลี่ยมที่มีพื้นแข็งมาก) และการกระทำต่อพื้นผิว

ดูเหมือนว่า การใช้ power supply ชนิด pulse เพื่อกำเนิดรูปร่างและคาบเวลาของ pulse ที่แน่นอนและเป็นตัวให้กำเนิดความร้อนซึ่งเป็นตัวทำลายโครงสร้างของพื้นผิว

การใช้ power supply ชนิด pulse ผู้เขียนพบว่าช่วงเวลาที่ cobalt หลอมละลาย และระหว่าง off time เมื่อ plasma เกิดการปะทะกันทำให้เกิด shock wave เคลื่อนที่ออกจาก WC grain ( ดูจากภาพ 1 ) ระหว่างขั้นตอนนี้ ของเหลวพลาสมาที่จะแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง และเนื่องจากมีการขยายตัวอย่างมากของอุณหภูมิของพื้นที่

เอกสารนี้เรื่อยแตกเพิ่มมากขึ้น รับการรับรองให้เห็นบนพื้นผิวนั้นเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของ cobalt ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขขนาด grain ของ WC



รูปที่ 1 EDM-ed surface texture of WC-Co,  
 (0.6 % 1-3 μm WC grains) using  
 operating conditions of: I<sub>0</sub> 0 A,  
 t=1.4 s, f=0.56 kHz

ความเค้นที่ถูกสร้างขึ้นจะหลงเหลืออยู่ภายในพื้นผิวของ EDM-ed ถูกคำนวณ  
 แล้วโดยการใช้เทคนิคที่ถูกพัฒนาโดย Oer และ Facnette ซึ่งคิดจากรัดมีความโค้ง ซึ่ง  
 เป็นการวัดด้วยสายตาในทางวิทยาศาสตร์ โดยใช้หลักการแทรกสอดของแสง

**RESULTS AND DISCUSSIONS**

**Electrical Discharge Machining of WC-CO**

ในการใช้ capacitant type power supply นั้น Zolotykh และ Korobova ได้แสดงให้เห็นว่า EDM ของ WC-CO สามารถผลิต microcrack ที่ surface full ได้ โดยมีช่องว่างระหว่าง 21 ถึง 630 μm นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Bormann ได้แสดงให้เห็นเอกสารนี้ให้ของ Oopait จะถูกทำทั้งหมดในเวลาอันสั้นที่ผิวขยาเทร็ดรมาลกฎได้อธิบายประเภทโพลีเมอร์ที่ว่าค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

coobait binder มีความสามารถในการเหนียวน้ำมาก ในขณะที่ carbide granules สามารถต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่าน binder และรอบ ๆ carbide granules นี้จะทำให้เกิด disintegration ของ coobait และเกิดแรงดึงที่เก็บเอา granules เอาไว้ด้วยกัน จากการติดตาม high-energy EDM pulse นี้ granule บางตัวจะถูกปลดปล่อยจนหมดและจะหายไป ส่วน granules อื่น ๆ บางส่วนจะถูกเก็บไว้ที่ที่เฉพา และอาจ flake away ภายใต้อิทธิพลที่เหมาะสม นอกจากนี้ความร้อนที่สูงขึ้นจาก EDM spark จะละลายรอบ ๆ ขอบของ carbide granules

ในทางกลับกัน การวิเคราะห์ scanning electron microscopy (SEM) แสดงให้เห็นว่า ขณะทำงานของระบบการ EDM ที่มี power supply ชนิด pulse จะทำให้พื้นผิวที่ทำการกัดถูกปกคลุมด้วยหยดน้ำเล็กน้อย

การทดลองนี้ ได้ใช้ผงคาร์ไบด์ชนิดที่ 1 ซึ่งมีความละเอียดของผงคาร์ไบด์เป็นอัตราส่วน 24% จากตัวประกอบแต่ละตัว และใช้ของเหลวที่ 2 ดังที่เห็นในรูปที่ 1 เพื่อที่จะทดสอบการกัดเข้าไปภายใต้พื้นผิว

ตารางที่ 2

t (s)	I (A)	f (kHz)	cutting rate (mm <sup>3</sup> /min.)	Rate of removal (mm <sup>2</sup> /min.)
1.00	0.75	0.58	0.25	0.30
1.40	0.75	0.58	0.26	0.31
1.75	0.75	0.58	0.29	0.35
2.25	0.75	0.58	0.31	0.37
2.50	0.75	0.58	0.32	0.38
3.00	0.75	0.58	0.32	0.38
3.50	0.75	0.58	0.32	0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 (ต่อ)

t (s)	I (A)	f (kHz)	cutting rate (mm/min.)	Rate of removal (mm <sup>2</sup> /min.)
1.40	0.50	0.58	0.19	0.22
1.40	0.75	0.58	0.26	0.31
1.40	1.00	0.58	0.32	0.38
1.40	1.25	0.58	0.32	0.38
1.40	1.50	0.58	0.32	0.38
1.40	0.75	0.50	0.25	0.24
1.40	0.75	0.60	0.30	0.31
1.40	0.75	0.70	0.35	0.37
1.40	0.75	0.80	0.32	0.38
1.40	0.75	1.25	0.52	0.38
1.40	0.75	2.00	0.32	0.38

ตารางที่ 2 (ต่อ)

t (s)	I (A)	f (kHz)	Power	Energy per unit volume removed
1.00	0.75	0.58	0.001	8.2
1.40	0.75	0.58	0.043	3.3
1.75	0.75	0.58	0.056	3.2
2.25	0.75	0.58	0.089	11.2
2.50	0.75	0.58	0.076	12.0
3.00	0.75	0.58	0.092	14.5
3.50	0.75	0.58	0.107	13.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

---

t	I	f	Power	Energy per unit
(s)	(A)	(kHz)		volume removed

---

1.40	0.50	0.58	0.028	7.6
1.40	0.75	0.58	0.048	8.9
1.40	0.98	0.58	0.067	9.3
1.40	1.25	0.58	0.071	11.2
1.40	1.50	0.58	0.086	13.6

---

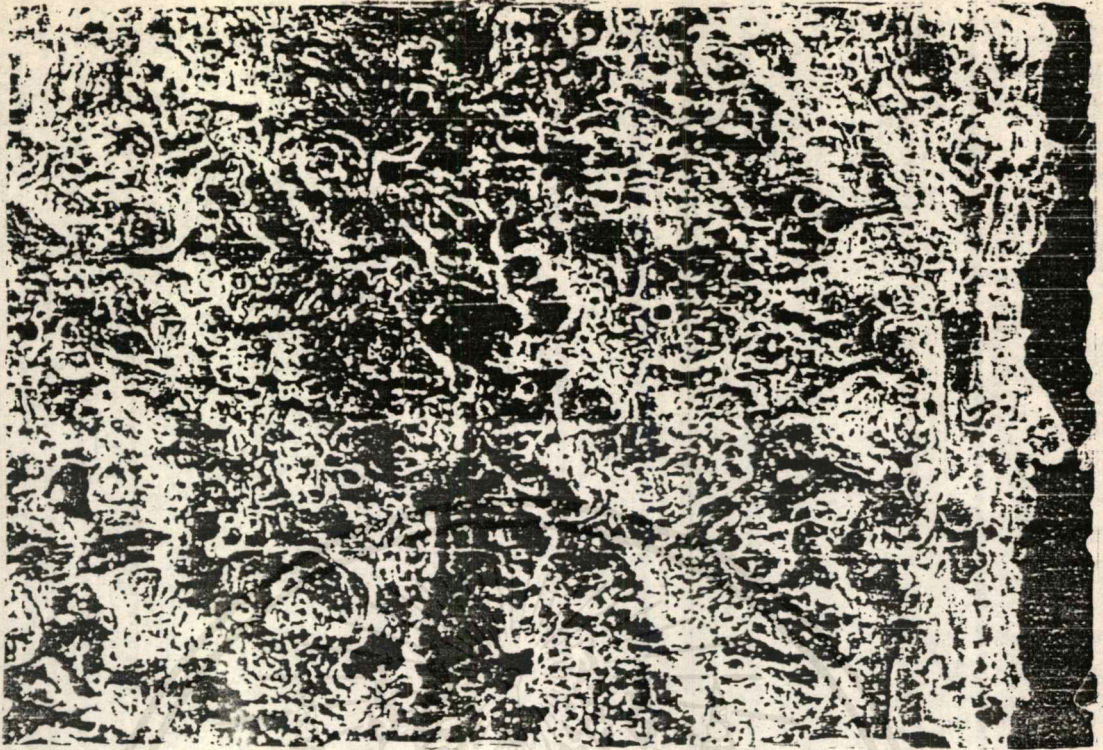
## ตารางที่ 2 (ต่อ)

t	I	f	Power	Energy per unit
(s)	(A)	(kHz)		volume removed

---

1.40	0.75	0.50	0.037	9.3
1.40	0.75	0.60	0.044	8.5
1.40	0.75	0.70	0.052	8.4
1.40	0.75	0.80	0.059	9.3
1.40	0.75	1.25	0.092	14.5
1.40	0.75	2.00	0.147	23.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



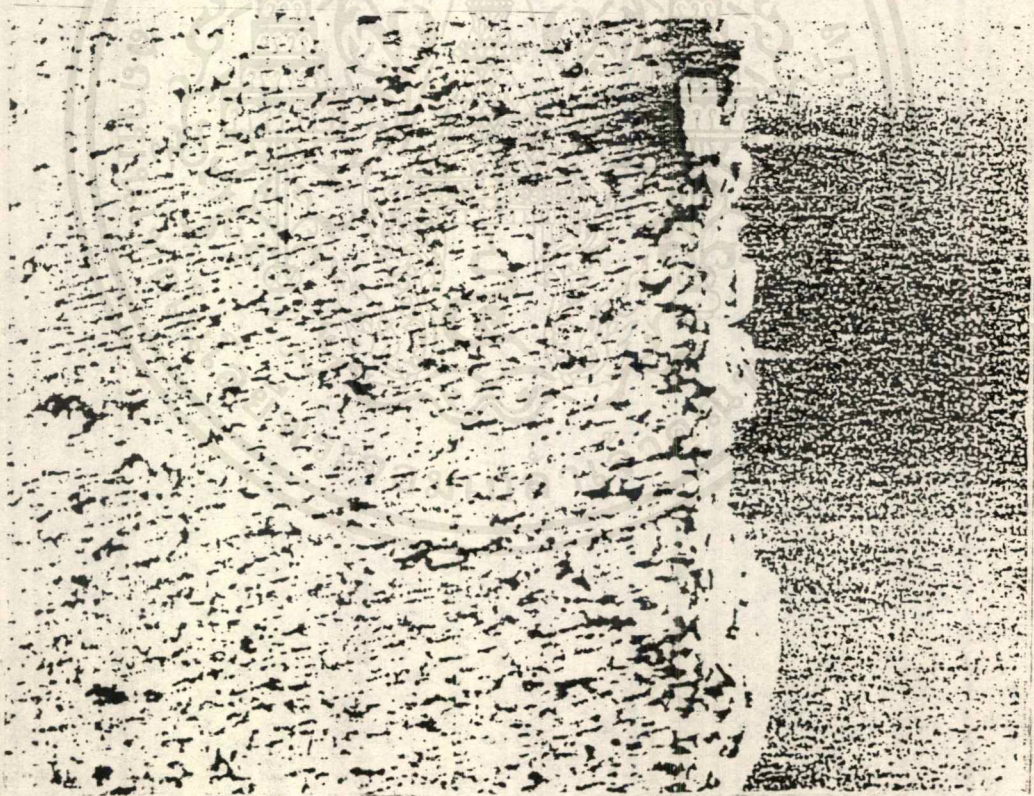
รูปที่ 2 EDM-ed surface texture of WC-Co  
( 12% Co, 1-3  $\mu$ m WC grains ) using  
operating conditions of : I-1.0 A,  
t-1.4 s, f-0.56 kHz

ในการเพิ่มของกระแส-ความถี่ หรือช่วงเวลาของสัญญาณ pulse ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัด และอัตราการเคลื่อนที่มีค่าแน่นอนซึ่งต้องใช้พลังงาน มากกว่าโดยปราศจากการเคลื่อนที่ในสภาวะการทำงาน สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ที่มากที่สุดนั้นสามารถได้จากความแตกต่างขององค์ประกอบ และขนาดของ grain พบว่าขณะที่มีการนำไฟฟ้าอย่างสูงขององค์ประกอบที่ส่วนมากเป็น cobalt หรือองค์ประกอบที่มี WC grain อย่างหยาบอยู่ ขีดจำกัดของอัตราการทำงานสูงสุด สามารถ ประยุกต์เพื่อให้เกิดอัตราการเคลื่อนไหวสูงกว่าได้ ( ตารางที่ 3 ) การวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรที่เคลื่อนไหว

#### Diamond Saw Machining

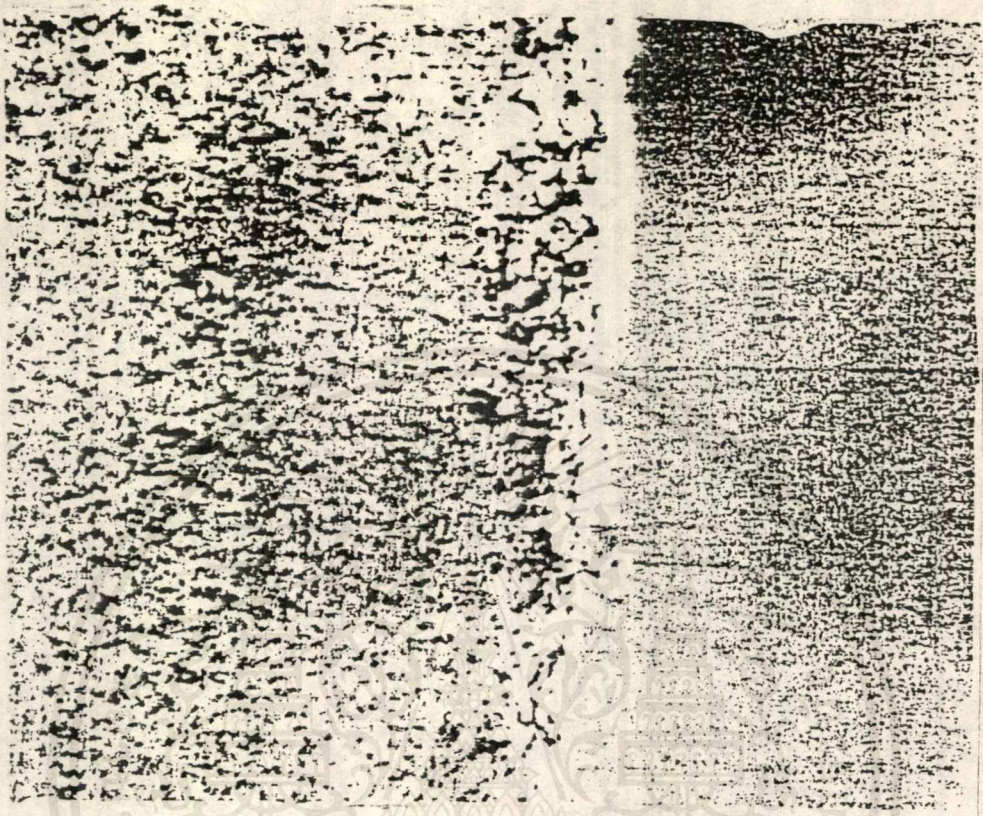
ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น Diamond Saw Machining จะทำงานที่ความเร็ว 260 รอบ/นาทีที่จะให้ความหยาบเมื่อเทียบกับ EDM ตารางที่ 4 ได้สรุปผลที่ได้จากการใช้ Diamond Saw Machining การเปรียบเทียบอัตราการตัดในตารางที่ 4 กับตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า EDM มีอัตราการเคลื่อนไหวที่เร็วกว่า ความขรุขระของผิวของ Diamond ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Saw Machining จะลดลง โดยการเพิ่มปริมาณ Cobalt การทดสอบ SEM ของผิวเครื่องจักร บรรจุ Cobalt 6% โดยน้ำหนัก จะประกอบด้วยช่องตาม The Machining Direction (รูปที่ 4) อย่างไรก็ตามช่องจะไม่ปรากฏเพิ่มขึ้นอีกเมื่อปริมาณ Cobalt เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5) การสังเกตนี้ชี้ให้เห็นว่าผลึกของ WC เกิดการเคลื่อนตัว โดยการเลื่อยเคลื่อนที่ไปในทิศทางของการตัดภายใต้ความดัน เป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยถลอกบนผิวการผสม Cobalt ในปริมาณที่สูงขึ้นในชิ้นส่วนจะทำให้รอยข่วนจำกัดบริเวณ ซึ่งจะส่งผลเช่นนี้ทราบเท่าที่มันถูกตรึงอยู่ในแม่พิมพ์ที่อ่อนนุ่ม ความเสียหายที่สร้างขึ้นด้วยการบรรจุ Cobalt ในปริมาณที่ต่ำ เมื่อเป็นเช่นนี้คาดว่าจะหน่วงอัตราเร็วของเครื่องจักร Zeiwer และ Malkin ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ x-ray microanalysis ที่ส่วนล่างของช่องที่ถูกสร้างขึ้นระหว่าง WC-Co จะไม่มี Cobalt และที่สั้น จะเต็มไปด้วย Cobalt ปรากฏว่าจะไหลออกมา ระหว่างผลึกต่าง ๆ



รูปที่ 4 Photomicrograph for Diamond Saw Machined surface  
( 6% Co, WC grain size 1-3  $\mu$ m )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 Photomicrograph for Diamond Saw Machined surface  
( 24 % Co, WC grain size 1-3 :  $\mu$  m )

ตารางที่ 3

Cobalt content (Weight %)	WC grain size ( $\mu$ m )	Surface roughness ( $\mu$ m )	Width of cut (mm/min.)	Cutting rate
6	1-3	4	197	0.55
12	1-3	7	190	0.82
24	1-3	10	200	0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 3 ( ต่อ )

Cobalt content (Weight %)	WC grain size ( $\mu$ m)	Surface roughness ( $\mu$ m)	Width of cut (mm/min.)	Cutting rate
------------------------------	-----------------------------	---------------------------------	---------------------------	--------------

3	1-2	4	197	0.55
6	2-4	6	232	0.57
9	3-6	10	261	0.57

## ตารางที่ 3 ( ต่อ )

Cobalt content (Weight %)	WC grain size ( $\mu$ m)	rate of removal ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	Power (J.s)	Energy per unit volume removed ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )
------------------------------	-----------------------------	---	----------------	--

6	1-3	0.69	0.092	8.0
12	1-3	0.99	0.126	7.48
24	1-3	1.22	0.630	30.2

6	1-3	0.69	0.092	8.0
6	2-4	0.84	0.105	7.5
6	3-6	0.95	0.241	15.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4

---

Cobalt content (Weight %)	WC grain size (m)	cutting rate (mm/min)	Maximum surface roughness (m)
---------------------------	-------------------	-----------------------	-------------------------------

---

6	1-3	0.049	9
12	1-3	0.057	3
24	1-3	0.082	5

---

6	1-3	0.049	3
6	2-4	0.054	7
6	3-6	0.061	6

---

ถ้าหาก WC Grain เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาของ Cobalt เพิ่มขึ้น ดังนั้นจะ การลดรอยแตกกร้าว และเป็นกรเพิ่ม Machining Rate.

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการใช้ใบมีดตัดด้วยความเร็วต่ำ จะส่งผลให้ความหยาบ ของพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าความแข็งของพื้นผิวที่ได้รับโดย EDM-ing และ diamond saw ถูกตัดสินสำหรับการประกอบขึ้นเป็น WC-Co ที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกัน และค่าขนาด WC Grain จากตารางที่ 4 แสดงค่าความแข็งที่ได้รับจากทั้ง EDM และการใช้ diamond saw ตัดผิว ค่าความแข็งเพียงเล็กน้อยสำหรับการใช้ EDM ตัดผิว มี แนวโน้มว่าจะต่ำกว่าค่าที่รับจาก diamond saw ค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเล็กน้อยที่ได้จาก diamond saw อาจจะมีขึ้นถึงความร้อนที่ถูกปลดปล่อย เป็นสาเหตุให้ stress ในความแข็งลดลง ถึงแม้ว่า EDM จะทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าการลด stress และทำให้ ลดลงเพียงเล็กน้อยในความแข็งที่ได้รับมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5

Cobalt content (Weight %)	WC grain size ( $\mu$ m)	Uncut (VHN)	EDM (VHN)	Diamond Saw (VHN)
6	1-3	2046 $\pm$ 269	1902 $\pm$ 227	1856 $\pm$ 248
12	1-3	1648 $\pm$ 250	1509 $\pm$ 226	1381 $\pm$ 237
24	1-3	1265 $\pm$ 212	1122 $\pm$ 250	1084 $\pm$ 198
6	1-3	2046 $\pm$ 269	1902 $\pm$ 227	1856 $\pm$ 248
3	2-4	1736 $\pm$ 291	1736 $\pm$ 264	1736 $\pm$ 235
6	3-6	1637 $\pm$ 227	1515 $\pm$ 250	1450 $\pm$ 166

จากการเปรียบเทียบผิว EDM-ed ที่ถูกผลิตโดย power supply 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่าแหล่งจ่ายไฟ ชนิด pulse ให้พื้นผิวที่มีคุณภาพที่ดีกว่า Stress ส่วนเหลือที่สร้างในพื้นผิว EDM-ed ถูกพบว่ามีคุณสมบัติแตกต่างกันทางกายภาพ EDM-ing ของส่วนประกอบ WC-Co จะผลิตพื้นผิวที่หยาบและแข็งเทียบกับการใช้ Diamond Saw ที่มีอัตราเร็วต่ำ แต่ให้ removal rate สูงกว่า

## บทที่ 8

### HIGH SPEED PULSE DISCRIMINATION FOR REAL-TIME EDM ANALYSIS

ขบวนการ EDM-process จะให้ผลดีที่สุด สามารถทำให้สำเร็จได้โดยการตัดแปลงควบคุมพารามิเตอร์อย่างเหมาะสมที่สุด เพื่อให้ไปถึงอัตราการเคลื่อนที่สูงสุด ตัวอย่างเช่น ประสิทธิภาพ(effective)ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ นั้นคือระบบที่มีการตรวจจับอย่างรวดเร็วจำเป็นต้องนำมาใช้สำหรับวัตถุประสงค์นั้นๆ ( in process ) ในขบวนการควบคุมของ EDM ที่ต้องการหาค่าการทำงานของเครื่องจักร เช่น อัตราการเคลื่อนที่สูงสุด การใช้ขั้ว eletrodes เล็กๆ ค่า roughness ของผิวงานที่ยอมรับได้ หรือ รวมถึงสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการแสดงให้เห็น ถ้าเป็นไปได้ในการ on-line การวัดผลของเครื่องทำได้ยาก ยังมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขบวนการซึ่งเราเรียกว่า sensing parameters ที่เกี่ยวข้องกันบ้างกับ machining objective

ความไวของพารามิเตอร์และการเกิด gap voltage ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของ process ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ (eig. deley time  $t_d$ , rise time  $t_r$ , fall time  $t_f$ ) ทันทันที voltage ถึงระดับหนึ่ง ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ใช้กันมากของการควบคุมขบวนการ EDM ตัวอย่างเช่น

-ค่าเฉลี่ย หรือ การเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของ voltage ( $U_e$ ) ซึ่งใช้ในการควบคุมระบบ servo

-จุดเริ่มต้นของการหน่วงเวลา  $t_d$  ใช้ประโยชน์ในขบวนการผลิต ซึ่งใช้ในตัว gap sensor

-ระดับสัญญาณ noise อาจทำให้ขบวนการเกิดความยุ่งยาก

ประเภทคำสั่งของ EDM-pulse ตามมาตรฐาน CIRP STC-E แสดงให้เห็นรูปแบบการวิเคราะห์ EDM-pulse แบ่งเป็น 4 ชนิด normal sparks, open circuit, short circuit, arcs การวิจัยพัฒนาโดยรวม pulse ชนิดต่าง ๆ ซึ่งอาจจะแสดงให้เห็นประโยชน์ในการพัฒนาควบคุมระบบ EDM-control

ดังนั้น รายละเอียดที่ถูกนำไปค้นหาจะถูกนำไปเปลี่ยนแปลงชนิดของ pulse เหมือนกัน ซึ่งเกิดใน die-sinking EDM-operation ซึ่ง pulse ที่เกิดขึ้นดีเท่ากับ pulse ที่เกิดจากขบวนการ wire-cutting(เช่น การเลือกกฎเกณฑ์) pulse ชนิดอื่นสามารถพิจารณาอย่างง่าย ๆ

ผลของ pulse ที่กล่าวมาแล้วเบื้องต้นเหมือนกับ pulse ที่ได้จากขบวนการค้นหาหาระบบ pulse ที่แตกต่างกันถูกสร้างที่ K.U. Leuven กำหนดไว้มี 15 ชนิด EDM-pd อาจจะถูกต่อเข้ากับทั้งสองชนิด(die-sinking หรือ wire-cutting)ของเครื่อง spark erosion ผลเริ่มต้นที่ถูกบรรจุด้วยอุปกรณ์การหาค่านี้จะอธิบายให้ทราบในตอนท้ายของบทนี้

### การจัดลำดับลักษณะของ pulse

การตั้งมาตรฐานของ pulse เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงชนิดของ pulse ที่เกิดขึ้นโดยทำการทดลอง

### ความถี่ของ Wire-EDM-Discharges

การค้นหาซึ่งแน่นอนขึ้นกับการสร้าง pulse คงที่ (static pulse เพื่อเป็นการนำไปใช้ในระบบ die-sinking จะได้ผลดีเท่ากับ wire-cutting)

ปัญหาแรกที่จะทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่า frequency content ของ pulse signals สำหรับวัตถุประสงค์ที่จะทำให้ high frequency โดยการโปรแกรมอุปกรณ์ wave form ที่ใช้ ( Tektronic 7912A/D 500MHz WaveForm recorder ) รูปที่ 1. channel-1 บันทึกการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ โดยความถี่สูงใส่เข้า นั่นคือ สัญญาณ voltage หรือ current ที่มีความทะลุทะลวงสูงยิ่งไปบนแผ่น silicon diode ซึ่ง diode ชนิดนี้สามารถค้นหาที่อัตราส่วนในแนว vertically หรือ horizontally ต่ำมาก (เช่น digital mode หรือ T.V. mode)

หลักของข้อมูลที่ส่งไปยังตัว monitor หรือตัว control และส่งไปที่ plotter สัญญาณมากกว่า 100 MHz (ความถี่กว้างกำหนดโดย voltage หรือ current) สามารถรวมตัวยิ่งสัญญาณ การทดลองถูกแสดงเมื่อไม่เจาะจงที่จะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงและเมื่อความถี่ 12.5 MHz อัตราการป้อนข้อมูลของ 486 Tektronix digital oscilloscope (ดูย่อหน้าต่อไป) เป็นที่พอเพียงที่จะเหมือนและลักษณะที่แตกต่างของ ลักษณะ pulse ที่เกิดขึ้นทุก ๆ pulse ที่เกิดขึ้นแคบ ๆ ของ wire-cutting machine pulse บางชนิดถูกบันทึกในเครื่อง Charmilles-Andrew wire-cutting : ที่ความถี่ 500 MHz ดังแสดงในรูปที่ 2. ชนิดของ Characteristics ซึ่งใช้ใน EDM-PD ในประเภทของ pulse ที่แตกต่างกันสามารถถูกพบในการวัด voltage หรือ current ประกอบด้วย oscilloscope ขนาด 12.5 MHz ตามที่บรรยายในย่อหน้านี้

รูปที่ 4. แสดงส่วนของการเปลี่ยนแปลง pulse ที่ต่อเนื่องกัน ตรวจสอบโดยเครื่อง Charmilles Isopulse 80 รูปบนแสดง gap voltage รูปล่างแสดง pulse current จากแบบ form ที่ซ้ำ มันสามารถ reset เมื่อ voltage เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ระหว่างการเปลี่ยนแปลง ( $t_e$ ) เป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงของ charge และ discharge

-หลังจาก voltage ลดลง (breakdown drop) เป็นขั้นตอนที่ pulse เรียบมาก (very smooth) เปรียบเทียบเป็นหน้าที่ของการเกิด discharge ทั่ว ๆ ไปเกี่ยวกับการรวมลักษณะที่สำคัญของ pulse ที่แบ่งเป็น 15 ชนิด มีหน่วยเป็น

นาที (minute) ผลจากการเกิดขึ้นนำไปใช้ประโยชน์เพื่อหาหลักเกณฑ์ของ EDM-PD

รูปที่ 9. และ ตารางที่ 1. รวม pulse 15 ชนิด

Description	Pulse nr.	H.L.	$t_d > 200$ ns	$t_f$			$U_e$			$U_s$			Remarks
				S	N	H	H	N	L	H	N	L	
Normal spark	1	x	x		x			x			x		
Normal spark	2	x	x	x				x			x		$t_f$ small
Normal spark	3	x	x			x		x			x		$t_f$ large
Less eff. spark	4	x	x		x			x			x		$U_e$ high
Less eff. spark	5	x	x			x		NCF			x		$t_d$ large
Arc	6	x	NO		NCF			x			NCF		H.L. arc
Arc	7	NO	NO		NCF			x			NCF		
Arc	8	NO	NO		NCF					x		x	
Short circuit	9	NCF	NCF		NCF			NCF					
Short circuit	10	NCF	NCF		NCF			NCF				x	Carb. br
Contam. pulse	11	x	x			x		x			x		$U_e$ high
Less eff. spark	12	x	x		x			NCF			x		$t_d$ large
Contam. pulse	13	NO	NO		NCF			x			x		$U_e$ high
Open circuit	14	x	x		NCF			NCF			S.B.		No disc
Remainders	15	N.C.	NCF		NCF			NCF					Spec. ar
Summation	16	N.C.	NCF		NCF			NCF					Check

ตารางที่ 1 ลักษณะของ pulse ชนิดต่าง ๆ สำหรับ Deep Sinking Machining

Note : ดูรูปที่ 8.

H.L. : การตรวจจับระดับสูง

$t_d$  : ช่วงเริ่มต้นของการหน่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น  $U_e$  : voltage ที่ถูกวัดหลังจาก breakdown ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $U_s$  : การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของ pulse ระหว่างน้อยที่สุด 50 % ของ  $t_i$   
 $S$  : ช่วงเวลาสั้น ๆ ของ  $t_f$   
 $N$  : ตำแหน่งปกติ  
 $H$  : ค่าสูงสุดสำหรับฟังก์ชันที่พิจารณา  
 $L$  : ค่าต่ำสุดสำหรับฟังก์ชันที่พิจารณา  
 $NCF$  : ไม่พิจารณาฟังก์ชัน  
 $S.B$  : การตรวจจับบิตชนิดพิเศษสำหรับ open circuit  
 -อย่างเช่น รูปที่ 5. มี pulse 4 ชนิด

1. normal spark (ชนิดที่ 3.) ซึ่งค่อนข้างหน่วงเวลานาน  $t_d$  ที่ open circuit ตัวจ่ายไฟ 80 V และ voltage ที่มากกว่า fall time ( $t_f$ ) voltage drop ที่วัดระหว่าง 2 ระดับ การเปลี่ยนแปลง voltage ถูกพิจารณาและหา ค่าตามปกติ
2. สภาวะที่พอใจ ยกเว้นเมื่อจุดเริ่มการหน่วง ( $t_d$ ) จุดสุดท้ายมากกว่า 50 % ของ  $t_i$  (ชนิดที่ 5.)
3. open circuit (ชนิดที่ 14.) ไม่มีจุด break down ปรากฏขึ้น การ set pulse ชนิดต่าง ๆ ควรระวังลักษณะของ pulse ที่แตกต่างกัน
4. arc (ชนิดที่ 15.) ซึ่งมากกว่าระดับ voltage ที่เลือก ไม่มีจุดหน่วงเวลา รูปแบบเฉพาะของ pulse สามารถแยกลักษณะอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการรวมกันของ pulse ในขบวนการสามารถหาค่าได้

ชนิดของ pulse บันทึกโดยการสังเกตของเครื่อง Chamilles-Andrew wire-cutting จะถูก plot ดังใน รูปที่ 6 เปรียบเทียบกับขบวนการ die-sinking pulse จะใช้ช่วงเวลาที่สั้นมาก การเปลี่ยนแปลงโดยปราศจากการหน่วงเวลาด้วย

สำหรับการพัฒนาขบวนการ die-sinking พิจารณาที่การ arcs ซึ่งไม่ต้องการให้ ทะลุมันไม่มีความแน่นอนและถูกต้องสำหรับเครื่อง wire-cutting การวิเคราะห์รายละเอียดของ EDM-PD ต้องการพิสูจน์ตามข้อกำหนดนี้ การ short circuit ของกระแสจะถูกจำกัด (limited) โดยความต้านทานภายใน

generator ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สำหรับการวิเคราะห์ต้องระวัง gap voltage/time allows เพื่อแยกชนิดของ pulse ต่าง ๆ บางอย่างอาจจะมากหรือน้อย หรือทำให้เกิดอันตรายเสียหายได้

#### EDM-PULSE DISCRIMINATOR (EDM-PD)

การแยกลักษณะของ pulse ขึ้นอยู่กับพื้นฐานของตัวตรวจจับสัญญาณทางไฟฟ้า  
 ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหาไม่พบเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-time periods

-slope ของสัญญาณ voltage drop (dv/dt)

ดังนั้น voltage pulse แสดงอยู่สอดต่อเนื่องครั้งที่ช่วง 10 MHz การส่ง pulse ไปในประเภทงานหนักนี้ EDM-PD ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ (รูปที่ 7.)

1. input unit

2. การตรวจจับและประเภทของ pulse

3. ความจำของเครื่องและขบวนการ

### INPUT UNIT (รูปที่ 7.)

input gap voltage เป็นกระแสสลับ AC ซึ่งเข้ากันได้ดีกับวงจร electronics สำหรับ pulse แต่ละชนิดจะพิจารณาเมื่อไม่ไปถึงจุดที่ไม่มี การปล่อย voltage (open generator voltage) เช่น 30 V หรือ 200 V เป็นอิสระต่อการ set generator ดังนั้นจึงเป็นลักษณะพิเศษอย่างหนึ่งของการออกแบบวงจร High Level Detection ต่อไปคือ voltage ส่วนที่เกิน 50 volt คือจุดทำงาน (cut off) เพราะ voltage สูงสุดของการ spark เหนือระดับ 50 volt สัญญาณของการใช้ตัดจะถูกป้อนอย่างรวดเร็วเข้าเครื่อง Analog to Digital Converter

(ตัวแปลงสัญญาณ) อัตราการเปลี่ยนแปลง 10 us เครื่อง A/D-converter มีบิตที่แตกต่างกัน 8 บิตเหมือนกันมีความเที่ยงตรง 0.2 V ของ gap voltage

การป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนข้อมูล ซึ่งเกิดจากขบวนการกรณีจากการแผ่รังสี (radiation) ของขบวนการ EDM-process

1. เครื่องแปลงสัญญาณ A/D-conversion ควรมีการเลือก gap ที่ใกล้กันพอสมควร ซึ่งการส่งถ่ายข้อมูลสามารถ save ได้มากในการลำดับของลำดับตัวเลข (digitised format)

2. ตัว main frame ของตัวแยกสัญญาณเฉพาะทางฟิลิกส์จากเครื่อง ED-machine ซึ่งมีสัญญาณรบกวนต่ำสุด เครื่อง ED-machine และตัวแยกสัญญาณจะถูกต่อกันด้วยสาย shielded ที่มีระบบป้องกันสัญญาณรบกวน (special shielded cables)

3. เครื่อง opto-couplers จะป้องกันสัญญาณทางไฟฟ้าจากเครื่อง EDM-machine อุปกรณ์ทั้ง 3 ชนิดนี้ เป็นเครื่องที่ใช้เป็นตัวแยกสัญญาณ

-digitised gap voltage (8 bit)

-result of high level test (1 bit)

-10 MHz clock signal synchronisation (1 bit)

-the generator pulse time  $t_i$  (1 bit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตรวจจับและประเภทของ PULSE (รูปที่ 7.)

### ประเภทของ pulse ขึ้นกับพื้นฐานดังนี้

1. pre-history of the pulse
2. discharge characteristics
3. mean discharge voltage level

จุดต่ำสุดของการหน่วงเวลา  $t_d$  เท่ากับ 200 ns สามารถให้ set ให้เป็นมาตรฐานได้ voltage drop (dv/dt) เริ่มที่ voltage breakdown เป็นสำคัญช่วงความเร็วที่ให้เลือก 3 ข้อนี้ ใช้เป็นวัตถุประสงค์ในการแยก

การเรียงลำดับของ gap voltage (the digitised gap voltage) เป็นการเปรียบเทียบระดับของการปรับ ( $N_2, N_3, \dots$  etc, รูปที่ 8.) เพื่อ set โดยการใช้นิ้วและที่ตัวเลือก (thumb wheel selectors) ผลของการเปรียบเทียบรวมการแยกลักษณะของ pulse ได้ดีเท่ากับเวลาระหว่างการทำงาน (การเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $t_e$ , เวลาในการปล่อยสัญญาณ pulse  $t_p$ , จุดหน่วงเวลา  $t_d$ , เวลาระหว่างที่ pulse ทำงาน  $t_0$ ) เวลาในการปล่อยสัญญาณ pulse  $t_p$  และเวลาที่ pulse ทำงาน  $t_0$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงมาจากเครื่อง E.D.-Generator

การแบ่งประเภทและผลของการเปลี่ยนแปลงจะสามารถสนองความต้องการ

1. Short rise time ( $t_r$ ) สูงขึ้นถึงระดับที่ generator open voltage
  2. Ignition delay ( $t_d$ ) มากกว่า 200 ns
  3. Pulse fall time ( $t_f$ ) อยู่ในช่วงที่กำหนด
  4. การเปลี่ยนแปลงของ voltage จะต้องอยู่ระหว่าง voltage ที่ต้องการหา
- ถ้า 1 ใน 4 ข้อนี้ไม่พบที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงจะไม่ใช่ประเภทที่เป็นผลของ pulse หลังจาก breakdown ระดับของ voltage สามารถวัดได้ 8 ครั้ง/pulse ผลลัพธ์ที่ได้เท่ากับอัตราการเฉลี่ยของการวัด 8 ครั้ง อัตราการสุ่มจะใช้กำหนดและสามารถเปลี่ยนระหว่าง 100 ns และ 12.4 us

สรุปค่านี้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับกรปรับระดับของ voltage ได้และใช้ในการเลือกหลักเกณฑ์สำหรับการวิเคราะห์ input อื่น ๆ และประเภทตัวตรวจจับที่สร้างขึ้น (รูปที่ 9.) รวมถึงสัญญาณ current และ gap voltage ซึ่งมีลักษณะแตกต่างตามชนิดของ pulse และเวลาการแยกลักษณะของ pulse ข้อมูลจะถูกป้อนสู่ความจำของเครื่อง EDM-ไม่ว่ากรณี PD สำหรับการวิเคราะห์อีกนาน นี้อาหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หน่วยความจำและขบวนการ (รูปที่ 7.)

ความจำของอุปกรณ์สามารถแสดงให้เห็น 3 ส่วน

- การนับลำดับของความจำสำหรับปลของขบวนการทั้งหมดระหว่างการวัดนาน
- การนับลำดับของความจำสำหรับช่วงเวลาสั้น ๆ ของการวัด
- ความจำที่เก็บไว้ขนาดปานกลางสำหรับการวิเคราะห์รายละเอียดของ pulse ที่ต่อเนื่องกัน ข้อมูลทั้งหมดเกี่ยวกับ pulse 512 เป็น pulse ที่ถูกเก็บไว้(เป็น pulse ที่ต่อเนื่อง)

#### หน่วยความจำที่ใช้กับเครื่อง die-sinking และ wire-cutting

1. การวัดที่ยาวนาน (โดยการปฏิบัติ (activate manually) หรือ soft-warewise) ระหว่างช่วงเวลาที่ทำกรวัด (การค้นหาด้วย computer หรือ operator สำหรับช่วงเวลาสั้น ๆ เป็น ns, sec, min, hour) สำหรับขบวนการที่กล่าวมาแล้วนั้นจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำพิเศษ ผลรวมกันทั้งหมดของ pulse ชนิดที่ 1 ถึง 15 จุดรวมทั้งหมดของ pulse ชนิดต่าง ๆ จะถูกวัดในระหว่างการตรวจสอบ (ชนิดที่ 16.) ผลรวมเฉพาะของการหน่วงเวลา ( $t_d$ ) ช่วงระหว่างการเปลี่ยนแปลง ( $t_e$ ) ช่วงเวลาในการสร้าง pulse  $t_i$  ช่วงเวลาของ pulse  $t_o$

สิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ถูกส่งไปที่ frontal display และสามารถถูกอ่านโดย computer ชนิดของข้อมูลใช้สำหรับรูปแบบทั่ว ๆ ไปของขบวนการ

2. การวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ (ผลจากซอฟต์แวร์) บรรจุข้อมูลที่เหมือนกันกับการวัดระยะยาวข้อมูลสูงสุดของ pulse 4K สามารถถูกเก็บใน mode นี้ สามารถอ่านด้วย computer เท่านั้น

3. การสร้าง pulse ต่อเนื่อง (โดยใช้คู่มือ หรือ ซอฟต์แวร์) หน่วยความจำที่ใช้คือ Random Access Memories (RAM) จาก pulse ทั้งหมด 512 ชนิด pulse ที่ถูกล่าวมาข้างต้นจะเป็นแหล่งกำเนิดข้อมูล (supply)

a. Pulse time information: เวลาของ pulse

จุดหน่วงเวลา  $t_d$ , ช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลง  $t_e$ , ช่วงเวลาที่ใช้ในการสร้าง pulse  $t_i$ , ช่วงเวลาของ pulse  $t_o$

b. Characteristics Pulse: คุณลักษณะเฉพาะของ pulse

ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง voltage  $U_e$  ที่ใช้เป็นตัวอย่าง (เช่น ค่าเฉลี่ยของการวัด 8 ครั้ง, ชนิดของ pulse (1, 2, ..., 15), address ของ pulse และ block header)

หน่วยความจำของ pulse ต่อเนื่อง สามารถแสดงอย่างใดอย่างหนึ่งได้ใน 4 mode นี้

1. ที่เฉพาะสำหรับ moment arm โดย operator
2. ที่เหตุการณ์หนึ่งถูกค้นหาโดยการปรากฏของ pulse ชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ (เหตุการณ์ที่ผ่านมาแล้วของ pulse ชนิดหนึ่ง past history of a pulse)
3. กระบวนการโดยเฉพาะของ pulse ชนิดหนึ่ง (เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในปัจจุบันของ pulse ชนิดหนึ่ง pre history of a pulse)
4. จะเกิด 256 pulse ก่อนปรากฏชนิดของ pulse (pre and past history of a pulse)

การวัดระยะยาว การวัดระยะสั้น และความจำของ pulse ต่อเนื่อง สามารถแสดงให้เห็นในเวลาที่เกี่ยวข้องกันได้ ใช้ power มากในการวิเคราะห์รายละเอียดหลักการต่อไปของเครื่อง EDM-PD

1. ตัวแยกสัญญาณ pulse สามารถเป็นแนวทางของช่วง pulse ที่ลดลงถึง 2 us (yet 20 samples/pulse) สำหรับ pulse แต่ละชนิด ข้อมูล 18 บิต ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเลือกที่ซึ่งข้อมูลเกี่ยวข้องกัน

2. การปฏิบัติอาจกระทำได้ 3 ทาง: วัดระยะยาว (ms to min.) การวัดระยะสั้นมีขนาดจำกัด 4K Pulse ที่วิเคราะห์ 512 pulse

3. อุปกรณ์จะไม่เปลี่ยนข้อมูลบน pulse ที่ใส่มันเป็นไปได้ที่ขบวนการแสดงออกมา ความสำคัญของการควบคุมที่เหมาะสม ระบบต่าง ๆ ที่เลือกอย่างสมบูรณ์ การวิเคราะห์แบบรวมมากพอเพียง

**ผลเบื้องต้นที่ถูกบรรจุในเครื่องแยกสัญญาณ EDM-PD (die-sinking)**

บทพิสูจน์ของ EDM-PD Functions

ความแน่นอนเมื่อตรวจจับ pulse ของระบบที่แตกต่างในการตัดสินใจ หน้าทีของ EDM ที่ถูกออกแบบ อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถผลิตจำนวน pulse ที่ถูกเลือก เพื่อให้รูปร่าง pulse เหมือนดังที่ออกแบบไว้ อุปกรณ์นี้ต่อกับ EDM-PD ที่ทำให้เราวัดเกี่ยวกับ pulse หน้าทีของ EDM-PD สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยตัวมันเองในช่วงเวลาที่แน่นอน

รูปที่ 10. แทน pulse ตามการทำงานเฉพาะตัว กิ่งต่อ pulse โดยประมาณของการเปลี่ยนแปลง 1 ชนิด

รูปที่ 11. เป็น pulse 2 รูปคลื่น รูปแบบของ pulse หลายลูกคลื่นที่ช่องว่าง (gap) บาง pulse ที่ช้า ๆ แต่หลังจากรวมรูปแบบต่าง ๆ โดย EDM-PD พัลส์เป็นหลัก แรกที่ 10 MHz (EDM-PD INPUT) และปรับ 50 V สุดท้าย การเปลี่ยน D/A เป็น mode เลือกลงโดย Tektronix 468 oscilloscope จะสังเกตเห็นเส้นไม่ตรง ซึ่งสามารถพบได้ แต่ไม่พบในที่นี้

การสำรวจความหนาแน่นของ pulse ที่ให้ความสมดุลย์ ดังตารางที่ 2 ในระหว่างการ test การวัดระยะยาวทุก ๆ 3 วินาที ค่าสมบูรณ์ของ pulse ดีพอ ๆ กับคิดเป็น เปอร์เซ็นต์ จากตารางที่ 2 เครื่องจะ clear เมื่อไม่มี pulse ถึงสองครั้ง ( $P16 = P1 + P2 + \dots + P15$ ) ทั้งหมดของ pulse จะเห็นได้จากเครื่อง EDM-PD การเพิ่มประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลง  $t_e$ , การผลิต pulse  $t_i$ , จุดเริ่มหน่วยเวลา  $t_d$ , ระหว่าง pulse  $t_o$  และอัตราส่วนเวลา  $t_e/t_p$ ,  $t_d/t_i$ , และ  $t_d/t_p$  จะให้การหมุนเวียนของ pulse บางชนิด เช่น ฟังก์ชันของ GAP-width รูปที่ 12 แสดงผลของชนิดการเปลี่ยนแปลง เช่น หน้าทีของช่วงระดับอ้างอิงการหน่วง ( $t_d \text{ set}$ ) ระดับ  $t_d$  ที่นิยมน้อยมาก ๆ gap เล็ก ๆ รูปอ้างอิงบางชนิดของ pulse ดังรูปที่ 5. ข้อมูลถูกบรรจุโดยเครื่อง EDM-PD มันสามารถสังเกตได้เมื่อ ตัวเลขของการ spark(1) และ arcs(3) เกิดรวดเร็วด้วย gap เล็ก ๆ การเปลี่ยน\_เปิดวงจร(4) และ pulse ซึ่งสัมพันธ์กันกับ การหน่วงเวลา(2) การหมดไปของ gap เล็ก ๆ

Pulse type	Sum	Pulse density ( % )
1	4670	9.2
2	5502	10.9
3	11964	23.6
4	3	0.0
5	2217	4.4
6	48	0.1
7	13316	26.3
8	0	0.0
9	1	0.0
10	0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการช่างอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pulse type	Sum	Pulse density ( % )
11	6	0.0
12	685	1.4
13	0	0.0
14	1279	2.5
15	11014	21.7
16	50705	100.0

$t_e$ ( ms )	2146	$t_f$ ( ms )	2538
$t_d$ ( ms )	206	$t_o$ ( ms )	506
$t_e/t_f$ ( % )	84.6	$t_e/t_p$ ( % )	70.5
$t_d/t_f$ ( % )	8.1	$t_d/t_p$ ( % )	6.8

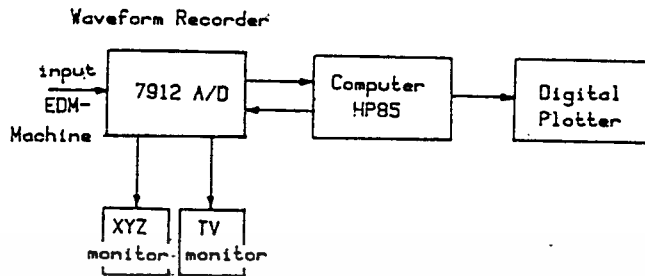
ตารางที่ 2: pulse ชนิดต่าง ๆ สำหรับ deep sinking EDM-test (ต่อ)

### บทสรุป

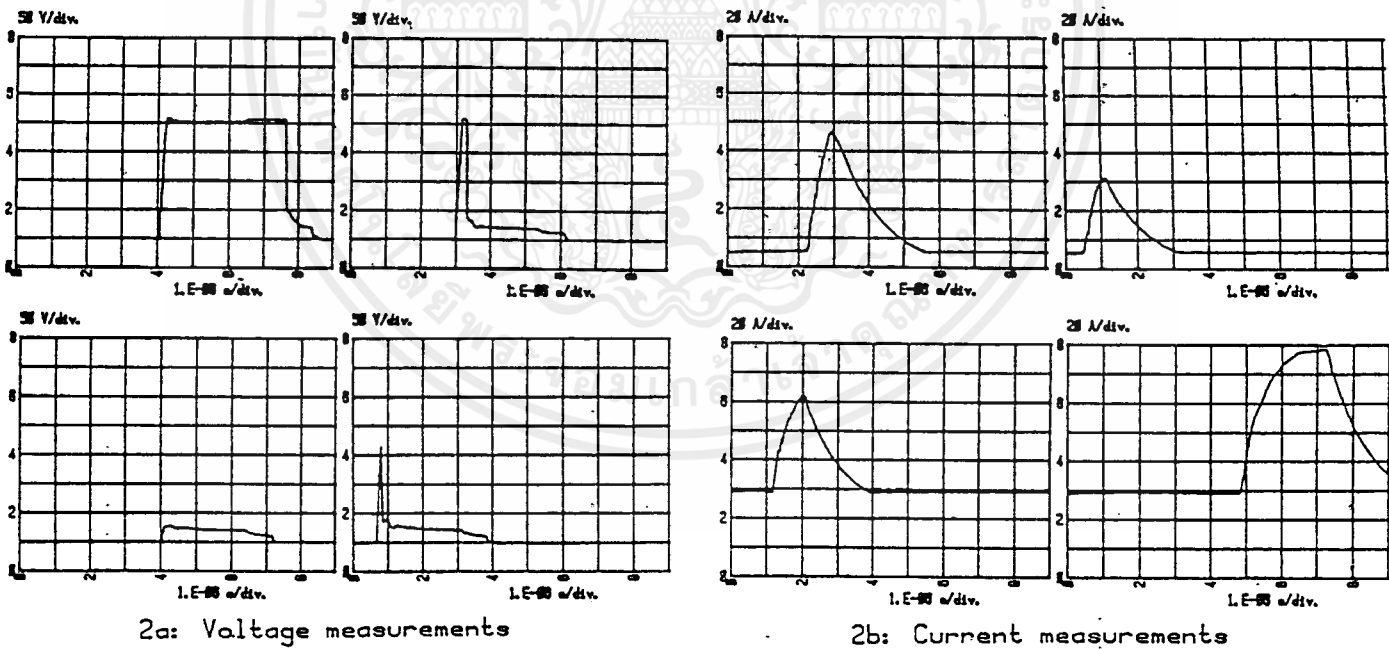
มีอัตราการสุมตัวอย่างทุก ๆ 10 MHz เป็นความถี่ที่เพียงพอสำหรับ EDM ข้อมูลยังคงอยู่หลังจากการตัด บทสรุปของ EDM-PD ที่ได้กล่าวมาแล้วและได้อธิบายการทำงานสำหรับเครื่อง deep-sinking และเครื่อง wire-cutting

สำหรับเครื่อง wire-cutting จะพิจารณา input ต่างๆ และ ประเภทของสัญญาณของ voltage และ current

สำหรับเครื่อง die-sinking ขึ้นกับเวลาการทำงานที่เปลี่ยนแปลงจริงทั้ง 15 ชนิด

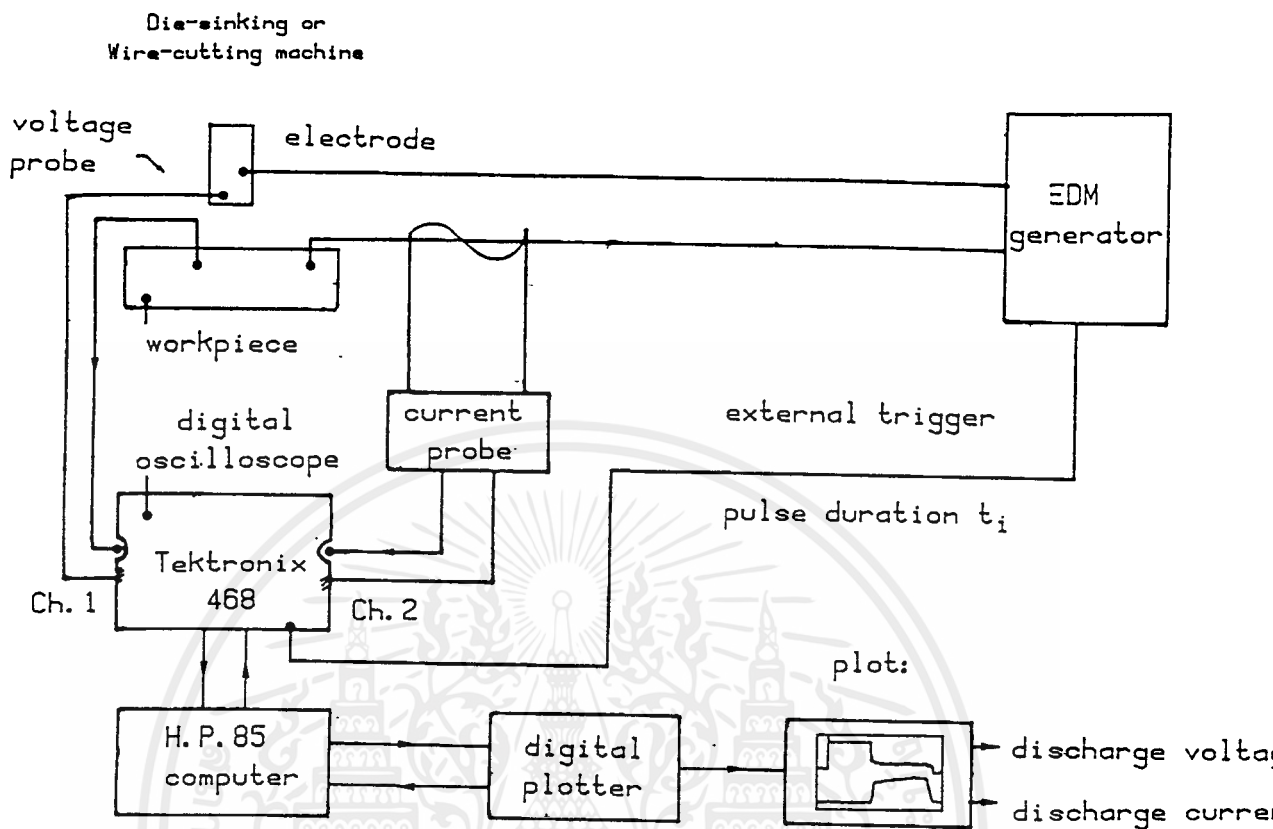


รูปที่ 1. การวิเคราะห์การวัดด้วยความถี่ 500 Mhz

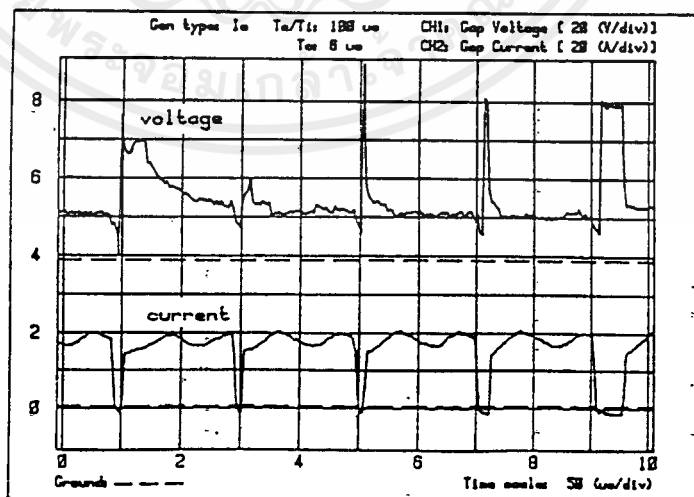


รูปที่ 2. การวิเคราะห์ชนิดของพัลส์ด้วยเครื่อง 7912 A/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

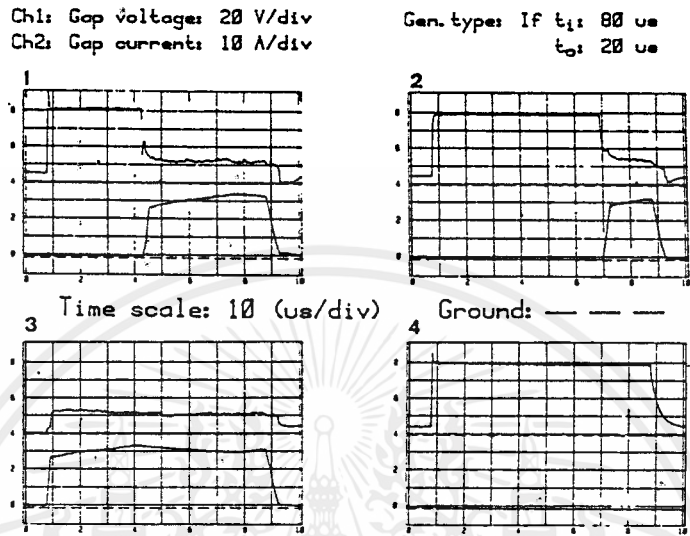


รูปที่ 3. การติดตั้งวงจรตรวจจับพัลส์

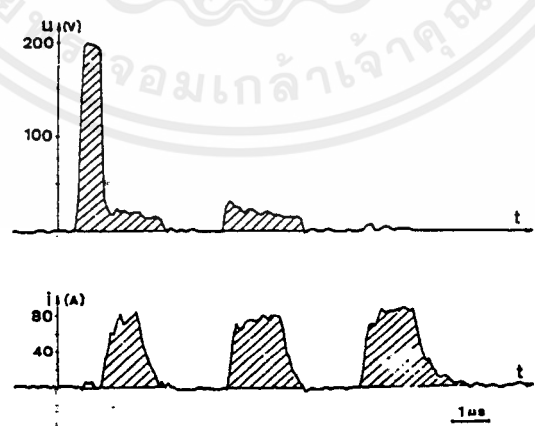


รูปที่ 4. การหาค่าพัลส์ต่อเนื่องในขบวนการ deep-sinking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

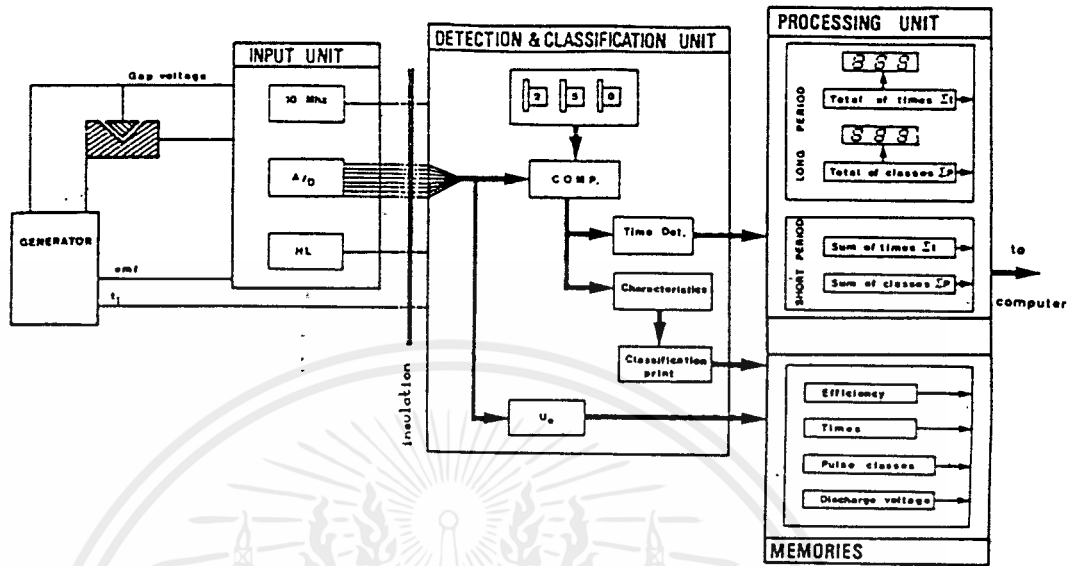


รูปที่ 5. การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน 4 แบบ  
 รูปบน: แสดง gap voltage รูปล่าง: แสดง current

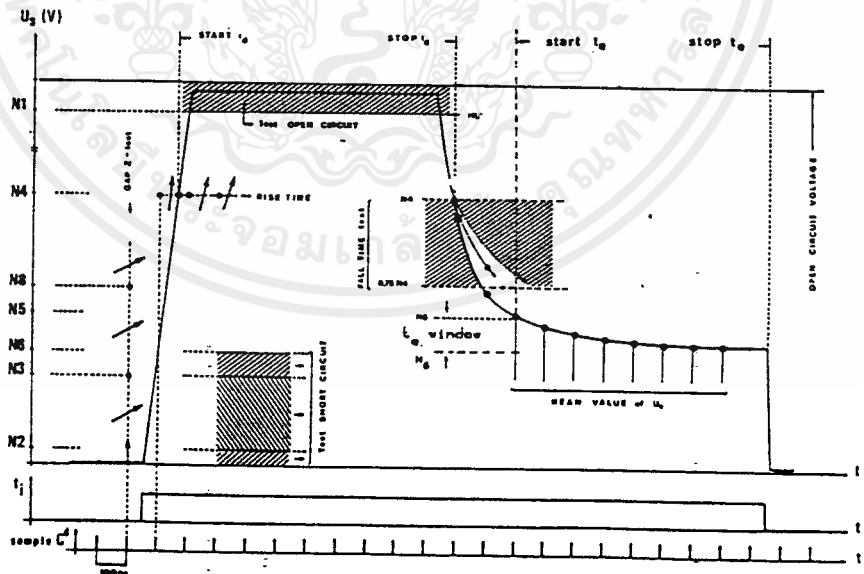


รูปที่ 6. ชนิดของพัลส์ที่เกิดขึ้นบนเครื่อง wire cutting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

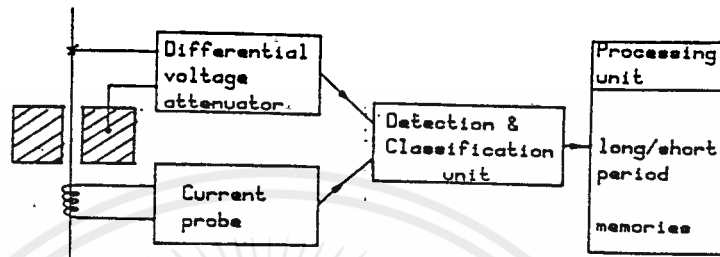


รูปที่ 7. การต่อวงจรแยกสัญญาณพัลส์ EDM สำหรับ deep-sinking

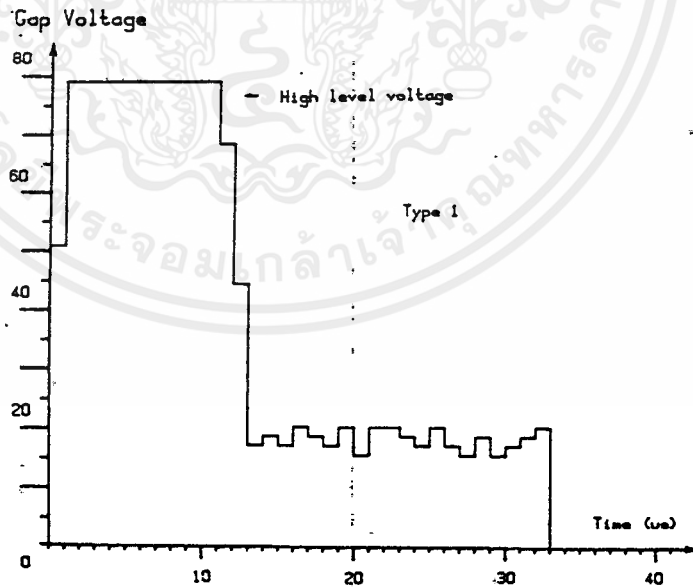


รูปที่ 8. พารามิเตอร์สำหรับการแยกสัญญาณ EDM พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

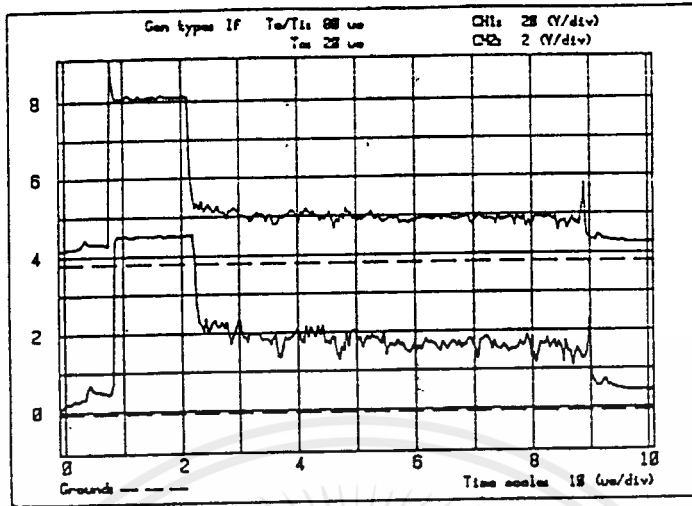


รูปที่ 9. ระบบการแยกสัญญาณสำหรับ wire-cutting



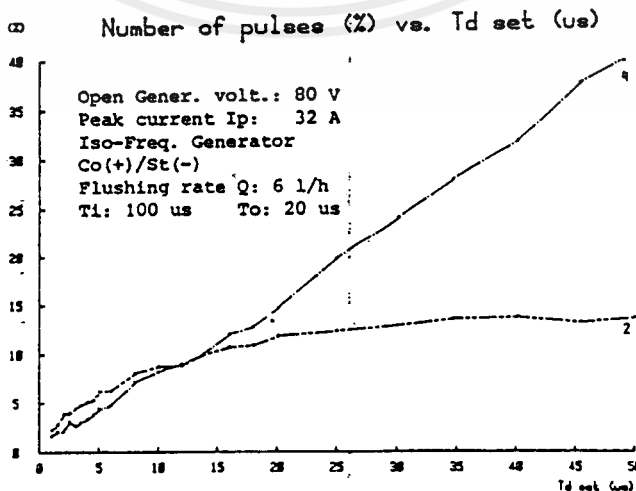
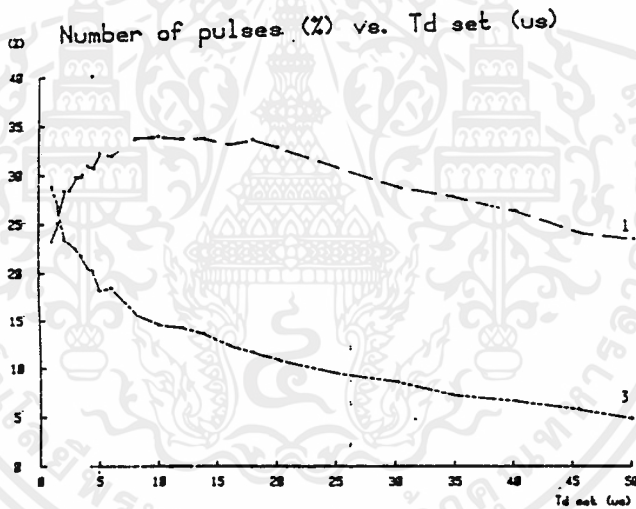
รูปที่ 10. การจำลอง Digital พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11. การสปาร์คของชนิดที่ 1

รูปบน: วัดที่ gap      รูปล่าง: การเปลี่ยน A/D เป็น D/A โดยเครื่อง EDM-PD



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 12. การหาค่าการเปลี่ยนแปลง vs. t<sub>d</sub> ref. ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 9

### การทดลองและผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาทดลองตั้งค่าตัวแปร ( parameter ) ที่เหมาะสมเพื่อหาค่าความหยาบ ( roughness ) ให้เหมาะกับการใช้งาน การทดลองจัดทำโดยการทำชิ้นงานให้มีขนาดมาตรฐานซึ่งมีขนาด  $6 \times 10 \times 85$  mm. ต่อจากนั้นก็จะนำชิ้นงานมาตัดโดยตั้งค่าตัวแปรต่างๆแล้วนำชิ้นงานที่ตัดแล้วมาหาค่าความหยาบ

#### ขั้นตอนการทำงาน

1. นำแท่งเหล็ก SKD 11 ขนาดพื้นที่หน้าตัด  $15 \times 15$  mm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นแท่งยาวมาทำการตัดให้ได้ความยาวประมาณ 90 mm เป็นจำนวน 20 ชิ้น โดยการใช้เลื่อยไฟฟ้าทำการตัด

2. นำแท่งเหล็กทั้ง 20 ชิ้นมาทำการไส เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กให้ใกล้เคียงขนาดของชิ้นงานสำหรับที่จะทำการทดลอง โดยเผื่อขนาดของชิ้นงานเล็กน้อย ( ประมาณ 1.5-2.0 mm )

2.1 ไสครั้งแรกให้มีพื้นที่หน้าตัด  $8 \times 15$  mm<sup>2</sup>

2.2 ไสครั้งที่สองให้มีพื้นที่หน้าตัด  $8 \times 12$  mm<sup>2</sup>

3. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 2. มาทำการเจียร เพื่อให้ผิวของชิ้นงานเรียบและได้ขนาดของพื้นที่หน้าตัดตามมาตรฐานของชิ้นงานทดลองคือ  $6 \times 10$  mm<sup>2</sup>

4. นำชิ้นงานที่ได้จากการเจียรมาทำการปรับขนาดความยาว โดยใช้เลื่อยและตะไบในการตกแต่งชิ้นงานจนขนาดชิ้นงานทดลองมีขนาดความยาวเท่ากับ 85 mm

5. นำเหล็กมาตรฐานทั้ง 20 ชิ้น ซึ่งจะมีขนาดประมาณ  $6 \times 10 \times 85$  มาทำการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มเท่าๆกันแล้ว

กลุ่มที่ 1 นำไปอบที่อุณหภูมิ  $1145^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำชิ้นงานจุ่มลงในน้ำมันที่ไว้ให้เย็นแล้วมาทำการอบที่อุณหภูมิ  $400^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 45 นาที

กลุ่มที่ 2 นำไปอบที่อุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในอากาศ

6. นำชิ้นงานมาตรฐานซึ่งผ่านขั้นตอนการเตรียมทั้ง 5 มาทำการตัดด้วยเครื่อง wire cut EDM โดยการผ่าครึ่งชิ้นงานตามยาวด้วยค่า parameter ต่างๆ ซึ่งจะได้ชิ้นงานทดลองมาตรฐานขนาดประมาณ  $3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$  ณ ค่า parameter ต่างๆตามที่ได้ทำการเซ็ทค่าเอาไว้โดยให้ค่า parameter ที่เราสนใจคือค่าของ IP มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ IP = 14-17 ส่วน parameter ตัวอื่นๆให้มีค่าคงที่ตามค่าต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IP = 14 - 17

P = 1

SV = 5

SF = 6

MA = 4

ON = 4

OFF = 14

WIRE SPEED = 1

TENSION = 5

7. นำชิ้นงานที่ได้ทำการตัดตามค่า parameter ต่างๆ มาทำการวัดค่า surface roughness หรือค่าความหยาบ-ละเอียดของผิว

8. นำผลการทดลองที่ได้มาทำการสร้างกราฟพื้นผิวโดยใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C เพื่อทำการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงาน

9. วิเคราะห์และสรุปผลการใช้ค่า parameter ต่างๆ ต่อความหยาบ-ละเอียดของผิวชิ้นงาน

**ผลการทดลองค่าการวัดความหยาบ-ละเอียดจากชิ้นงาน เหล็ก  
SKD 11 ที่ได้ทำการอบ Tempering มาแล้ว**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WORKPIECE NO. #1

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	17	14	1	5	6	24.0	1	60	5	13/11/92

( mm )	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	2.9718	2.7432	3.1240	2.9718	2.5654	3.0988	3.5000	3.0988	0.0000
	0.0000	0.0000	2.8448	2.4638	2.3876	2.6416	2.3876	2.4130	2.4384	2.7178	0.0000
	0.0000	0.0000	2.4638	2.5908	2.3876	2.3368	2.3622	2.3368	2.7432	2.3253	0.0000
	0.0000	0.0000	3.5000	2.5654	3.5000	2.6416	2.5654	2.6924	2.5928	2.5908	0.0000
	0.0000	0.0000	3.5000	3.0480	2.9718	2.8448	2.7940	3.0226	2.5654	3.5000	0.0000
	0.0000	0.0000	2.9972	3.5000	2.6672	2.6416	3.0480	2.5654	2.7688	2.6870	0.0000
	0.0000	0.0000	2.8194	2.7178	2.7940	2.7432	2.3876	3.5000	2.5654	2.7432	0.0000
	0.0000	0.0000	2.6670	2.8956	3.5000	2.6162	2.9464	2.6670	2.8956	2.8194	0.0000
	0.0000	0.0000	3.5000	2.9972	2.8194	2.8956	3.0480	3.5000	2.8956	2.9210	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

POSITION Y / X ( mm )

ROUGHNESS MAX = 3.5000 u m. MIN = 2.3253 u m. AVR = 2.8088 u m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WORKPIECE NO. #2

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	17	14	1	5	6	24.6	1	64	5	20/11/92
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.8448	2.5654	2.7432	2.3822	2.3876	2.7940	3.5000	2.6162	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.8448	2.8194	2.6924	2.8194	3.5000	2.7686	2.5908	2.6924	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.9210	2.6416	2.4892	2.5908	2.9210	2.6416	2.5908	2.5146	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.4130	2.5908	2.6416	2.6162	2.6416	2.2860	2.6416	2.3622	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.6162	2.5400	2.5146	2.8194	2.5146	2.6162	2.5908	2.3876	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.4892	2.5654	2.4638	2.6670	2.6416	2.3622	2.4892	2.4130	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.3114	2.3876	2.3622	2.4384	2.3114	2.4384	2.3622	2.7620	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.3114	2.5908	2.4638	2.5400	2.4384	2.5908	2.7432	2.3368	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.2606	2.7432	2.5400	2.4384	2.5146	2.3876	2.4130	2.0828	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

( mm )

10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

POSITION  
Y / X

0  
MAX = 3.5000 u m.

2

3

4

5

6

7

8

( mm )

AVR = 2.0828 u m.  
AVR = 2.5890 u m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WORKPIECE NO. #3

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	16	14	1	5	6	24.7	1	67	5	21/11/92
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	1.6764	1.4224	1.4478	1.6256	1.5240	1.6002	1.7018	1.7780	0.0000	0.0000
7	0.0000	1.4732	1.5240	1.4732	1.5240	1.5748	1.4224	1.4732	1.5240	0.0000	0.0000
6	0.0000	1.4224	1.3970	1.5494	1.5748	1.4732	1.6002	1.6764	1.5748	0.0000	0.0000
5	0.0000	1.4732	1.5748	1.5240	1.5748	1.8034	1.5240	1.4478	1.4986	0.0000	0.0000
4	0.0000	1.5748	1.6256	1.6570	1.6256	1.6510	1.6256	1.8288	1.6256	0.0000	0.0000
3	0.0000	1.9812	1.5240	1.6256	1.6764	1.7526	1.7018	1.7780	1.5240	0.0000	0.0000
2	0.0000	1.4732	1.6256	1.5748	1.7018	1.6256	1.7018	1.6256	1.6510	0.0000	0.0000
1	0.0000	1.4732	1.6510	1.4986	1.6256	1.7780	1.6510	1.9812	1.5748	0.0000	0.0000
0	0.0000	1.5240	1.5240	1.5240	1.7780	1.7526	1.5748	1.6510	1.5240	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

( mm )

POSITION  
Y / X  
ROUGHNESS

( mm )

7  
AVR = 1.6087 u m.

6

5  
MIN = 1.3970 u m.

4

3  
MAX = 1.9812 u m.

2

1

0

8

AVR = 1.6087 u m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



WORKPIECE NO. #5

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	15	14	1	5	6	25.1	1	61	5	30/11/92

(mm)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	1.4732	1.4478	1.6000	1.5240	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	1.3970	0.0000
0.0000	0.0000	1.3716	1.2700	1.4732	1.3462	1.4224	1.4224	1.4224	1.4224	1.4224	0.0000
0.0000	0.0000	1.2854	1.2700	1.1430	1.3716	1.2700	1.2700	1.2700	1.2700	1.2700	0.0000
0.0000	0.0000	1.2192	1.2192	1.2954	1.2192	1.2446	1.2446	1.2446	1.2446	1.2446	0.0000
0.0000	0.0000	1.1684	1.1430	1.2192	1.3462	1.1430	1.1430	1.1430	1.1430	1.1430	0.0000
0.0000	0.0000	1.1684	1.0160	1.1938	1.1176	1.0668	1.0668	1.0668	1.0668	1.0668	0.0000
0.0000	0.0000	1.0668	0.9906	1.0922	1.0160	1.0668	1.0668	1.0668	1.0668	1.0668	0.0000
0.0000	0.0000	1.3620	1.3208	1.4732	1.2446	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	1.2192	0.0000
0.0000	0.0000	1.4224	1.5716	1.3716	1.3716	1.4732	1.4732	1.4732	1.4732	1.4732	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

POSITION Y / X ROUGHNESS (mm)

0 1 2 3 4 5 6 7 8

MAX = 1.6000 u m. MIN = 0.9906 u m. AVR = 1.2683 u m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WORKPIECE NO. #6

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	15	14	1	5	6	24.5	I	64	5	7/12/82
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	1.1684	1.2192	1.1938	1.0668	1.1684	1.1176	1.0922	1.1430	1.2700	0.0000
0.0000	0.0000	1.0992	1.0414	1.1430	1.0668	1.1176	1.0414	1.9360	1.2192	1.2182	0.0000
0.0000	0.0000	1.0474	1.0414	1.0668	1.2192	1.1176	1.1176	1.1430	1.3462	1.4478	0.0000
0.0000	0.0000	1.1684	1.1684	1.1938	1.2446	1.1938	1.2446	1.2192	1.2446	1.3208	0.0000
0.0000	0.0000	1.1938	1.1430	1.1176	1.1430	1.3208	1.2954	1.2446	1.2954	1.2954	0.0000
0.0000	0.0000	1.3970	1.3462	1.3970	1.1938	1.2192	1.2954	1.2446	1.2954	1.2954	0.0000
0.0000	0.0000	1.3462	1.2954	1.2954	1.3208	1.2954	1.1176	1.2954	1.3716	1.3462	0.0000
0.0000	0.0000	1.4732	1.1684	1.3208	1.2954	1.2192	1.2954	1.3208	1.4424	1.3716	0.0000
0.0000	0.0000	1.3462	1.3716	1.2192	1.3208	1.3208	1.3970	1.4732	1.3462	1.3970	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.04000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

( mm )

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

0

POSITION

Y / X

ROUGHNESS

MAX = 1.9380 u m.

2

3

4

5

6

7

8

AVR =

1.2517 u m.

( mm )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WORKPIECE NO. # 7

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	14	14	1	5	6	24.3	1	69	5	11/12/82

( mm )	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	1.3716	1.1938	1.2446	1.1648	1.3716	1.3970	1.2954	1.5702	1.4658	0.0000
0.0000	0.0000	1.3462	1.2921	1.2446	1.1371	1.1938	1.1938	1.1938	1.4584	1.4582	0.0000
0.0000	0.0000	1.1684	1.2700	1.1938	1.1684	1.1240	1.1430	0.9781	1.2910	1.2580	0.0000
0.0000	0.0000	1.1430	1.2192	1.1176	1.1430	1.1684	1.0668	1.1120	1.3790	1.2446	0.0000
0.0000	0.0000	1.1938	1.1430	1.2192	1.1025	1.1176	1.1684	1.2446	1.2108	1.1548	0.0000
0.0000	0.0000	1.3208	1.2446	1.2446	1.0658	1.2192	1.1430	1.2192	1.1684	1.2954	0.0000
0.0000	0.0000	1.4562	1.2954	1.1176	1.1684	1.2446	0.9916	1.3872	1.2446	1.1684	0.0000
0.0000	0.0000	1.2904	1.3206	1.4478	1.2446	1.2256	1.2648	1.3784	1.2876	1.1397	0.0000
0.0000	0.0000	1.3970	1.2546	1.3970	1.3716	1.4611	1.4725	1.3945	1.1684	1.3462	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

POSITION Y/X ROUGHNESS MAX = 1.5702 u m. MIN = 0.9781 u m. AVR = 1.2466 u m. ( mm )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**WORKPIECE NO. #8**

ON	OFF	IP	MA	P	SV	SF	TEMP.	WIRE SPEED	HUMIDITY	TENSION	DATE
4	14	14	14	1	5	6	24.8	1	63	5	16/12/82

( mm )

10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

POSITION

Y / X

ROUGHNESS

MAX = 1.6233 u m.

2

3

4

5

6

7

8

AVR = 1.2485 u m.

( mm )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ON หมายถึง ช่วงเวลาที่โวลต์เตจถูกป้อนเข้าสู่ขั้ว electrode หรือช่วงเวลา กระแสการสปาร์คไหล มีหน่วยเป็น ไมโครวินาที ( usec )

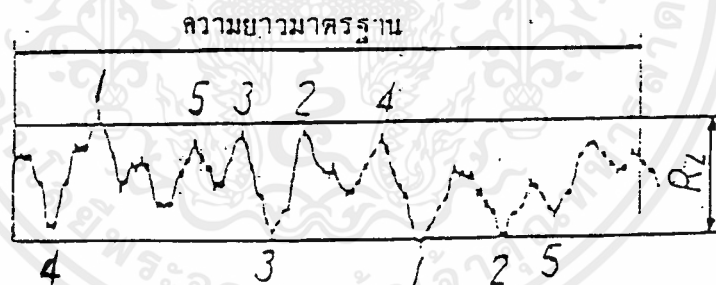
ค่า OFF หมายถึง ช่วงเวลาดังแต่การสปาร์คเสร็จจนถึงเวลาที่ voltage ถูกป้อน เข้าสู่ electrode อีกครั้งหนึ่ง มีหน่วยเป็น ไมโครวินาที ( usec )

ค่า IP หมายถึง ค่ากระแสที่ไหลผ่านเส้นลวดเพื่อใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน มี หน่วยเป็น แอมแปร์ ( A )

ค่า IP และค่า ON จะเป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค ส่วนค่า OFF จะ เป็น parameter ในการควบคุมพลังงานในการสปาร์ค

### หมายเหตุ

การทดลองนี้เป็นการหาค่าความหยาบที่ใช้วิธีการแบบ ten point height of irregularities, (  $R_z$  ) โดยค่า  $R_z$  = ค่าผลเฉลี่ยของค่าสมบูรณ์ของ height profile peaks 5 ค่า และ deepest profile valley 5 ค่า ภายในช่วงความยาวมาตรฐาน



$$R_z = (1 + 2 + 3 + 4 + 5) - (6 + 7 + 8 + 9 + 10)$$

ตัวอย่าง PROGRAM ภาษา C ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหยาบ-  
ละเอียดของพื้นผิวชิ้นงานที่ได้จากการตัด ณ ค่า PARAMETER ต่าง ๆ

```

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

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

#include <graphics.h>

#define ESC Ox1b /* Define the escape key */
#define TRUE 1 /* Define some handy constants */
#define FALSE 0 /* Define some handy constants */
#define PI 3.141592654 /* Define a value for PI */

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

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

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

getpalette( &palette ); /* Read the palette from board */
MaxColors = getmaxcolor() + 1; /* Read maximum number of colors*/

MaxX = getmaxx();
MaxY = getmaxy(); /* Read size of screen */

getaspectratio( &xasp, &yasp ); /* read the hardware aspect */
AspectRatio = (double)xasp / (double)yasp; /* Get correction factor */
}

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

void highlite(int left,int top,int Color,char *topics)
{
    struct textsettingstype txtinfo;
    int height,width;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

gettextsettings(&txtinfo);
height = textheight(topics);
width = textwidth(topics);
if (txtinfo.font) height++;
setfillstyle(SOLID_FILL,Color);
settextjustify(LEFT_TEXT,CENTER_TEXT);
bar(left,top,left+width+14,top+height+10);
setcolor(BLACK);
rectangle(left+3,top+3,left+width+11,top+height+7);
setcolor(Color+8);
line(left+3,top+3,left+width+11,top+3);
line(left+3,top+height+6,left+3,top+3);
setcolor(BLACK);
if (txtinfo.font) outtextxy(left+10,top+3*height/4,topics);
else outtextxy(left+8,top+height+2,topics);
}

/*
/* PAUSE: Pause until the user enters a keystroke. If the
/* key is an ESC, then exit program, else simply return.
/*
void Pause(void)
{
static char msg[] =
"          Esc aborts or press a key...";
int c;

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

c = getch(); /* Read a character from kbd */

if( ESC == c ){ /* Does user wish to leave? */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

closegraph(); /* Change to text mode */
exit( 1 ); /* Return to OS */
}

if( 0 == c ){ /* Did use hit a non-ASCII key? */
    c = getch(); /* Read scan code for keyboard */
}

cleardevice(); /* Clear the screen */

}

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

void MainWindow( char *header )
{
    int height;

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

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

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

```

```

void StatusLine( char *msg )
{
    setviewport( 0, 0, MaxX, MaxY, 1 ); /* Open port to full screen */
    changetextstyle( DEFAULT_FONT, HORIZ_DIR, 1 );
    highlite(5,457,LIGHTGRAY,msg);
    setcolor(BLACK);
    line(4,457,MaxX-4,457);
    setviewport( 1, 1, MaxX-1, MaxY-1, 1 );
}
/*
/*      DRAWBORDER:      */
/*
/*
/*

```

```

void DrawBorder(int left,int top,int right,int bottom,char *topics)
{
    int width;
    setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
    bar(0,0,MaxX,MaxY);
    setfillstyle(SOLID_FILL,LIGHTGRAY);
    bar(left+1,top+1,right-1,bottom-1);
    setcolor(BLACK);
    rectangle(left,top,right,bottom);
    rectangle(left+3,top+3,right-3,bottom-3);
    rectangle(left,top+22,right,bottom-22);
    rectangle(left+24,top,right-24,bottom);
    setfillstyle(SOLID_FILL,DARKGRAY);

```

เอกสารนี้ bar(left+7,top+11,left+22,top+14); ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

bar(right-20,top+11,right-5,top+14);
rectangle(left+6,top+10,left+21,top+13);
rectangle(right-21,top+10,right-6,top+13);
setfillstyle(SOLID_FILL,WHITE);
bar(left+4,top+23,right-4,bottom-4);
bar(left+7,top+11,left+20,top+11);
bar(right-20,top+11,right-7,top+11);
setfillstyle(SOLID_FILL,BLUE);
bar(left+24,top+4,right-24,top+22);
setcolor(WHITE);
settextstyle(DEFAULT_FONT,HORIZ_DIR,16);
settextjustify( LEFT_TEXT, TOP_TEXT );
width = (right-left-textwidth(topics))/2 + 5;
outtextxy(width,top+10,topics);
}

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

    graphresult(); /* clear error code */
    settextstyle(font, direction, charsize);
    ErrorCode = graphresult(); /* check result */
    if( ErrorCode != grOk ){ /* if error occurred */
        closegraph();
        printf(" Graphics System Error: %s\n", grapherrormsg( ErrorCode ) );
        exit( 1 );
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่: วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}

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

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

    va_start( argptr, format ); /* Initialize va_ functions */

    cnt = vsprintf( str, fmt, argptr ); /* prints string to buffer */
    outtextxy( xloc, yloc, str ); /* Send string in graphics mode */
    yloc += textheight( "H" ) + 2; /* Advance to next line */

    va_end( argptr ); /* Close va_ functions */

    return( cnt ); /* Return the conversion count */
}

void Graph(void)
{
    int n,m,o;
    int workpiece;
    float Y_try;
    float X_CoIS,X_CoIE;
    float Y_CoIS,Y_CoIE;
    float X_Co,X_CoSub;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float Y_Co,Y_CoSub;
float V_Angle1,V_Angle2;
int X_Plot[13][13],Y_Plot[13][13];
int Z_Plot[13][13];
int start,end;
int XY_Plot[169];
int X_Ref,Y_Ref;
int SX_Ref,SY_Ref;
int ON[8] = { 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4 };
int OFF[8] = { 14,14,14,14,14,14,14,14 };
int IP[8] = { 17,17,16,16,15,15,14,14 };
int MA[8] = { 14,14,14,14,14,14,14,14 };
int P[8] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1 };
int SV[8] = { 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5 };
int SF[8] = { 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 6 };
float temp[8] = { 24.0,24.6,24.7,24.6,25.1,24.5,24.3,24.8 };
int humidity[8] = { 60,64,67,65,61,64,69,63 };
int Wire_Speed = 1;
int Tension = 5;
float Rmax[8],Rmin[8];
char *Date[] = {
"NOVEMBER 13,1992",
"NOVEMBER 20,1992",
"NOVEMBER 21,1992",
"NOVEMBER 25,1992",
"NOVEMBER 30,1992",
"DECEMBER 7,1992",
"DECEMBER 11,1992",
"DECEMBER 16,1992"
};
float Ra[8][13][13] = {

```

/\*WORKPIECE No.1\*/

เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวิไลที่วิศวกรเขียนเพื่อใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเอกสารฉบับนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## /\*WORKPIECE No.7\*/

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3716,1.1938,1.2446,1.1648,1.3716,1.3970,1.2954,  
 1.1684,1.3462,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3462,1.3970,1.2446,1.3716,1.1938,1.1938,1.1938,  
 1.4986,1.1397,0.0000,0.0000,  
 0.00000,0.000,1.1684,1.2700,1.1938,1.1684,1.1684,1.1430,1.2700,  
 1.2446,1.1684,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.1430,1.2192,1.1176,1.1430,1.1684,1.0668,1.2700,  
 1.1684,1.2954,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.1938,1.1430,1.2192,1.1938,1.1176,1.1684,1.2446,  
 1.3208,1.3208,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3208,1.2446,1.2446,1.0668,1.2192,1.1430,1.2192,  
 1.3970,1.2446,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.6840,1.2954,1.1176,1.1684,1.2446,1.1684,1.5240,  
 1.6510,1.3970,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.2904,1.3208,1.4478,1.2446,1.3208,1.3716,1.8700,  
 1.7526,1.5748,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3970,1.4732,1.3970,1.3716,1.5494,1.6510,1.8034,  
 1.8700,1.8700,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

## /\*WORKPIECE No.8\*/

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8194,2.6924,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.9210,2.6416,2.4892,2.5908,2.9210,2.6416,2.5908,  
 2.5654,2.5146,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.4130,2.5908,2.6416,2.6162,2.6416,2.2860,2.6416,  
 2.3622,2.6670,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.6162,2.5400,2.5146,2.8194,2.5146,2.6162,2.5908,  
 2.3876,2.3876,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.4892,2.5654,2.4638,2.6670,2.6416,2.3622,2.4892,  
 2.6670,2.4130,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.3114,2.3876,2.3622,2.4384,2.3114,2.4384,2.3622,  
 2.7940,2.7620,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.3114,2.5908,2.4638,2.5400,2.4384,2.5908,2.7432,  
 2.3368,2.3876,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.2606,2.7432,2.5400,2.4384,2.5146,2.3876,2.4130,  
 2.0828,2.4130,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

**/\*WORKPIECE No.3\*/**

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.6764,1.4224,1.4478,1.6256,1.5240,1.6002,1.7018,  
 1.7780,1.7018,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4732,1.5240,1.4732,1.5240,1.5748,1.4224,1.4732,  
 1.5240,1.6002,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4224,1.3970,1.5494,1.5748,1.4732,1.6002,1.6764,  
 1.5748,1.5748,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4732,1.5748,1.5240,1.5748,1.8034,1.5240,1.4478,  
 1.4986,1.4732,0.0000,0.0000,

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0000,0.0000,1.5748,1.6256,1.6570,1.6256,1.6510,1.6256,1.8288,  
 1.6256,1.7780,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.9812,1.5240,1.6256,1.6764,1.7526,1.7018,1.7780,  
 1.5240,1.6764,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4732,1.6256,1.5748,1.7018,1.6256,1.7018,1.6256,  
 1.6510,1.6764,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4732,1.6510,1.4986,1.6256,1.7780,1.6510,1.9812,  
 1.5748,1.7526,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.5240,1.5240,1.5240,1.7780,1.7526,1.5748,1.6510,  
 1.5240,1.7780,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

## /\*WORKPIECE No.4\*/

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3970,1.5748,1.5748,1.6002,1.5748,1.5748,1.5748,  
 1.5748,1.5240,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4986,1.5748,1.5748,1.4986,1.5748,1.6002,1.5748,  
 1.5748,1.0062,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.5224,1.5748,1.6256,1.6764,1.6510,1.4732,1.6510,  
 1.5748,1.5494,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.5748,1.6510,1.7780,1.7272,1.5748,1.6764,1.6510,  
 1.7526,1.5494,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.7272,1.7018,1.7272,2.0574,1.6256,1.6764,1.6002,  
 1.6002,1.7272,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.5748,1.8542,1.6002,1.5748,1.7018,1.6256,1.6002,  
 1.9304,1.5748,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.5748,1.7272,1.5748,1.7272,1.6764,1.6510,1.7018,รค้ำ

1.8034,1.5748,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.8034,1.6510,1.6510,1.6510,1.6256,1.4732,1.3970,  
 1.7526,1.6764,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.7018,1.3034,1.9304,1.8288,1.7018,2.1000,2.1000,  
 2.1000,2.1000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

/\*WORKPIECE No .5\*/

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4732,1.4478,1.6000,1.5240,1.3970,1.3970,1.3970,  
 1.4986,1.4986,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3716,1.2700,1.4732,1.3462,1.4224,1.4478,1.5240,  
 1.3208,1.3970,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.2954,1.2700,1.1430,1.3716,1.2700,1.3462,1.4986,  
 1.3970,1.1430,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.2192,1.2192,1.2954,1.2192,1.2446,1.1684,1.4224,  
 1.3462,1.4732,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.1684,1.1430,1.2192,1.3462,1.1430,1.2446,1.1938,  
 1.1397,1.4224,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.1684,1.0160,1.1938,1.1176,1.0668,1.0668,1.2700,  
 1.3716,1.5748,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.0668,0.9906,1.0922,1.0160,1.0668,1.1430,1.1430,  
 1.4478,1.3208,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.3462,1.3208,1.4732,1.2446,1.2192,1.6000,1.2954,  
 1.4224,1.5240,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,1.4224,1.5716,1.3716,1.3716,1.4732,1.2954,1.4478,  
 1.3970,1.3970,0.0000,0.0000,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000.

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

**/\*WORKPIECE No.6\* /**

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.1684,1.2192,1.1938,1.0668,1.1684,1.1176,1.0922,  
1.1430,1.2700,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.0992,1.0414,1.1430,1.0668,1.1176,1.0414,1.9380,  
1.2192,1.2192,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.0474,1.0414,1.0668,1.2192,1.1176,1.1176,1.1430,  
1.3462,1.4478,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.1684,1.1684,1.1938,1.2446,1.1938,1.2446,1.2192,  
1.2446,1.3208,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.1938,1.1430,1.1176,1.1430,1.3208,1.2954,1.2446,  
1.2954,1.2954,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.3970,1.3462,1.3970,1.1938,1.2192,1.2954,1.2446,  
1.2954,1.2954,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.3462,1.2954,1.2954,1.3208,1.2954,1.1176,1.2954,  
1.3716,1.3462,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.4732,1.1684,1.3208,1.2954,1.2192,1.2954,1.3208,  
1.4224,1.3716,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,1.3462,1.3716,1.2192,1.3208,1.3208,1.3970,1.4732,  
1.3462,1.3970,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.9718,2.3876,2.7432,3.1240,2.9718,2.5654,3.0988,  
 3.5000,3.0988,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.8448,2.3622,2.4638,2.3876,2.6416,2.3876,2.4130,  
 2.4384,2.7178,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.4638,2.5908,2.5400,2.3876,2.3368,2.3622,2.3368,  
 2.7432,2.3253,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,3.5000,2.5654,2.5654,3.5000,2.6416,2.5654,2.6924,  
 2.5928,2.5908,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,3.5000,3.0480,2.7686,2.9718,2.8448,2.7940,3.0226,  
 2.5654,3.5000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.9972,3.5000,2.8194,2.6672,2.6416,3.0480,2.5654,  
 2.7686,2.6670,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.8194,2.7178,2.8194,2.7940,2.7432,2.3876,3.5000,  
 2.5654,2.7432,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.6670,2.8956,2.7178,3.5000,2.6162,2.9464,2.6670,  
 2.8956,2.8194,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,3.5000,2.9972,2.9972,2.8194,2.8956,3.0480,3.5000,  
 2.8956,2.9210,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,

**/\*WORKPIECE No.2\*/**

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,  
 0.0000,0.0000,2.8448,2.5654,2.7432,2.3622,2.3876,2.7940,3.5000,  
 3.5000,2.6162,0.0000,0.0000,

0.0000,0.0000,2.8448,2.8194,2.6924,2.8194,3.5000,2.7686,2.5908,

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.4732,1.2700,1.3462,1.4224,1.5494,1.5494,1.4480,
1.2700,1.7018,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.2904,1.1684,1.4224,1.4732,1.5748,1.3716,1.3716,
1.2192,1.7526,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.3716,1.1760,1.2700,1.2192,1.2192,1.3208,1.5240,
1.4224,1.4478,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.2954,1.1684,1.1684,1.2446,1.3402,1.2446,1.2700,
1.2954,1.4732,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.2700,1.1397,1.1430,1.2700,1.2446,1.2446,1.1684,
1.3716,1.5240,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.2446,1.1430,1.2192,1.2192,1.4478,1.4732,1.1684,
1.3462,1.5748,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.2904,1.1430,1.1684,1.3208,1.5240,1.3716,1.2954,
1.4478,1.6510,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.3970,1.2192,1.2700,1.6510,1.4478,1.3760,1.1938,
1.5240,1.6256,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,1.3970,1.2954,1.4478,1.4224,1.4732,1.5240,1.3208,
1.3970,1.5494,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
0.0000,0.0000,0.0000,0.0000,
};
workpiece = 0;
do {
MainWindow("Surface Graphics Plotting");
    V_Angle1 = tan(23*PI/180);
    V_Angle2 = tan(60*PI/180);
    X_Ref = 300;
    Y_Ref = MaxY-100;
    for(m=0;m<13;m++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
X_Co = X_Ref - (8*m);
Y_Co = Y_Ref - (8*m*V_Angle1);
for(n=0;n<13;n++)
{
X_CoSub = X_Co+(10*n);
Y_CoSub = Y_Co-(5*n*V_Angle2);
X_Plot[m][n] = X_CoSub;
Y_Plot[m][n] = Y_CoSub;
Z_Plot[m][n] = Y_Plot[m][n]-ceil(Ra[workpiece][m][n]*10);
}
}
/*-----*/
/*Graph A*/
setcolor(BLUE);
for(m=0;m<=11;m++)
for(n=0;n<=11;n++)
{
line(X_Plot[m][n],Z_Plot[m][n],X_Plot[m+1][n],Z_Plot[m+1][n]);
line(X_Plot[m][n],Z_Plot[m][n],X_Plot[m][n+1],Z_Plot[m][n+1]);
line(X_Plot[m][12],Z_Plot[m][12],X_Plot[m+1][12],Z_Plot[m+1][12]);
line(X_Plot[12][m],Z_Plot[12][m],X_Plot[12][m+1],Z_Plot[12][m+1]);
}
line(X_Ref-110,(Y_Ref-110*V_Angle1),X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1));
line(X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1),X_Ref-122,(Y_Ref-122*V_Angle1)-
30);
line(X_Ref-110,(Y_Ref-110*V_Angle1)-30,X_Ref-122,(Y_Ref-
122*V_Angle1)-30);
outtextxy(X_Ref-106,Y_Ref-50,"0");
outtextxy(X_Ref-106,Y_Ref-80,"3");
/*-----*/
/*-----*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## /\*Graph B \*/

```

line(X_Ref-120,Y_Ref+60,X_Ref-105,Y_Ref+60);
line(X_Ref-120,Y_Ref+60,X_Ref-120,Y_Ref+30);
line(X_Ref-120,Y_Ref+30,X_Ref-105,Y_Ref+30);
outtextxy(X_Ref-95,Y_Ref+57,"0");
outtextxy(X_Ref-95,Y_Ref+27,"3");
SX_Ref = X_Ref - 70;
SY_Ref = Y_Ref + 60;
for(m=0;m<12;m++)
  for(n=0;n<12;n++)
    {
      start = ceil(Ra[workpiece][m][n]*10);
      end   = ceil(Ra[workpiece][m][n+1]*10);
      line(SX_Ref+n*10,SY_Ref-start,(SX_Ref+(n+1)*10),SY_Ref-end);
    }
/*-----*/
gprintf(20,14,"No.%d ",workpiece+1);
rectangle(4,11,MaxX-6,23);
rectangle(4,11,80,23);
gprintf(100,14," 1 st cut");
rectangle(225,11,440,23);
rectangle(255,25,450,38);
gprintf(20,28,"DATE : %s",Date[workpiece]);
gprintf(MaxX-340,28,"Temp.: %2.1f C",temp[workpiece]);
gprintf(490,28,"Humidity: %2d %",humidity[workpiece]);
rectangle(4,25,MaxX-6,38);
setcolor(RED);
gprintf(22,43,"ON  OFF  IP  MA  P  SV  SF  WIRE SPEED
TENSION");
gprintf(25,53,"%d",ON[workpiece]);
gprintf(81,53,"%d",OFF[workpiece]);
gprintf(140,53,"%d",IP[workpiece]);
gprintf(197,53,"%d",MA[workpiece]);

```

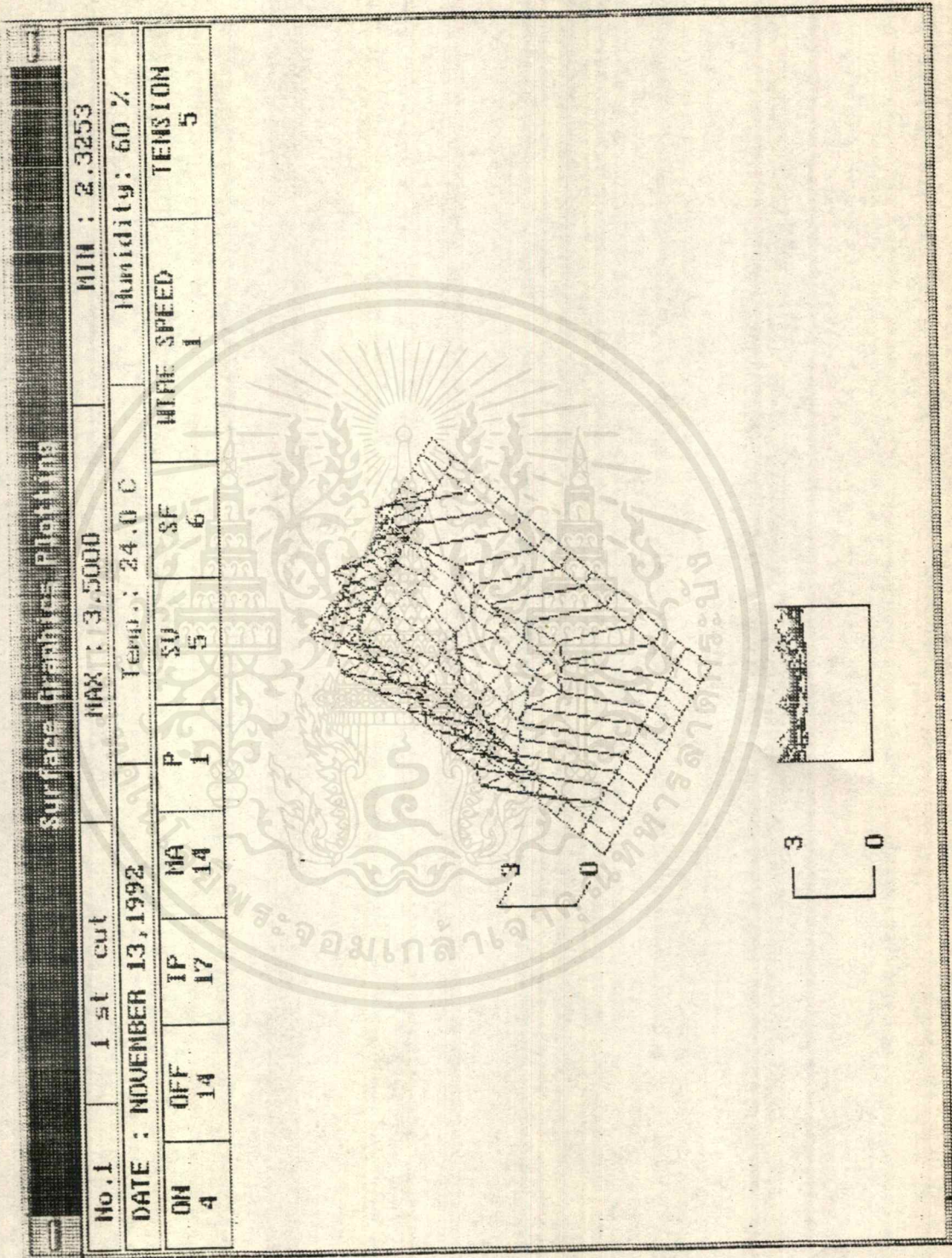
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

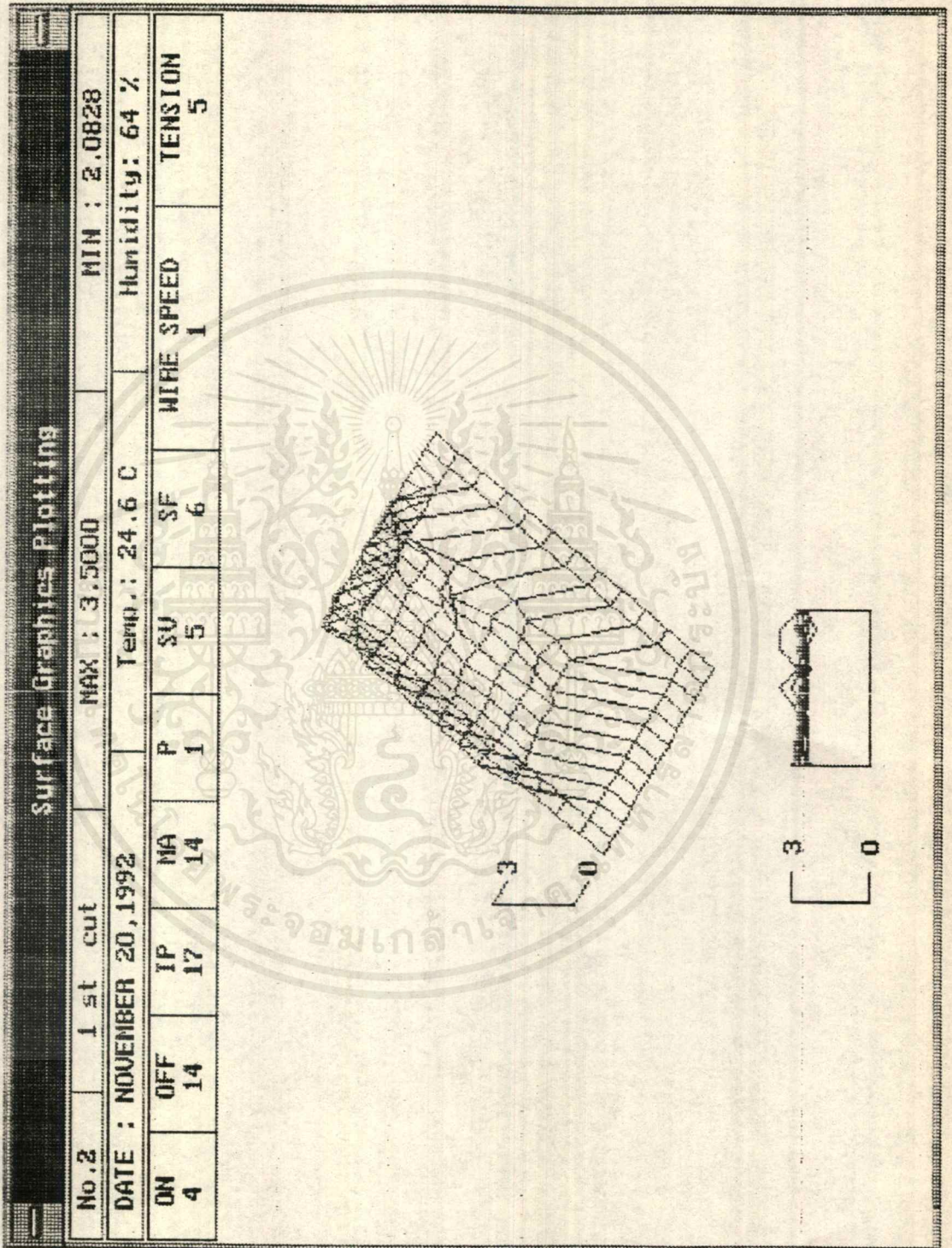
gprintf(253,53,"%d",P[workpiece]);
gprintf(314,53,"%d",SV[workpiece]);
gprintf(377,53,"%d",SF[workpiece]);
gprintf(468,53,"%d",Wire_Speed);
gprintf(583,53,"%d",Tension);
rectangle(4,40,MaxX-6,65);
line(60,40,60,65);
line(120,40,120,65);
line(175,40,175,65);
line(230,40,230,65);
line(285,40,285,65);
line(350,40,350,65);
line(410,40,410,65);
line(535,40,535,65);
Rmax[workpiece]=0.0;
Rmin[workpiece]=10000.0;
for(m=2;m<11;m++)
  for(n=2;n<11;n++)
  {
    if(Rmax[workpiece]<=Ra[workpiece][m][n]) Rmax[workpiece] =
Ra[workpiece][m][n];
    if(Rmin[workpiece]>=Ra[workpiece][m][n]) Rmin[workpiece] =
Ra[workpiece][m][n];
  }
gprintf(280,14,"MAX : %2.4f",Rmax[workpiece]);
gprintf(500,14,"MIN : %2.4f",Rmin[workpiece]);
workpiece++;
if(workpiece>7) workpiece = 0;
}while( getch() != ESC);
}

```

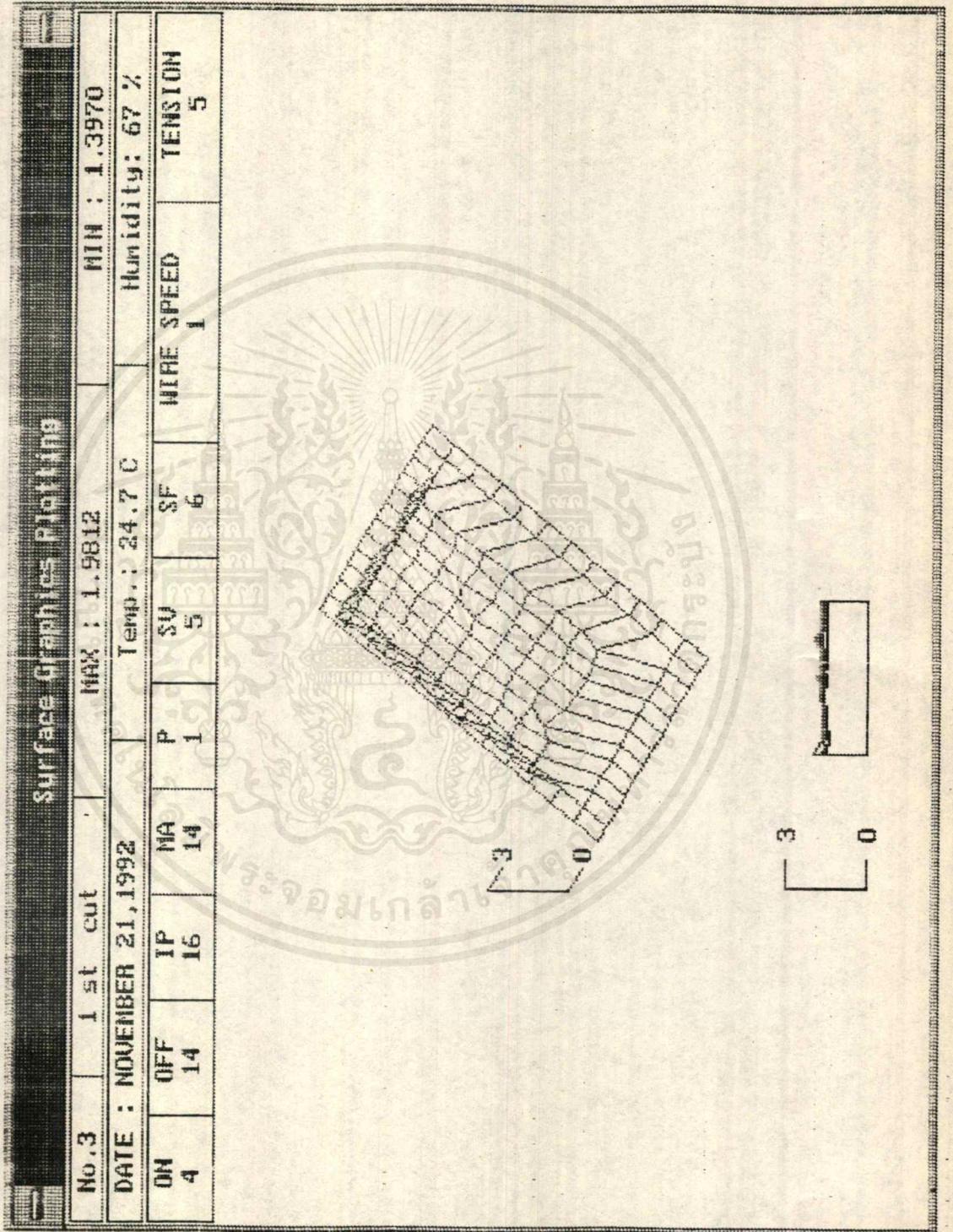
ภาพพื้นผิว ( surface roughness ) ที่ได้ทำการทดลองตัด ณ ค่า parameter ต่าง ๆ และนำมาแสดงโดยการ plot จากโปรแกรม tgraph.exe ซึ่งเขียนโดยใช้ภาษา c



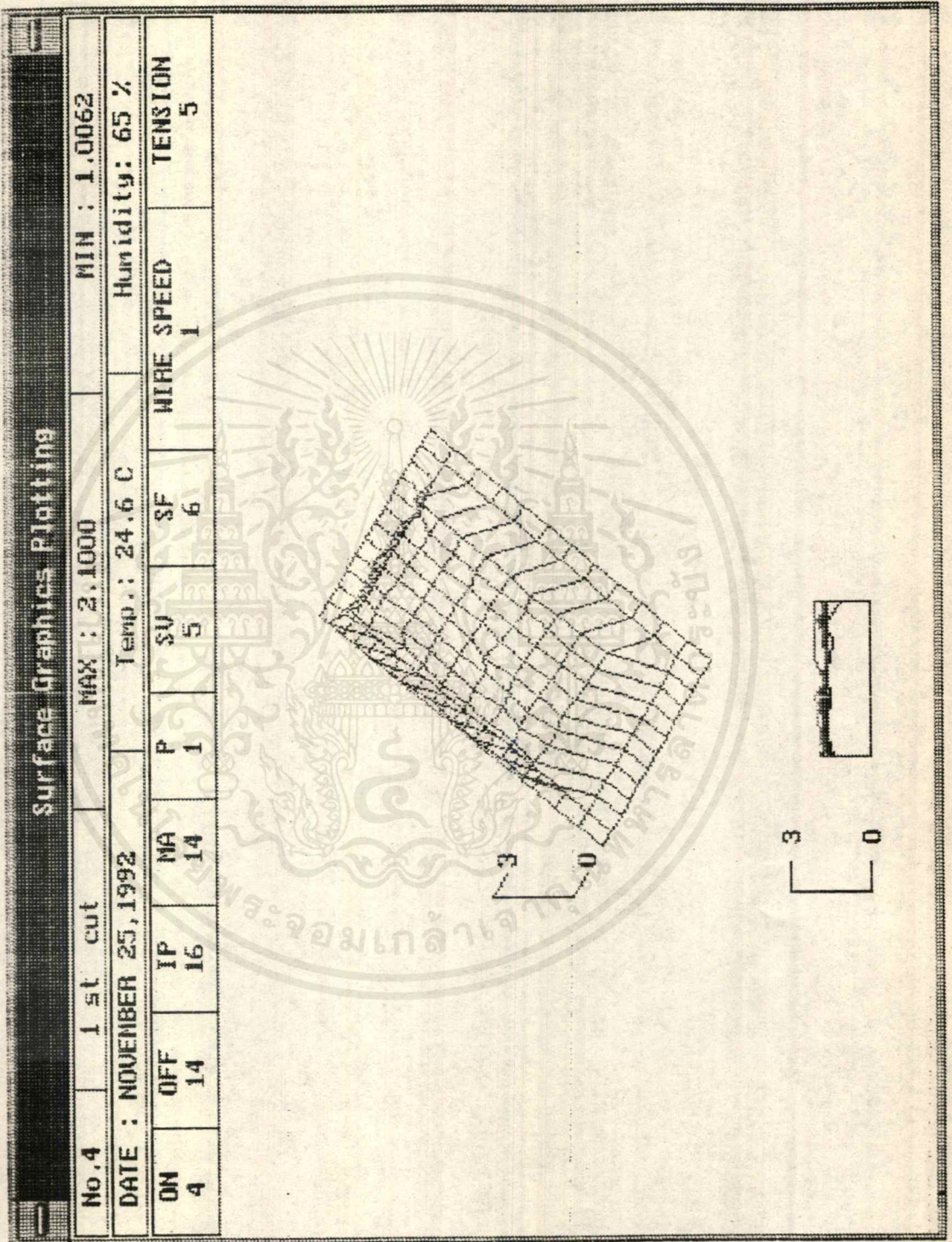
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



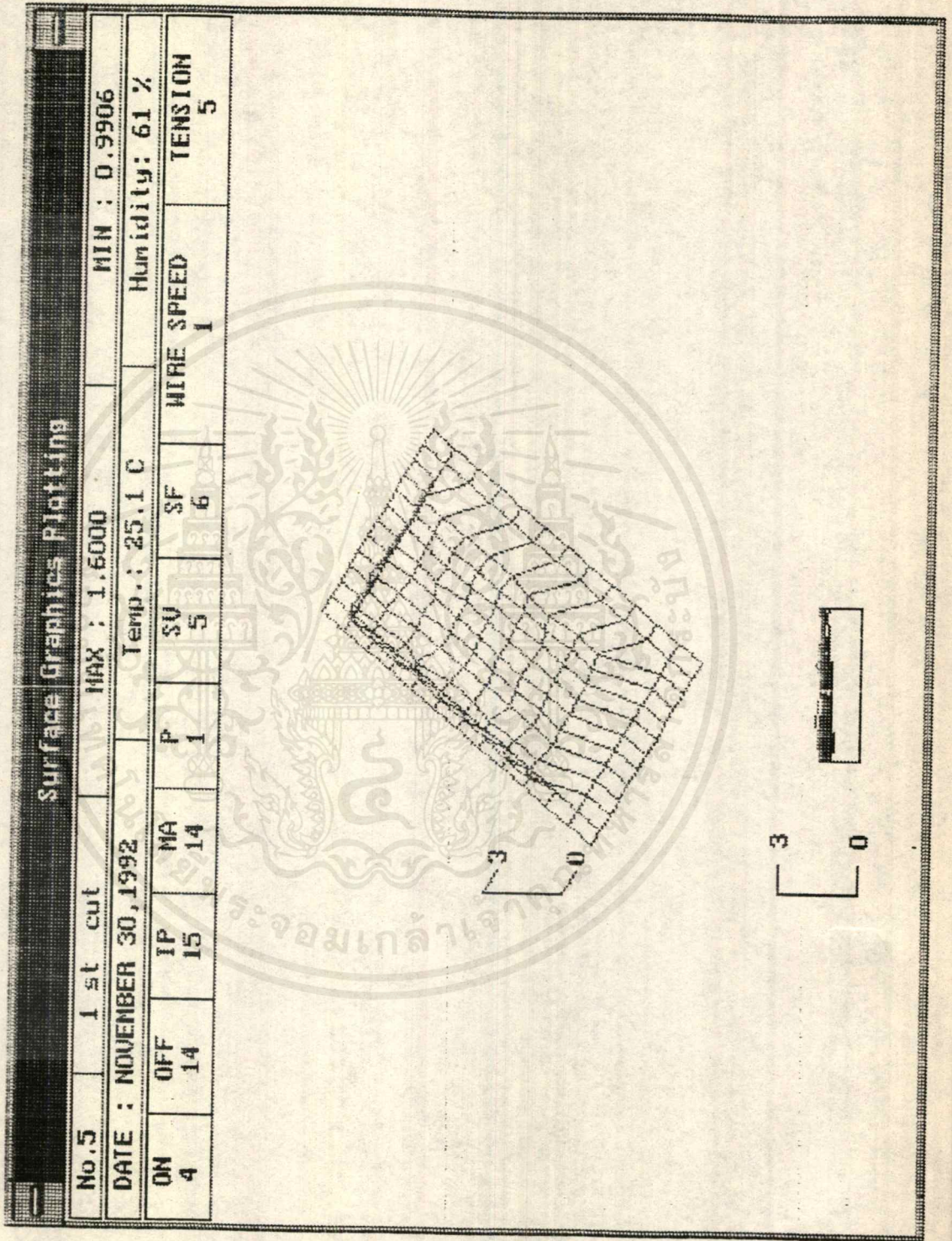
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



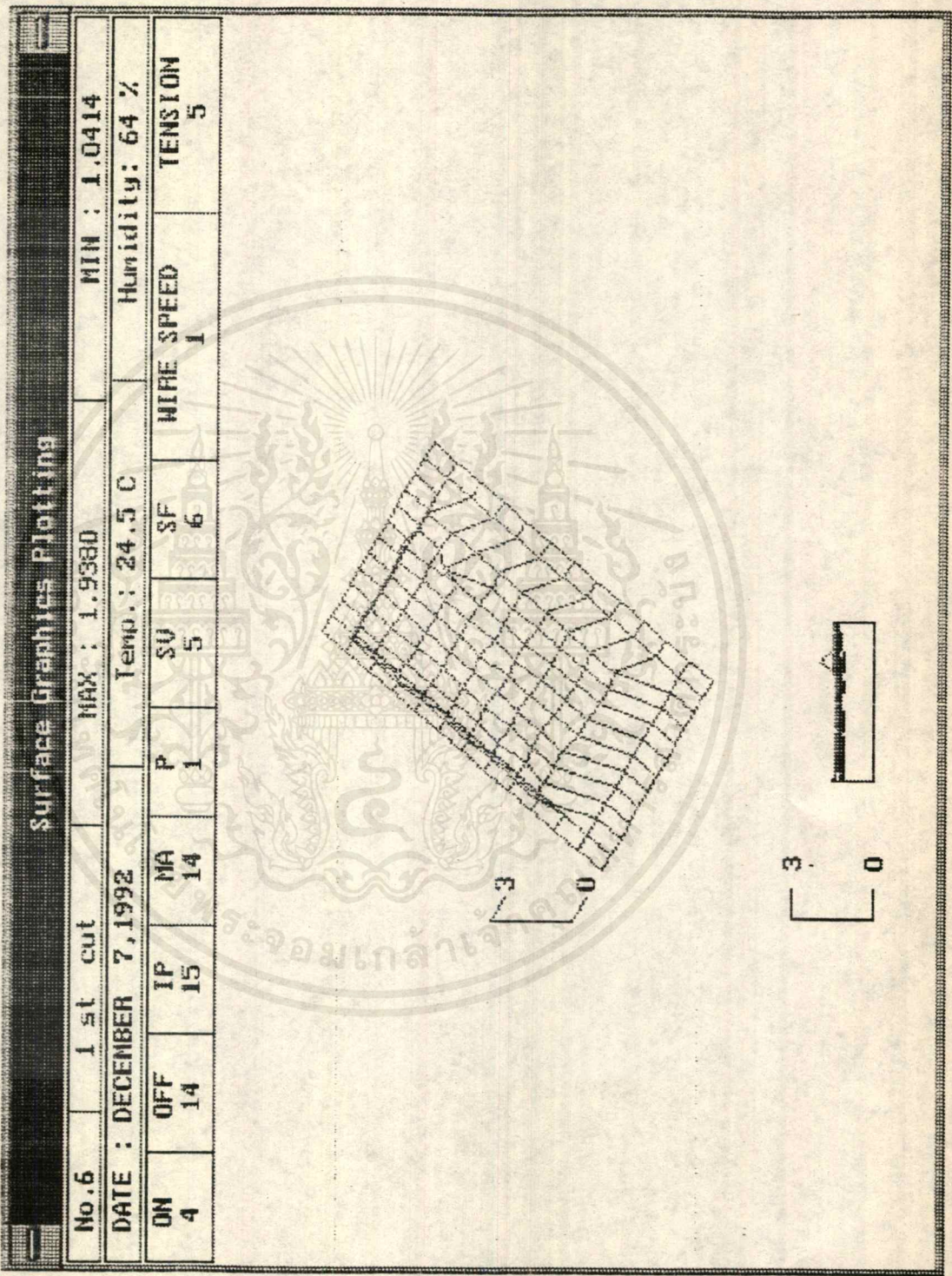
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



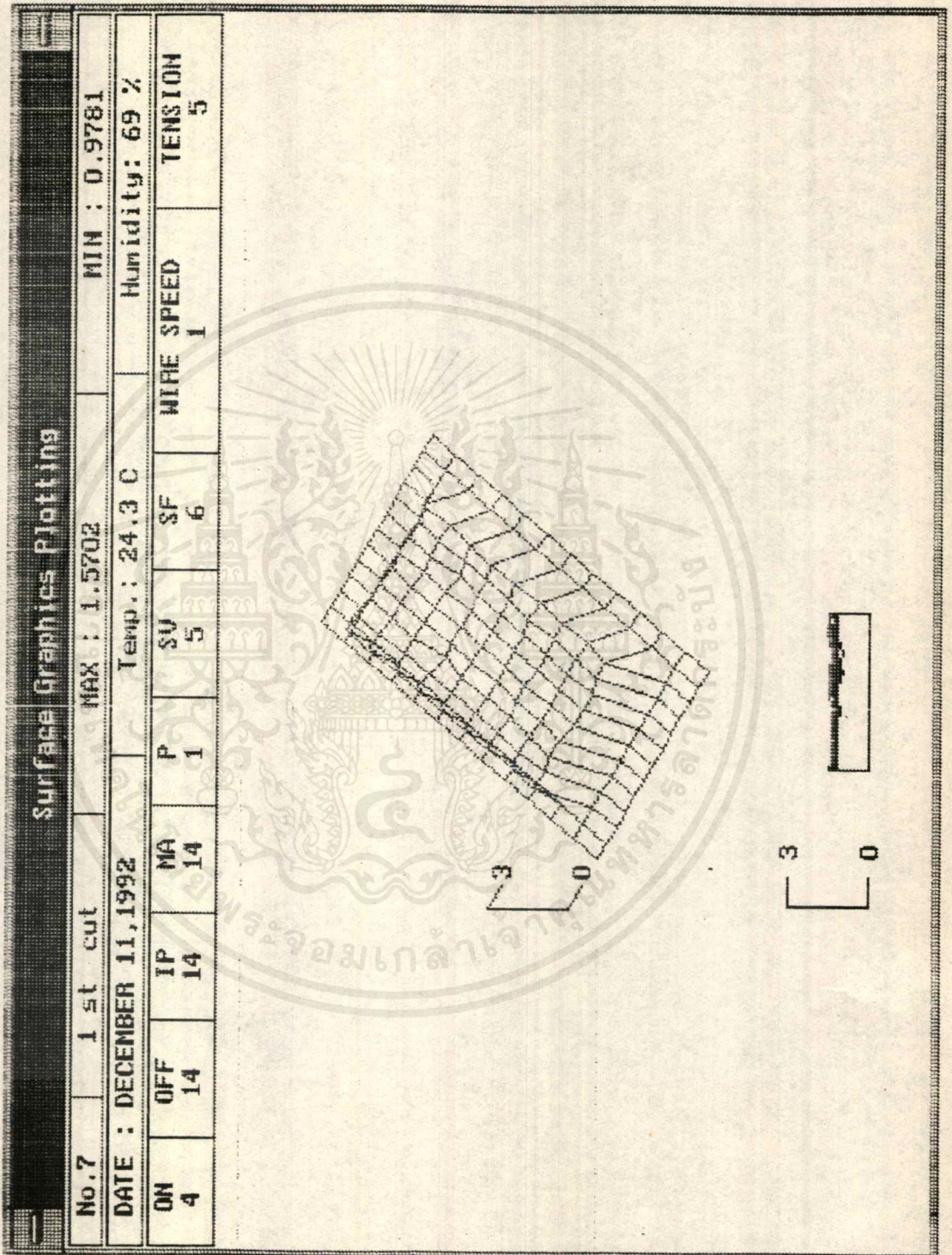
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



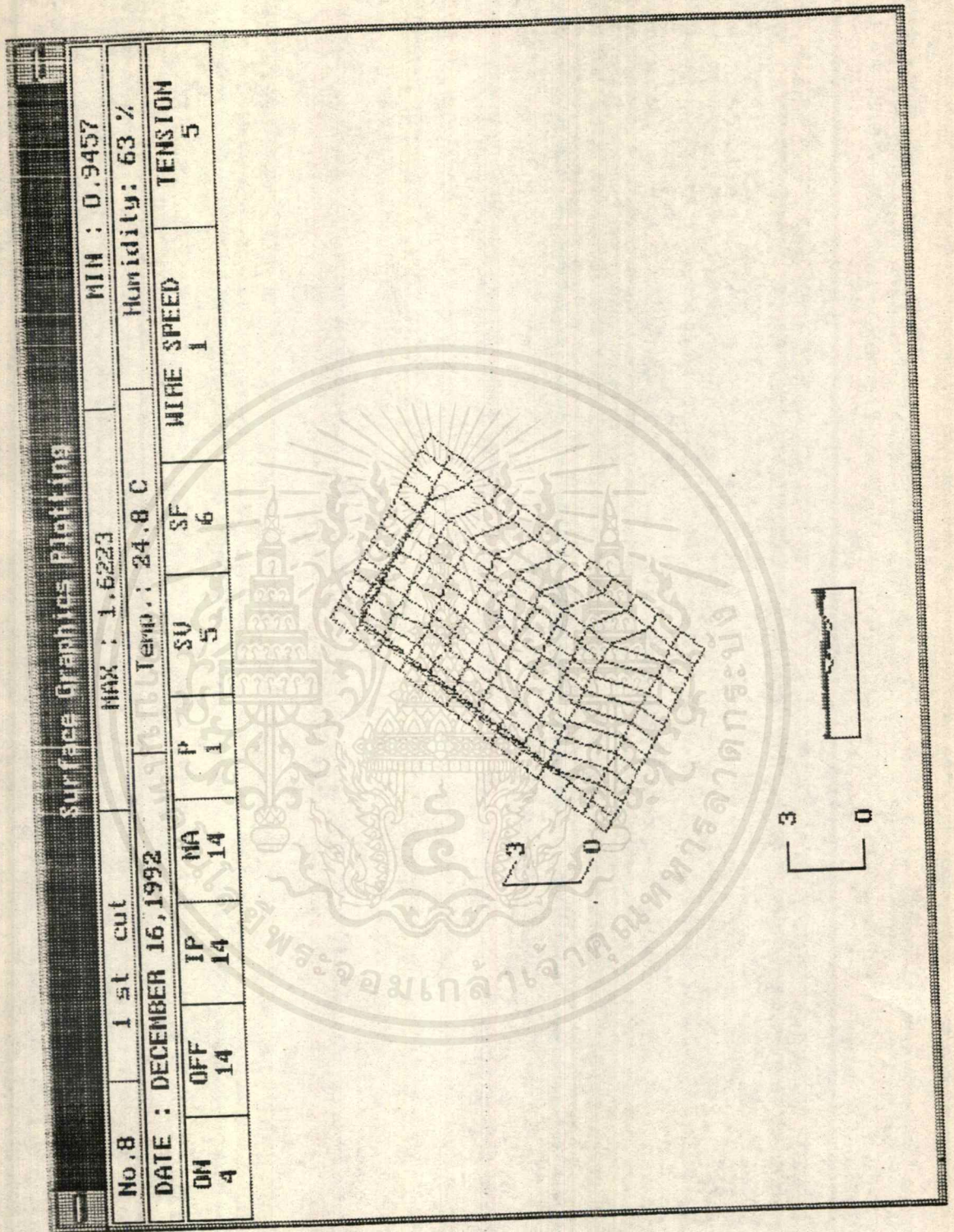
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



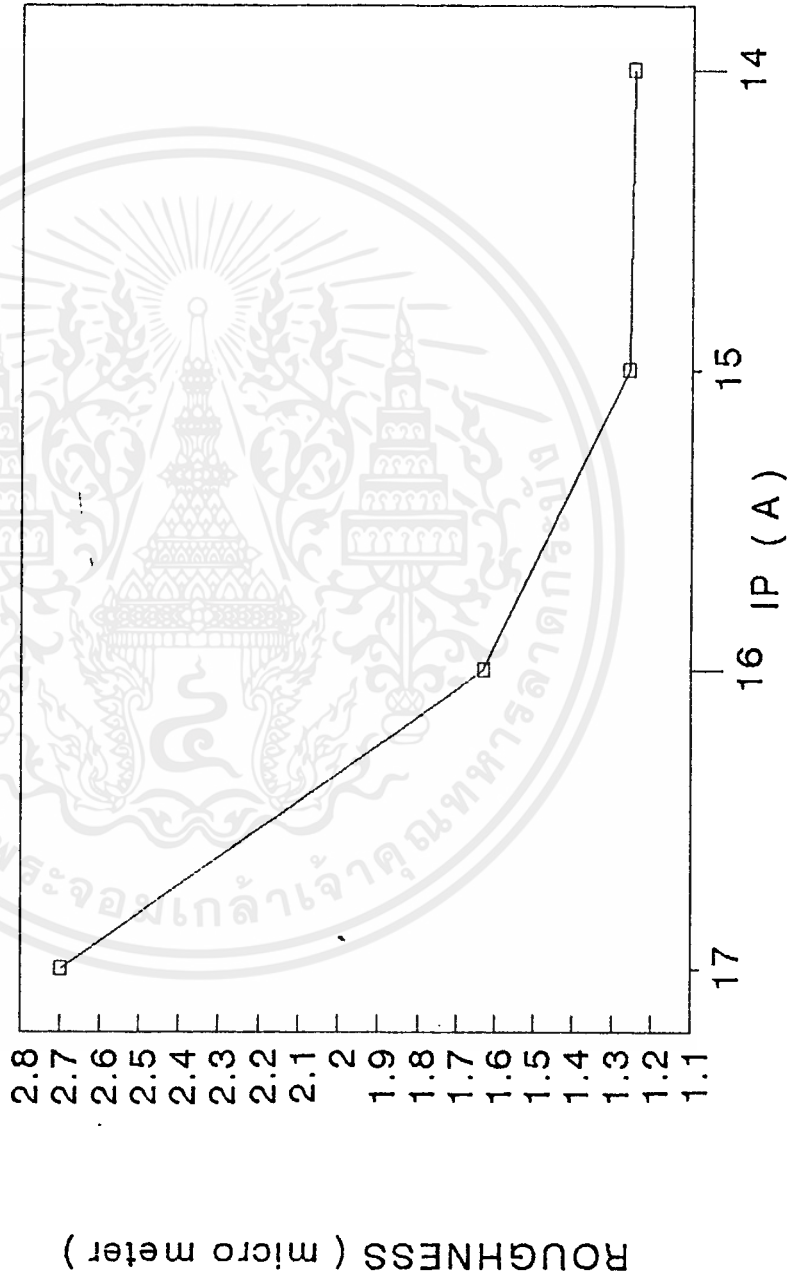
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TENSION	ON	OFF	MA	P	SV	SF	WIRE SPEED
5	4	17	14	1	5	6	1

IP	17	16	15	14
ROUGHNESS	2.8088	2.5890	1.6087	1.6533
AVR. ROUGHNESS	2.6989	1.6310	1.2683	1.2517
			1.2600	1.2496
				1.2491

### RELATION BETWEEN ROUGHNESS & IP FROM IP = 14 TO 17



### สรุปผลการทดลอง

จากกราฟ relation between roughness & IP เราสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

ค่า ON ที่มากกว่าจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหยาบมากกว่า เนื่องจากการเพิ่มค่า ON จะทำให้พลังงานการสปาร์ค (Discharge Energy) เป็นผลให้ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) เพิ่มขึ้นด้วย ความหยาบจึงมากกว่า

ค่า OFF จะไม่มีผลกระทบเท่ากับค่า ON เนื่องจากค่า OFF เป็นเพียงตัวควบคุมพลังงานการสปาร์คเท่านั้น แต่ค่า ON เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค

ค่า IP ถ้ามีมากกว่าจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความหยาบมากกว่า เนื่องจากการเพิ่มค่า IP จะทำให้พลังงานการสปาร์คเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น ความหยาบจึงมากกว่า เช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่า ON

นั่นคือ ค่า IP กับค่า ON เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานการสปาร์ค.

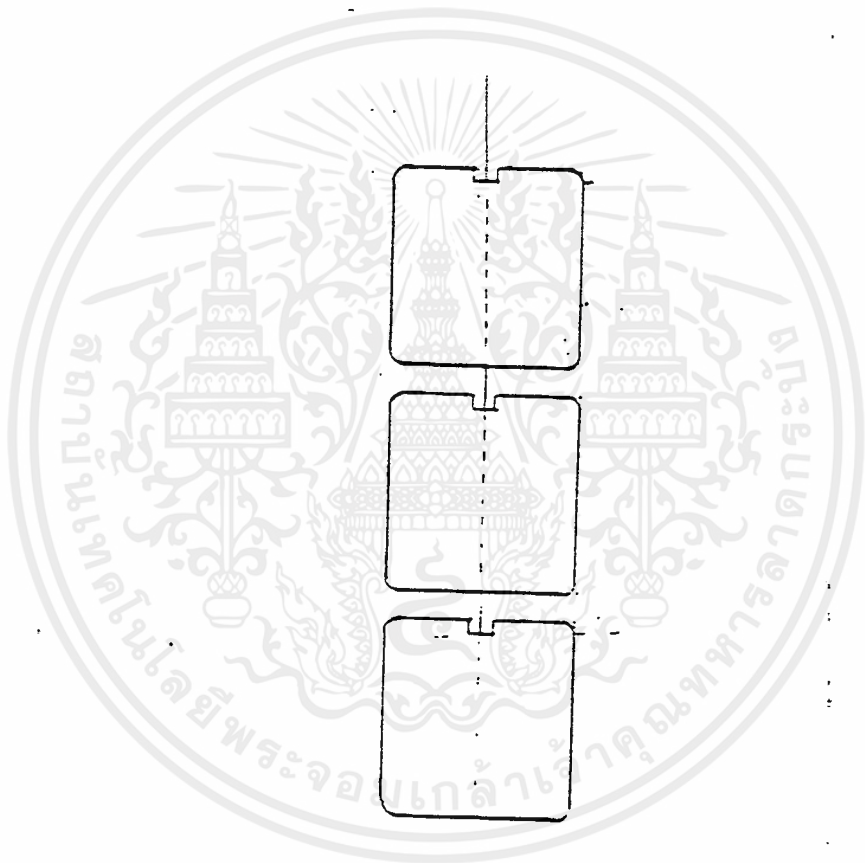


ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้เขียนในเครื่อง wire cut EDM

```

N0001 [ MAIN PROGRAM ];
G90 G92 XY;
M98 P1010;
G00 X0 Y-10000;
M98 P1010;
M02;
N1010 [ SUB1 ];
G55;
G92 X0 Y15000 Z0;
T89;
G42 H0;
G50 A0;
c101;
G01 Y11000;
T84;
C631;
M 98 P0010;
T39;
C631;
G42 H0;
T01 X0;
G40 G50 Y13000;
M99;
N0010 [ SUB2 ];
G01 Y9000;
X-10000;
Y10000;
X-9000;
GO3 X-10000 Y9000 J-1000;
GO1 Y-9000;
GO3 X-9000 Y-10000 11000;
GO1 X9000;
GC3 X10000 Y-9000 J1000;
GO1 Y9000;
GO3 X9000 Y10000 1-1000;
GO1 X1000;
Y9000;
X500;
M99;

```



### รูปแสดงผลของการตัดชิ้นงานที่ได้จากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

## REFERENCES

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

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากกำลังใจและความช่วยเหลือของบุคคลเหล่านี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูง

ผศ.ทวี เทศเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้คำแนะนำในการดำเนินงาน

อ.สรรพสิทธิ์ ลีมนรรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้สอนและแนะนำการปฏิบัติงาน และให้ข้อคิดเกี่ยวกับปรัชญาในการดำรงชีวิต

คุณ มณฑา เทียมเมือง เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ผู้ให้ความสะดวกในด้านสถานที่และเครื่องมือการทำงาน

เพื่อนวภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลรุ่น 28 ผู้ให้ความสนุกสนานและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

