

อภิธานการ



สำนักหอสมุด



การพัฒนาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี

Development of a micro electrochemical drilling system

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วันลงทะเบียน..... 14 ต.ย. 2560

เลขทะเบียน..... 19181541

เลขเรียกหนังสือ.....

นายชาญชัย คำสุทธิ รหัสหนังสือ 56361921

นายดำรงค์ ถาวรกุล รหัสหนังสือ 56361983

นายอนุชา อินยา รหัสหนังสือ 56362447

ปฐ
๕๔๘๕๓
๒๕๕๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2559



แบบเสนอโครงร่างปริญญาโท

หัวข้อโครงการ : การพัฒนาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี
 ผู้ดำเนินโครงการ : นายชาญชัย คำสุทธิ รหัสบัณฑิต 56361921
 : นายดำรงค์ ถาวรกุล รหัสบัณฑิต 56361983
 : นายอนุชา อินยา รหัสบัณฑิต 56362447
 อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2559

St H
ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร.สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย)

St H
กรรมการ

(รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

St H
กรรมการ

(อาจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

หัวข้อโครงการ	: การพัฒนาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายชาญชัย คำสุทธิ รหัสนิสิต 56361921
	: นายดำรงค์ ถาวรกุล รหัสนิสิต 56361983
	: นายอนุชา อินยา รหัสนิสิต 56362447
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	: ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ และพัฒนาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ (1) ส่วนคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในระนาบ X-Y ซึ่งมีความละเอียด 10 ไมโครเมตร (2) ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด Z ซึ่งมีความละเอียด 6.3 ไมโครเมตร (3) ระบบฉีดและควบคุมปริมาณสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ peristaltic pump (4) ส่วนควบคุมการทำงานของกระบวนการผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี นั้นทำโดยการนำเครื่องที่พัฒนาขึ้นมานี้ใช้ในการเจาะรูบนแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยแท่งอิเล็กโทรดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มี 2 ชนิดคือ NaCl และ NaNO_3 ซึ่งมีความเข้มข้น สองระดับคือ 0.1 และ 0.15 โมลาร์ สำหรับปัจจัยด้านศักย์ไฟฟ้านั้นมีการปรับค่าเป็นสี่ระดับคือ 5 , 7 , 9 และ 11 โวลต์ซึ่งทดลองด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และส่วนของสารละลายโซเดียมไนเตรดมีการปรับระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าสองระดับคือ 9 และ 12 โวลต์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการเจาะวัสดุทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ

ผลการทดลองบ่งชี้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ในการเจาะรูระดับไมโครได้สำเร็จ โดยมีขนาดรูเจาะเฉลี่ย 529 ไมโครเมตร โดยในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและคุณภาพของรูเจาะพบว่า ความต่างศักย์จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยหากความต่างศักย์สูงจะทำให้ใช้เวลาในการเจาะน้อย ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นก็มีส่วนต่อกระบวนการ โดยหากว่าสารมีความเข้มข้นมาก จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีทำให้เจาะได้เร็วขึ้น การใช้สารละลายโซเดียมไนเตรดจะให้คุณภาพผิวรูเจาะที่เรียกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์

Project title : Development of a micro electrochemical drilling system
Name : Mr.Chanchai Khamsut Code 56361921
: Mr. Dumrong Thawornkul Code 56361983
: Mr. Anucha Inya Code 56362447
Project advisor : Dr.Sumet Heamawatanachai
Major : Mechanical Engineering
Department : Mechanical Engineering
Academic year : 2016

Abstracts

This research is the design and development of a micro electrochemical drilling system. The developed system consists of: (1) an XY motion control system with resolution of 10 μm for controlling of work piece; (2) a Z motion electrode control system which has resolution of 6.3 μm ; (3) an electrolyte flow control system using 2 peristaltic pumps; and (4) a control unit using a microcontroller.

To study the effects of machining parameters, the developed system were used to drill micro-holes on stainless steel with thickness of 0.5 mm. The tool electrode diameter was 550 μm . Two types of electrolyte (NaCl and NaNO₃) with two levels of concentration (0.1 M and 0.15 M) were used. There were 4 steps of DC supply voltages in the experiments with NaCl which were 5V, 7V, 9V and 11V. For experiments with NaNO₃, there were 2 levels of DC voltage (9V and 12V). The size and quality of holes were analyzed using a microscope.

The results from experiments reveal that the system was capable of drilling micro-holes averaging of 529 μm . Increment of supply voltage will increase the rate of reaction result in reducing of drilling time. Higher concentration of electrolyte will also increase the rate of the reaction. From the experimental results, the surface quality of drilled holes using NaNO₃ are better than using NaCl.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพัฒนาระบบเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของ ดร.สุเมธ งามะวัฒนะชัย ที่ปรึกษาปริญญาโทที่ได้รับเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษาโครงการพร้อม ทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน และให้การ สนับสนุนในด้านอุปกรณ์การทำงานตลอดระยะเวลาการทำปริญญาโท ฉบับนี้ ท่านที่สอง ท่าน ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีที่ให้คำแนะนำในการผสมสารเคมี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบ รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์ และอาจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ ที่ ได้ให้ความรู้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของรูปเล่มโครงการศึกษาระบบเจาะวัสดุด้วย ไฟฟ้าเคมี

ขอขอบคุณหน่วยงานวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ (PMET) ที่ ได้ให้ความรู้คำแนะนำต่างๆ ห้องที่ใช้ในการทำโครงการอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆและ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้บ่มเพาะความรู้ ความสามารถ จนสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำงานตลอดจนการวิจัยในการทำปริญญาโท

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจและมีส่วนช่วยเหลือให้โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี จะเป็นประโยชน์ต่อนิสิตนักศึกษาที่มีความสนใจในเรื่องการเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
แบบเสนอโครงร่างปริญญาโท	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstracts	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.5 ขั้นตอนการทำงาน	2
1.6 แผนการทำงาน	3
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (ECM)	4
2.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)	5
2.1.3 กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้า (EDM)	6
2.2 หลักการการออกแบบการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี	7
2.2.1 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ	7
2.2.2 สเต็ปมอเตอร์ (Step Motors)	7
2.2.3 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600	8
2.2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์(microcontroller)	9
2.2.5 Program LabVIEW	10
2.3 วรรณกรรมปริทัศน์	12
2.3.1 งานวิจัยของ Chuangchuang Chen	12
2.3.2 งานวิจัยของ Guodong Liu และคณะ	15
2.3.3 งานวิจัยของ Zhang Yan และคณะ	15
2.3.4 งานวิจัยของจิตติ พัทธวณิช	17

บทที่ 3	วิธีการดำเนินงาน	
3.1	ออกแบบระบบเจาะวัสดุระดับไมโคร	20
3.2	วิธีการทดลอง	36
	- การทดลองรูปแบบที่ 1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์	37
	- การทดลองรูปแบบที่ 2 สารละลายโซเดียมไนเตรต	39
บทที่ 4	ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1	การทดสอบการทำงานของระบบ	40
4.1.1	ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +X และ -X	40
4.1.2	ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Y และ -Y	41
4.1.3	ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Z และ -Z	42
4.1.4	ทำการทดสอบระบบการทำงานของปั๊ม	43
4.2	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
4.3	ผลการทดลอง โซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	46
4.4	ผลการทดลอง โซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	48
4.5	เปรียบเทียบการทดลองโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์	50
4.5.1	เวลาที่ใช้เจาะ (Time) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	50
4.5.2	Gap หรือ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	51
4.5.3	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	55
4.5.4	ขนาดรูเจาะ (DH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	58
4.6	ผลการทดลอง โซเดียมไนเตรต	60
4.7	เปรียบเทียบการทดลองโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์	61
4.7.1	เวลาที่ใช้เจาะ (Time) ของสารละลายโซเดียมไนเตรต	61
4.7.2	Gap หรือ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน ของสารละลายโซเดียมไนเตรต	61
4.7.3	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมไนเตรต	63
4.7.4	ขนาดรูเจาะ (DH)ของสารละลายโซเดียมไนเตรต	64
บทที่ 5	สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผล	67
5.2	ข้อเสนอแนะ	68

อ้างอิง	หน้า
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	102
ภาคผนวก ง	107
	111



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ EDM กับ ECM	6
ตารางที่ 2.2 ตารางกำหนดค่า parameters ต่างๆ	12
ตารางที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าที่ใช้และช่วงเวลาในการจ่าย pulse ที่มีผลต่อมุมและองศา[6]	14
ตารางที่ 3.1 ลำดับการทดสอบการเจาะโดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.15 โมลาร์	37
ตารางที่ 3.2 ลำดับการทดสอบการเจาะโดยสารละลายโซเดียมไนเตรท ความเข้มข้น 0.1 และ 0.15 โมลาร์	39
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +X	40
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน -X	40
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Y	41
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน -Y	41
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Z	42
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน -Z	42
ตารางที่ 4.7 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 25	43
ตารางที่ 4.8 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 30	43
ตารางที่ 4.9 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 35	44
ตารางที่ 4.10 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 40	44
ตารางที่ 4.11 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	52
ตารางที่ 4.12 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	54
ตารางที่ 4.13 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลาย โซเดียมไนเตรท	62

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกระบวนการกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี	4
รูปที่ 2.2 กระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้า(EDM) [3]	6
รูปที่ 2.3 ภาพชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์แบบ 4 เฟส[4]	8
รูปที่ 2.5 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600[10]	9
รูปที่ 2.6 การต่อวงจรบอร์ด Arduino เข้ากับบอร์ดขับมอเตอร์[5]	9
รูปที่ 2.7 Front Panelของ LabVIEW[5]	10
รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง Block Diagram[5]	11
รูปที่ 2.9 ลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector[5]	11
รูปที่ 2.10 ชุดอุปกรณ์การทดลอง[6]	12
รูปที่ 2.11 การกำหนดตัวแปรของร่องขนาดเล็ก[6]	13
รูปที่ 2.12 ภาพของร่องขนาดไมโครที่ถูกกัดด้วยกระบวนการไมโคร ECM[6]	13
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่าง (RA)และความเร็วของผนัง	14
ด้านข้าง (θ) เทียบกับแรงดันไฟฟ้า[6]	14
ด้านข้าง (θ) เทียบกับช่วงเวลาการจ่าย pulse[6]	14
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่าง (RA) และ ความเร็วของผนังด้านข้าง (θ) เทียบกับช่วงเวลาการจ่าย pulse[6]	14
รูปที่ 2.15 การเจาะหลุมเตเปอร์ขนาดไมโครโดยกระบวนการ (μ ECM)[7]	15
รูปที่ 2.16 กระบวนการการประยุกต์ใช้กระบวนการ EDMร่วมกับECM (TSECDD) [8]	16
รูปที่ 2.17 ด้านบนของรูที่เจาะด้วย (TSECDD) [8]	16
รูปที่ 2.18 ด้านข้างของรูที่เจาะด้วย (TSECDD) [8]	17
รูปที่ 2.19 ลักษณะการกัดชิ้นงานของอิเล็กโทรดทรงกลวง (ก) ทรงกลวง (ข) ทรงตัน[9]	17
รูปที่ 2.20 หน้าตัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงกลวง[9]	18
รูปที่ 2.21 หน้าตัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงตัน[9]	18
รูปที่ 3.1 การทดลองการใช้ระบบเจาะด้วยไฟฟ้าเคมีต้นแบบ	20
รูปที่ 3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรมต้นแบบ	21
รูปที่ 3.3 โปรแกรมการควบคุมการทำงานของระบบ	22

	หน้า
รูปที่ 3.4 การใส่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน	22
รูปที่ 3.5 การใส่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกน Z	22
รูปที่ 3.6 การกำหนดอัตราเร็วของปั๊มทั้ง 2 ตัว	22
รูปที่ 3.7 Power supply ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแส	23
รูปที่ 3.8 ชุดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ XY [11]	23
รูปที่ 3.9 ปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์[11]	24
รูปที่ 3.10 ชุดควบคุมความดันภายในท่อสายยาง[11]	24
รูปที่ 3.11 Digital Power supply ปรับค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าได้	25
รูปที่ 3.12 ชุดควบคุมที่ใช้ในกระบวนการ	26
รูปที่ 3.13 ภาพขยายของ A และ B	27
รูปที่ 3.14 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA	28
รูปที่ 3.15 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น TB6600	28
รูปที่ 3.16 กล้องไมโครสโคป	29
รูปที่ 3.17 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น L298N	29
รูปที่ 3.18 แกน Z สำเร็จรูป	30
รูปที่ 3.19 ปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารอิเล็กโทรไลต์ชนิด Peristaltic pump	30
รูปที่ 3.20 ภาพของเข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด	31
รูปที่ 3.21 ภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบชนิด Stainless Steel	31
รูปที่ 3.22 ภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแกน X Y	32
รูปที่ 3.23 ภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแกน Z	32
รูปที่ 3.24 ภาพ Limit Switch	33
รูปที่ 3.25 ภาพ Bearing	33
รูปที่ 3.26 ภาพมัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์ และกระแสไฟฟ้าของระบบ	34
รูปที่ 3.27 ภาพเหล็กฉากที่ใช้ทำโครงสร้างสำหรับยึดแกน Z	34
รูปที่ 3.28 ภาพเหล็กกรางน้ำที่ใช้สำหรับเป็นฐานของ Micro ECM	35
รูปที่ 3.29 ลำดับในการเจาะรูที่ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลลาร์	38
รูปที่ 3.30 ลำดับในการเจาะรูที่ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลลาร์	38
รูปที่ 3.31 ลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-16 บนแผ่นสแตนเลส ของสารละลายโซเดียมไนเตรทความเข้มข้นของสารละลาย 0.1 และ 0.2 โมลลาร์	39

	หน้า
รูปที่ 4.1 Gap หรือช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน	45
รูปที่ 4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ขนาดรูเจาะ (DH)	และ 46
รูปที่ 4.3 รูเจาะครั้งที่ 1-16 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (แผ่นที่ 1)	46
รูปที่ 4.4 รูเจาะครั้งที่ 17-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (แผ่นที่ 2)	47
รูปที่ 4.5 รูเจาะครั้งที่ 1-16 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ (แผ่นที่ 3)	48
รูปที่ 4.6 รูเจาะครั้งที่ 17-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ (แผ่นที่ 4)	49
รูปที่ 4.7 การหาค่าขนาดของช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลาย โซเดียมคลอไรด์	52
รูปที่ 4.8 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความ เข้มข้นของสารละลายและความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน	55
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	55
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของขนาดรูเจาะ (DH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์	58
รูปที่ 4.11 รูเจาะครั้งที่ 1-16 ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	60
รูปที่ 4.12 การหาค่าขนาดของช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของ สารละลาย โซเดียมไนเตรท	62
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	63
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของขนาดรูเจาะ (DH) ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	64
รูปที่ 4.15 ภาพจำลองรวมของการเจาะที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ของโซเดียมคลอไรด์	65
รูปที่ 4.16 ภาพจำลองรวมของการเจาะ โซเดียมไนเตรท	66

สารบัญชุกรภาพ

	หน้า
กราฟที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	50
กราฟที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	51
กราฟที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	53
กราฟที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	54
กราฟที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของ รูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	56
กราฟที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	57
กราฟที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความความเข้มข้น 0.1 โมลาร์	58
กราฟที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความความเข้มข้น 0.15 โมลาร์	59
กราฟที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-16 ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	61
กราฟที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน 1-16 ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	62
กราฟที่ 4.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-16 ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	64
กราฟที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-16 ของสารละลายโซเดียมไนเตรท	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในระดับไมโครได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานขนาดเล็กที่มีความละเอียด โดยขนาดโครงสร้างของชิ้นงานอยู่ในระดับไมโคร เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาในหลายๆ ด้าน เช่น ทางด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และทางด้านการแพทย์ ซึ่งในการขึ้นรูปหรือการกัดวัสดุที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกัดวัสดุเชิงกล การกัดวัสดุด้วยหลักการทางไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) และการกัดวัสดุด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining) ซึ่งในกระบวนการกัดวัสดุเชิงกลและกระบวนการกัดวัสดุด้วยหลักการทางไฟฟ้า ชิ้นงานมีความร้อนสูงส่งผลให้เกิดรอยแตก (Crack) หรือคุณสมบัติของชิ้นงานเปลี่ยนไป โดยงานวิจัยจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการกัดวัสดุด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดความร้อนสูงทำให้ไม่เกิดรอยแตก (Crack) ภายในชิ้นงาน และเป็นกระบวนการที่ไม่อาศัยแรงในการกัดวัสดุ ทำให้สามารถสร้างรูปร่างบนวัสดุบาง หรืองานระดับไมโครได้

สำหรับกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining) วัสดุจะถูกกัดออกคล้ายกับกระบวนการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่ง Electrode ไปที่ชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ส่งผลให้อะตอมวัสดุและสารละลายเกิดการแตกตัวและจับตัวกันเป็นสารใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องเจาะในระดับไมโครด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีให้มีการเคลื่อนที่ในแกน X Y และ แกน Z
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลในการเจาะ เช่น ความต่างศักย์ ชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ขนาดของรูเจาะ และระยะเวลาที่ใช้ในการเจาะ

1.3 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้เครื่องเจาะในระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี
- 1.3.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะด้วยไฟฟ้าเคมี
- 1.3.3 ได้ความรู้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมเครื่องเจาะ

1.4 ขอบเขตโครงการ

- 1.4.1 พัฒนาระบบควบคุมและโปรแกรมควบคุมแกน Z นำมาประกอบเข้ากับแกน X Y โดยขนาดแท่งอิเล็กโทรดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร
- 1.4.2 ทดลองโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โซเดียมไนเตรต (NaNO₃) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 พัฒนาเครื่องเจาะระดับไมโครด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 1.5.3 พัฒนาโปรแกรมในการควบคุม
- 1.5.4 ทำการทดลอง
- 1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.5.6 จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2558				2559			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	■	■	■	■				
2. พัฒนาเครื่องเจาะรูและสร้างแกน Z				■	■	■		
3. พัฒนาโปรแกรมควบคุม					■	■		
4. ทำการทดลอง						■	■	
5. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้						■	■	
6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์							■	■

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

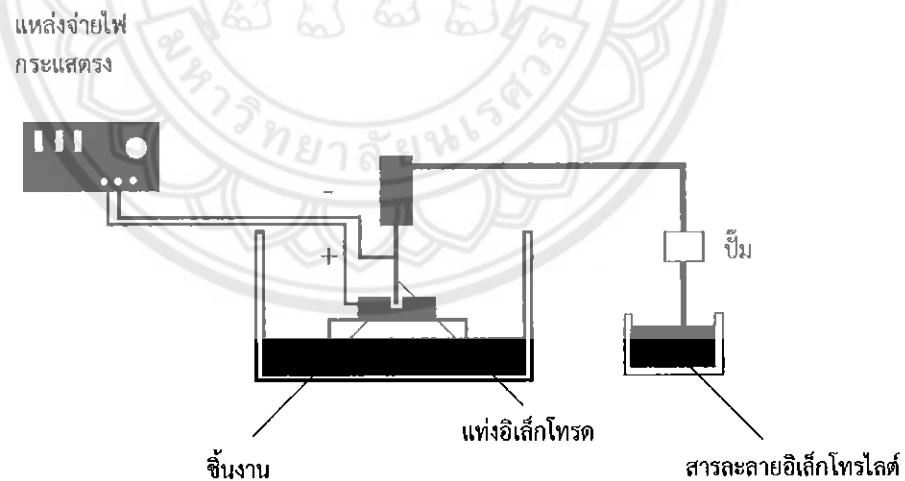
1.7.1 ค่าอุปกรณ์	7500	บาท
1.7.2 ค่าวัสดุ	1500	บาท
1.7.3 ค่าจัดทำรายงาน	300	บาท
1.7.4 อื่นๆ	500	บาท

บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical milling : ECM)

กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (ECM) [1] เป็นกระบวนการกัดวัสดุซึ่งอาศัยหลักการของขั้วกระแสไฟฟ้า โดยจะจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วบวก Anode เข้าที่ชิ้นงาน (workpiece) และจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วลบ Cathode ที่แท่ง electrode โดยที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะไหลผ่านแท่ง electrode ไปยังชิ้นงาน ปกติสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นสารละลายเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือ โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ที่มีศักย์ภาพในการนำไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดการละลายวัสดุ workpiece ในกระบวนการ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าไปที่ขั้วงานและตัวอิเล็กโทรด ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้วัสดุงานและสารละลายเกิดการแตกตัวและจับตัวกันเป็นสารใหม่ยกตัวอย่างเช่นวัสดุงานที่เป็นโลหะ Fe เมื่อเกิดการแตกตัวจะกลายเป็น Fe^{2+} ซึ่งจะไปรวมตัวกับไอออน Cl^- และ OH^- ในสารละลายตามลำดับจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น $Fe(OH)_2$ ตกตะกอนเป็นผงอยู่ในสารละลายดังในสมการที่ 2.1 และจะมีฟองก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดขึ้นที่ขั้วลบ



และจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้น้ำเกิดการแตกตัวในขณะที่ $NaCl$ หรือเกลือไม่ได้หายไปจากระบบดังนั้นเมื่อกระบวนการกัดดำเนินไปได้ในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายมีมากขึ้นการเติมน้ำเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยน้ำที่หายไปและรักษาระดับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการกัดแบบ ECM

2.1.2 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์ หมายถึง สารที่เมื่อละลายในน้ำจะนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีไอออนซึ่งอาจจะเป็นไอออนบวก(2)หรือไอออนลบเคลื่อนที่อยู่ในสารละลาย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ นี้ อาจเป็นสารละลายกรด เบส หรือเกลือก็ได้ ตัวอย่างเช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และสารละลายโซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) เป็นต้น โดยในสารละลายดังกล่าวประกอบด้วยไอออน H^+ , Cl^- , Na^+ และ OH^- ตามลำดับ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ นำไฟฟ้าได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กโทรไลต์ไม่เท่ากัน อิเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวเป็นไอออนได้มากกว่า ก็จะนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยกว่า อิเล็กโทรไลต์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

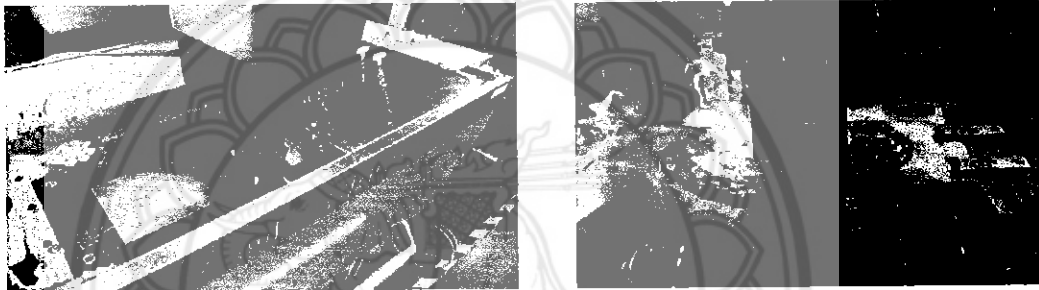
1. อิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้มาก อาจแตกตัวได้ 100% และนำไฟฟ้าได้ดีมาก เช่น กรดแก่ และเบสแก่ และเกลือส่วนใหญ่จะแตกตัวได้ 100% เช่น HCl , $NaOH$, KNO_3 , $NaCl$ เป็นต้น

2. อิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวได้บางส่วน นำไฟฟ้าได้น้อย เช่น CH_3COOH , NH_4OH เป็นต้น

ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) และ โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) ที่ใช้ในการทดลอง จะเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์แก่ เพราะละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้ 100% และสามารถนำไฟฟ้าได้ดี

2.1.3 กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้า (EDM)

EDM หรือ Electrical Discharge Machine[3] หมายถึง เครื่องกัดวัสดุโลหะด้วยหลักการ ทำงานของกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงโดยการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุที่เป็นโลหะ สองชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานและอิเล็กโทรด จนทำให้เนื้อโลหะถูกกัดเซาะตาม ที่กำหนดไว้ในโปรแกรม จน ได้รูปร่างชิ้นงานตามต้องการ โดยที่อิเล็กโทรดนั้นจะสร้างจากกระบวนการ CNC อิเล็กโทรดนั้นจะทำ จากวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง เช่น ทองแดง ทังสเตนคาร์ไบด์ ซึ่งเครื่อง EDM จะสร้าง ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ขณะที่อิเล็กโทรดเข้าไปใกล้ชิ้นงานก็จะเกิดการสปาร์ค ระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 กระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้า(EDM) [3]

ทำให้ชิ้นงานที่เป็นเหล็กเกิดความร้อนและละลายออกมาจนเกิดเป็นรูปทรงอิเล็กโทรดและ ชิ้นงานจะจมอยู่ในของเหลวที่เป็นฉนวน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำมันหล่อลื่นชนิดไฮดรอลิกหรือน้ำกลั่น ของเหลว นี้จะไม่เป็นสื่อทางไฟฟ้า ในขณะที่ควบคุมและรักษาระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน เพื่อ ป้องกันไม่ให้อิเล็กโทรดและชิ้นงานสัมผัสกัน งานที่เหมาะสมกับการใช้ EDM นั้น ส่วนมากจะเป็นงานที่ ต้องการความเที่ยงตรง งานที่ไม่สามารถขึ้นรูปหรือตัดเฉือนด้วยวิธีปกติได้ เช่น ชิ้นงานที่บาง กัดด้วย Milling ไม่ได้ เจียรนัยไม่ได้ หรือทำได้แต่ทำได้ยากเพราะมีรูปร่างซับซ้อน หรือเป็นชิ้นงานที่ผ่านการ ชุบแข็งมาแล้ว เช่น ส่วนเข้าของแม่พิมพ์ ดังนั้น EDM จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นงานประเภทต้นแบบ (Prototype) หรือการผลิตชิ้นงานในสายงานการผลิตที่มีกำลังการผลิตปานกลาง เป็นต้น

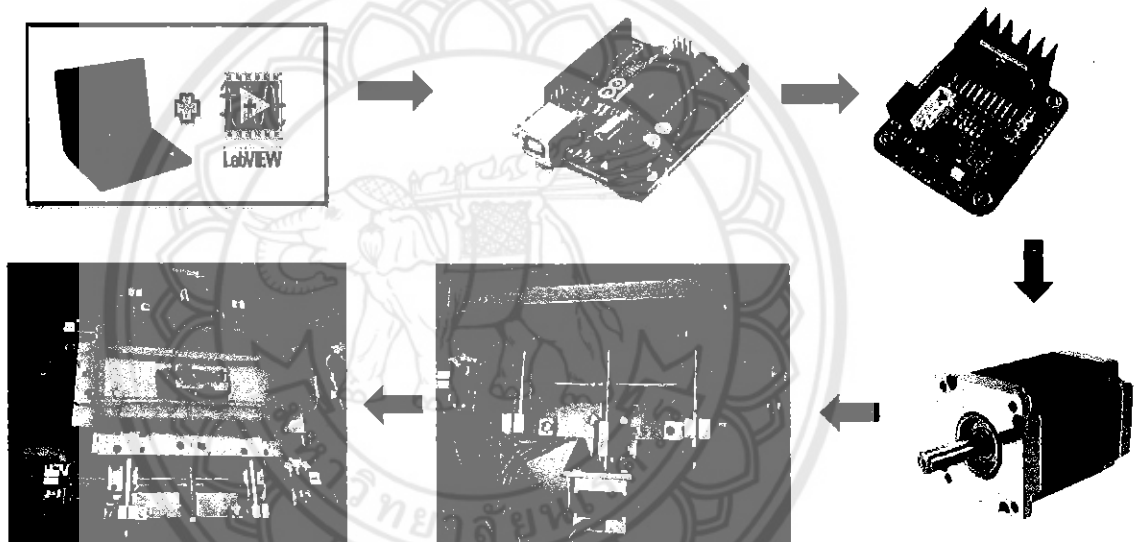
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ EDM กับ ECM

EDM	ECM
ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง	ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำ
เกิดความร้อน สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลง	ไม่เกิดความร้อน สมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลงใช้
มีความเที่ยงตรงมากกว่า	เที่ยงตรงน้อยกว่า
อิเล็กโทรดเสียหายเร็ว	ใช้อิเล็กโทรดได้นานกว่า
ชิ้นงานที่ได้มีพื้นผิวที่ไม่เรียบ ขรุขระ	ชิ้นงานที่ได้มีพื้นผิวที่ดี

2.2 หลักการการออกแบบการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี

2.2.1 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ

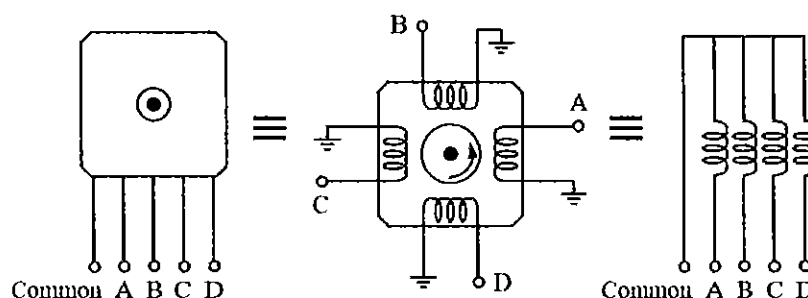
การควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ ควบคุมโดยใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งได้รับสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ และสั่งการให้มอเตอร์หมุน ไปตามตำแหน่ง ทิศทาง และ ความเร็ว ด้วยชุดคำสั่งที่โครงงานนี้พัฒนาขึ้นมาใหม่บนโปรแกรมแลบวิว เพื่อควบคุมการเจาะชิ้นงาน ชุดอุปกรณ์ควบคุมประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ บอร์ด Arduino บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ

2.2.2 สเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motors)

สเต็ปมอเตอร์เหมาะกับการทำงานที่ต้องการตำแหน่งของการหมุนที่แม่นยำมาก ซึ่งสามารถนำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ มาทำการควบคุมได้สะดวก การทำงานของสเต็ปมอเตอร์จะขับเคลื่อนทีละขั้นๆ ละ (Step) 0.9, 1.8, 5, 7.5, 15 ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแต่ละชนิดของสเต็ปมอเตอร์ตัวนั้นๆ โครงสร้างการทำงานของ Stepping Motor มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 4 ขด ชนิด 4 phase ล้อมรอบแกนหมุน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์แบบ 4 เฟส [4]

หลักการทำงาน คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด Coil a,b,c,d ไม่พร้อมกัน โดยจ่ายกระแสให้ a แล้วตามด้วย b,c และ d เรียงตามลำดับ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หมุนวนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งส่วนของ แกนหมุน ที่เป็นแม่เหล็กก็จะหมุนตามสนามแม่เหล็กไปด้วย การกำหนดความเร็วของ step Motor ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลง ความเร็วของการเปลี่ยนการจ่ายกระแสจากขดลวดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งให้เร็วขึ้น

วิธีคำนวณหาจำนวน องศาต่อ step ของมอเตอร์ เช่น 1.8 องศา ต่อ Step หมายถึง 1 รอบการหมุนของมอเตอร์ ที่ 360 องศา [4] ก็จะได้

$$360/1.8 \text{ องศา} = 200 \text{ Step/Revol}$$

$$360/1.2 \text{ องศา} = 300 \text{ Step/Revol}$$

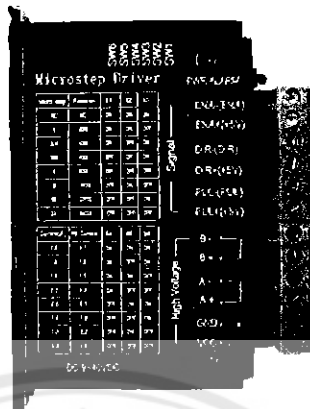
$$360/0.9 \text{ องศา} = 400 \text{ Step/Revol}$$

$$360/0.72 \text{ องศา} = 500 \text{ Step/Revol}$$

$$360/0.6 \text{ องศา} = 600 \text{ Step/Revol}$$

2.2.3 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600

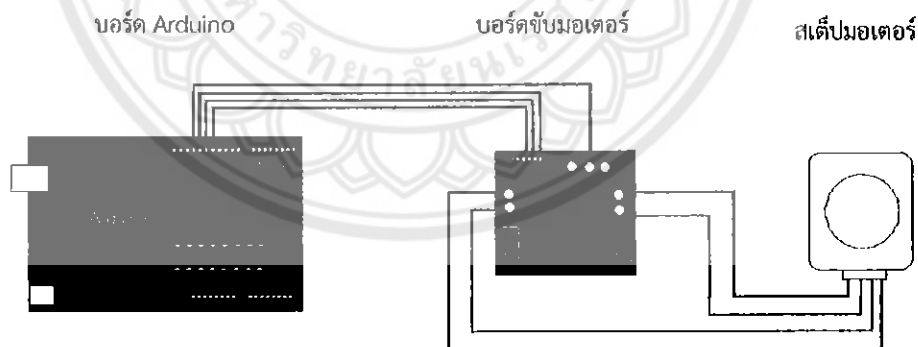
เป็นบอร์ดขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ใช้ไอซีเบอร์ TB6600 [10] สามารถใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ได้ จ่ายกระแสได้สูงถึง 4 A สามารถปรับกระแสให้เหมาะสมกับสเต็ปมอเตอร์ เพื่อที่สเต็ปมอเตอร์จะไม่เกิดความร้อน ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 – 45 VDC มีฮีทซิงค์ระบายความร้อนขนาดใหญ่ ใช้ได้กับสเต็ปมอเตอร์ทั้งแบบ 2 เฟส และ 4 เฟส สามารถปรับเป็นไมโครสเต็ปได้สูงสุด 6400 สเต็ป



รูปที่ 2.5 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600[10]

2.2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์(microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ขนาดเล็ก [5] ซึ่งในการทำโครงงานนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ arduino uno r3 ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของสเต็ปมอเตอร์ โดยนำไปต่อเข้ากับบอร์ด Stepper motor driver ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การต่อวงจรบอร์ด Arduino เข้ากับบอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์

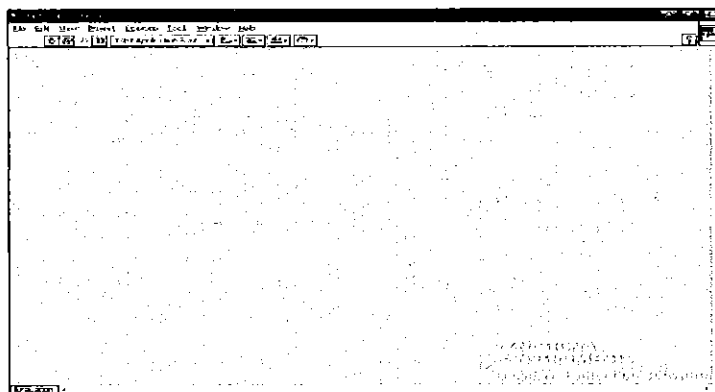
ข้อดีของบอร์ด Arduino

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อน
- Open Hardware สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง

2.2.5 Program LabVIEW

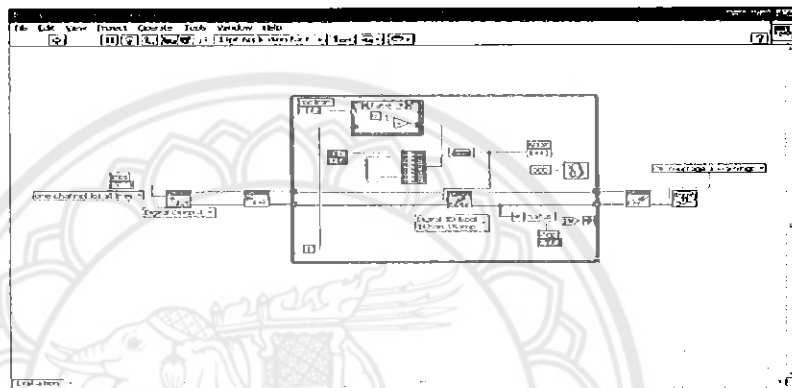
LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench โปรแกรม LabVIEW [5] เป็นโปรแกรมที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการวัดและเครื่องมือวัด ทางวิศวกรรม ในตัวของโปรแกรมจะประกอบด้วยฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวัดและโปรแกรมเป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) คือไม่จำเป็นต้องเขียน code และภาษาที่ใช้เป็นภาษารูปภาพ หรือ เรียกว่าภาษา G (Graphical Language โดยโปรแกรม LabView มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในการวัดและการควบคุม โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม สำหรับ VI หนึ่งๆ จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน

1. Front Panel หรือหน้าปัด จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัดของเครื่องมือหรือ อุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆไป โดยจะประกอบด้วย สวิตซ์ปิดเปิด ปุ่มกด จอแสดงผลหรือค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด ดังในรูปที่ 2.7



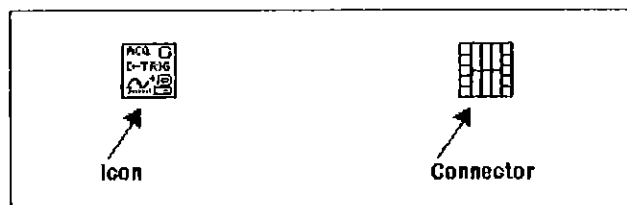
รูปที่ 2.7 Front Panelของ LabVIEW [5]

- Block Diagram เปรียบเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G ส่วนประกอบภายใน Block Diagram จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนจะทำการต่อสาย (Wire) สำหรับ Block เข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง Block Diagram[5]

- Icon และ Connector เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย ในโปรแกรมปกติทั่วไป Icon จะหมายถึง Block Diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector ข้อดีของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา G สามารถสร้าง VI ที่ละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองได้อย่างอิสระสำหรับลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector ในรูปที่ 2.9 เราจะเห็นว่า ในรูปของ Connector เราจะพบว่ามีช่องต่อข้อมูลหรือที่เรียกว่า Terminal ปรากฏให้เห็น



รูปที่ 2.9 ลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector[5]

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำโปรแกรม Labview มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะ โดยการเขียนโปรแกรม Labview ลงบนบอร์ด Arduino

2.3 วรรณกรรมปริทัศน์

2.3.1 งานวิจัยของ Chuangchuang Chen [6] ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกัดร่องขนาดเล็กด้วยกระบวนการไมโคร ECM เช่น แรงดันไฟฟ้า ช่วงเวลาในการจ่าย pulse และการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น โดยการทดลองโดยจะใช้อุปกรณ์การทดลองที่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y Z ที่ความละเอียด 0.1 ไมโครเมตร แหล่งจ่ายไฟ ultra-short pulse ระบบลำเลียงสารอิเล็กโทรไลต์ แท่งอิเล็กโทรด และชุดควบคุมระบบคอมพิวเตอร์ ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (a) โครงสร้างอุปกรณ์การทดลอง

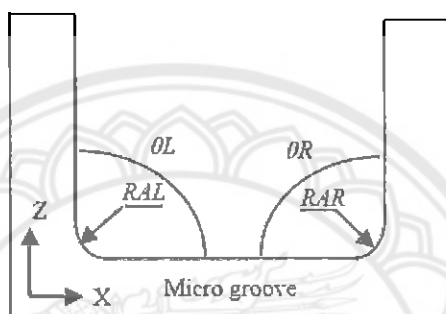


รูปที่ 2.10 (b) อุปกรณ์การทดลอง[6]

โดยการกำหนดค่าต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 2.2

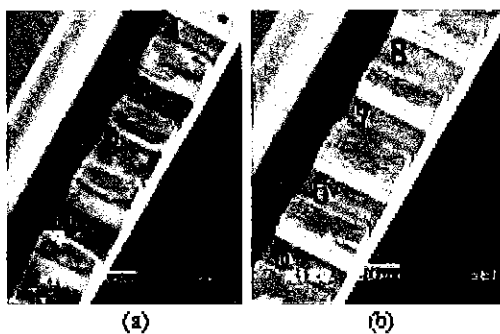
Items	Parameters
Electrode	Tungsten , $\Phi 80 \mu\text{m}$
Workpiece	304 Stainless steel, $25 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^2$
Electrolyte	H_2SO_4 0.2 mole/L
Tool rotation rate	1000 rpm
Feed velocity	X Y $2 \mu\text{m/s}$, Z $1 \mu\text{m/s}$

ในกระบวนการไมโคร ECM แรงดันไฟฟ้าและช่วงเวลาในการจ่าย pulse เป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดคุณภาพในการกัดวัสดุ ในบทความนี้จะกำหนดให้ RA เป็นรัศมีของมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่าง RAR เป็นรัศมีมุมด้านขวา RAL เป็นรัศมีมุมทางด้านซ้ายและ θ เป็นมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่างโดยที่ θR เป็นมุมด้านขวาและ θL เป็นมุมด้านซ้ายในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การกำหนดตัวแปลของร่องขนาดเล็ก[6]

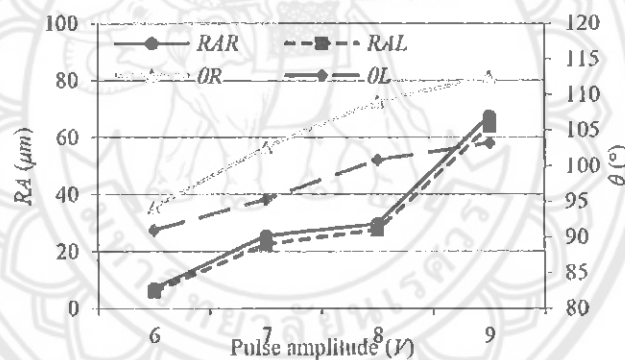
ในรูปที่ 2.12 ภาพของร่องขนาดไมโครที่ถูกกัดด้วยกระบวนการไมโคร ECM ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากับช่วงเวลาในการจ่าย pulse ที่แตกต่างกัน โดยวัดรัศมีของมุม RA และ มุมระหว่างผนังด้านข้าง (θ) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และช่วงเวลาในการจ่าย pulse ดังในตารางที่ 2.3 โดยความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีมุม (RA) และมุม (θ) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้านำมาแสดงเป็นกราฟได้ ดังในรูปที่ 2.13 และความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีมุม (RA) และมุม (θ) เทียบกับช่วงเวลาในการจ่าย pulse นำมาแสดงเป็นกราฟได้ ดังในรูปที่ 2.14



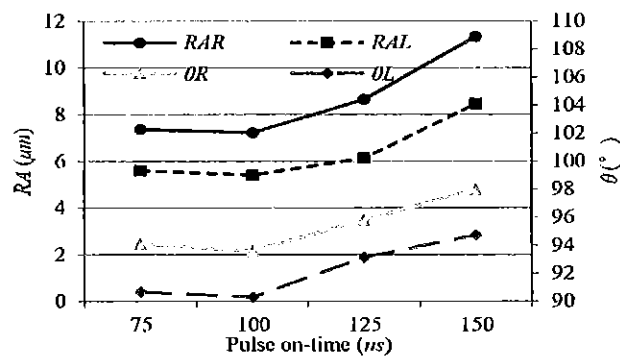
รูปที่ 2.12 ภาพของร่องขนาดไมโครที่ถูกกัดด้วยกระบวนการไมโคร ECM[6]

ตารางที่ 2.3 ค่าความแตกต่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และช่วงเวลาในการจ่าย pulse ที่มีผลต่อรัศมีของมุมและองศา

Groove No.	Voltage (V)	Pulse on-time (ns)
1	9	100
2	8	100
3	7	100
4	6	100
5	6	150
6	6	125
7	6	100
8	6	75



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่าง (RA) และ ความเร็วของผนังด้านข้าง (θ) เทียบกับแรงดันไฟฟ้า[6]

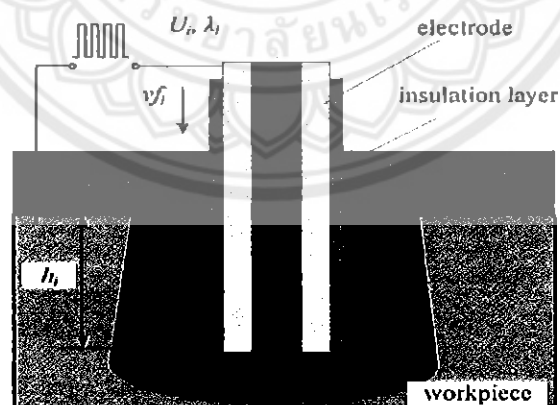


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงมุมระหว่างผนังด้านข้างกับพื้นผิวด้านล่าง (RA) และ ความเร็วของผนังด้านข้าง (θ) เทียบกับช่วงเวลาการจ่าย pulse[6]

ในรูปที่ 2.12(a) จะเห็นได้ว่าความเที่ยงตรงของมุม (RA) และมุม (θ) ในร่องที่ 4 ดีกว่าร่องที่ 1 ถึง ร่องที่ 3 ภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำลง ในรูปที่ 2.12(b) จากร่องที่ 5 ถึง ร่องที่ 8 จะเห็นได้ว่าความเที่ยงตรงในการกัดร่องดีขึ้นเมื่อเทียบกับร่องที่ 1 ถึงร่องที่ 4 ภายใต้แรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ ในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้า ช่วงเวลาในการจ่าย pulse เป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดรัศมีของมุม (RA) และมุม (θ) เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า และช่วงเวลาในการจ่าย pulse ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้รัศมีของมุม (RA) และมุม (θ) มีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้มีความเที่ยงตรงในการกัดร่องลดลง

2.3.2 งานวิจัยของ Guodong Liu และคณะ [7] ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโดยทำการทดลองด้วยกระบวนการกัดวัสดุไฟฟ้าเคมี (μ ECM) โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทำการทดลองเป็น โซเดียมคลอเรท (NaClO_3) ด้านชิ้นงานที่นำมาเจาะเป็นเหล็กในกลุ่ม Stainless steel (18CrNi8) และมีการติดตั้งฉนวน (Insulation) บริเวณด้านขอบด้านนอกของแท่งอิเล็กโทรดเพื่อปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพของการเจาะวัสดุ

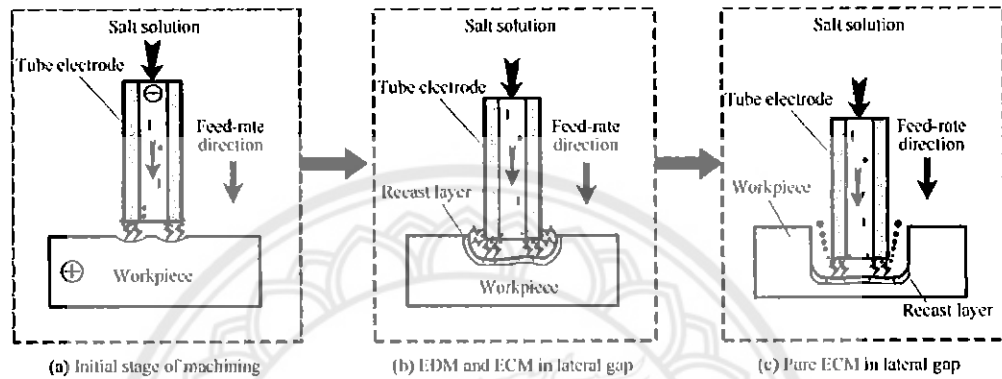
2.3.3 งานวิจัยของ Zhang Yan และคณะ [8] ประยุกต์ใช้กระบวนการ ECM ร่วมกับ EDM เป็น



รูปที่ 2.15 การเจาะหลุมเตเปอร์ขนาดไมโครโดยกระบวนการ (μ ECM) สารละลายไหลย้อนกลับ [8]

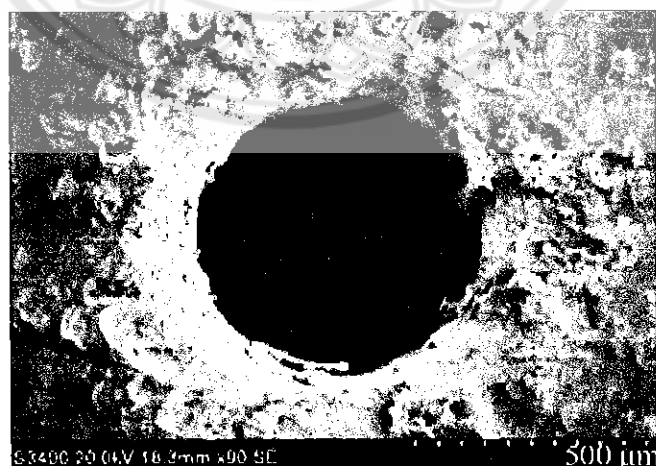
การนำเสนอการขึ้นรูปวัสดุ single-crystal superalloy ที่ใช้ในการผลิตใบพัดกังหันของเครื่องยนต์ไอพ่น ซึ่งมีความแข็งแรงมาก ขึ้นรูปกระบวนการ tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling (TSECDD) คือการประยุกต์ใช้กระบวนการ EDM ร่วมกับ ECM

หลักการคือ กระบวนการ tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling (TSECDD) จะเริ่มกัดวัสดุด้วยกระบวนการ EDM ต่อมาก็ใช้ EDM ผสมกับ ECM จนเมื่อขนาดของช่องว่างรอบขี้เหล็กโทรดขยายมากขึ้น ระบบก็จะเปลี่ยนไปใช้กระบวนการ ECM อย่างเดียว ดังในรูปที่ 2.16

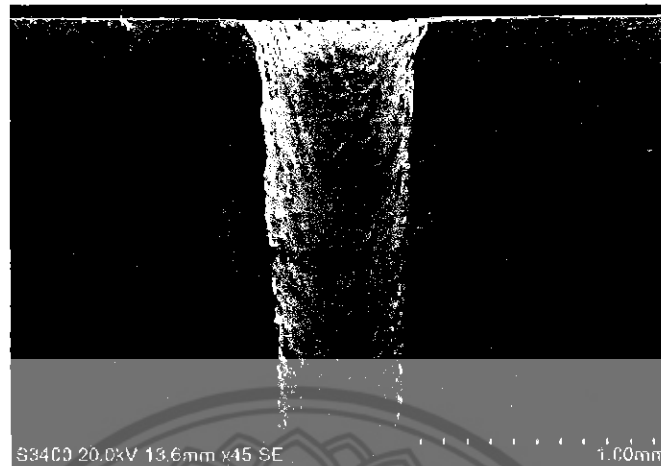


รูปที่ 2.16 กระบวนการการประยุกต์ใช้กระบวนการ EDM ร่วมกับ ECM (TSECDD) [4]

ทำการทดลองโดยการเจาะรูได้ชิ้นงานดังในรูปที่ 2.17 และ รูปที่ 2.18



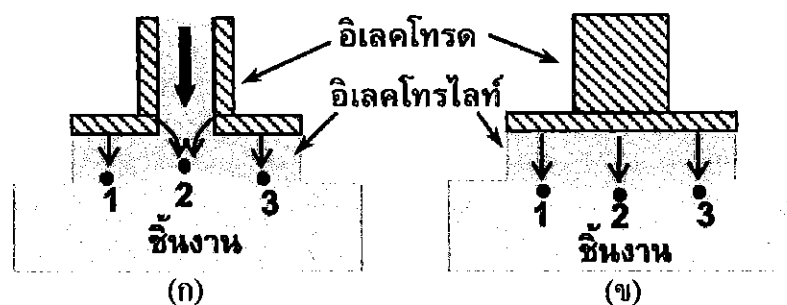
รูปที่ 2.17 ด้านบนของรูที่เจาะด้วย (TSECDD) [8]



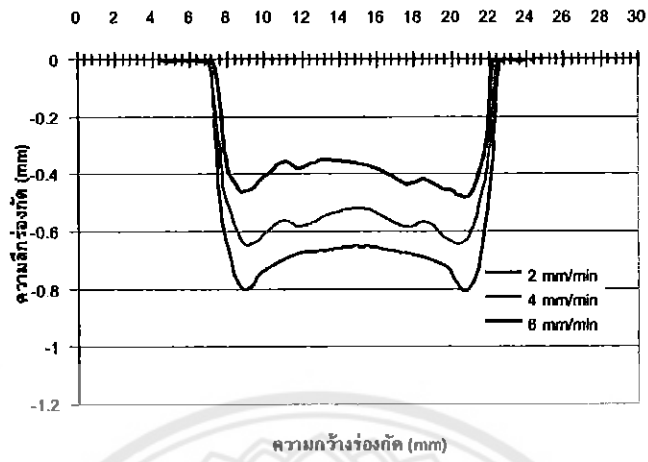
รูปที่ 2.18 ด้านข้างของรูที่เจาะด้วย (TSECDD)[8]

2.3.4 งานวิจัยของจิตติ พัทธวนิช [9] ทดลองและศึกษาถึงรูปร่างของร่องกัดที่ถูกสร้างจากกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกกลวงและตันที่ปลายมีลักษณะเป็นแผ่นกลม และใช้อัตราการป้อนอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน ใช้สารละลายโซเดียมไนเตรด (NaNO_3) ที่ความเข้มข้น 100 กรัม/ลิตรเป็นอิเล็กโทรไลต์ ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 17 โวลต์ ระยะห่างของอิเล็กโทรดและชิ้นงาน 0.2 มิลลิเมตร อัตราป้อนของอิเล็กโทรดที่ทำการทดลองเท่ากับ 2, 4 และ 6 มิลลิเมตร/นาที

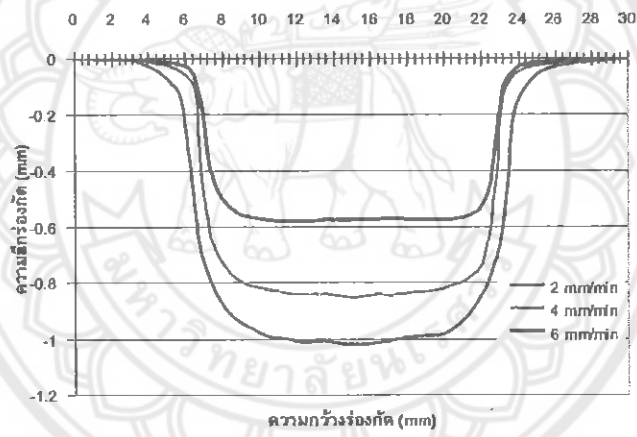
พบว่าในทุกอัตราป้อน ผิวร่องกัดจากการใช้อิเล็กโทรดทรงกลวงจะมีรูปร่างโค้งนูน โดยโค้งนูนเกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของร่องกัด ความกว้างและความลึกของร่องกัดที่บริเวณตรงกลางชิ้นงานมีค่ามากกว่าที่ทางเข้าและออก และร่องกัดที่ใช้อิเล็กโทรดทรงตันจะมีลักษณะผิวราบ ความกว้างและความลึกที่ค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.19 ลักษณะการกัดชิ้นงานของอิเล็กโทรด (ก) ทรงกลวง (ข) ทรงตัน[9]



รูปที่ 2.20 หน้าตัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงกลวง[9]



รูปที่ 2.21 หน้าตัดที่ถูกสร้างจากอิเล็กโทรดทรงตัน[9]

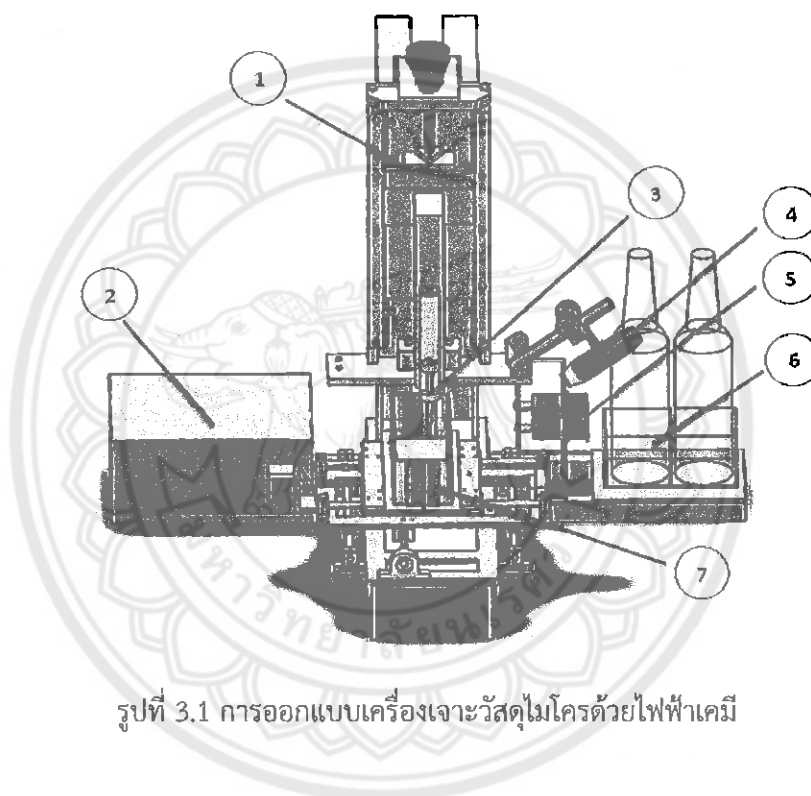
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

จากการศึกษาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี ได้ทำการออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองต่อจากรุ่นที่แล้ว โดยทำการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มาประกอบเข้ากับชุดการทดลองจากรุ่นที่แล้วที่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y และได้ทำการสร้างและประกอบชุดการทดลองที่มีการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน โดยการเคลื่อนที่ของทั้ง 3 แกนใช้ step motor เป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งในการสร้างชุดการทดลองนี้ได้เลือกใช้บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น TB6600 ซึ่งสามารถปรับกระแสและความละเอียดได้ และทำการทดลองการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แนวแกน โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y มีความละเอียดที่ 10 ไมโครเมตร การเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีความละเอียดที่ 6.3 ไมโครเมตร และในชุดการทดลองได้มีการติดตั้งกล่องไมโครสโคปเพื่อไว้บันทึกกระบวนการการเจาะ และได้เพิ่มชุดควบคุมความดันภายในสายยางจากรุ่นที่แล้วเพื่อให้แรงดันในการฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์คงที่ เมื่อสร้างชุดการทดลองพร้อมสำหรับการทดลองจึงออกแบบการทดลอง โดยการทดลองจะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิดประกอบไปด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ และสารละลายโซเดียมไนเตรด โดยทำการปรับเปลี่ยนค่า อัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรด ค่าความต่างศักย์ และความเข้มข้นของสารละลาย ให้รู้เจาะมีความเหมาะสมที่สุด จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้นำมาสรุปผล

3.1 ออกแบบระบบเจาะวัสดุระดับไมโคร

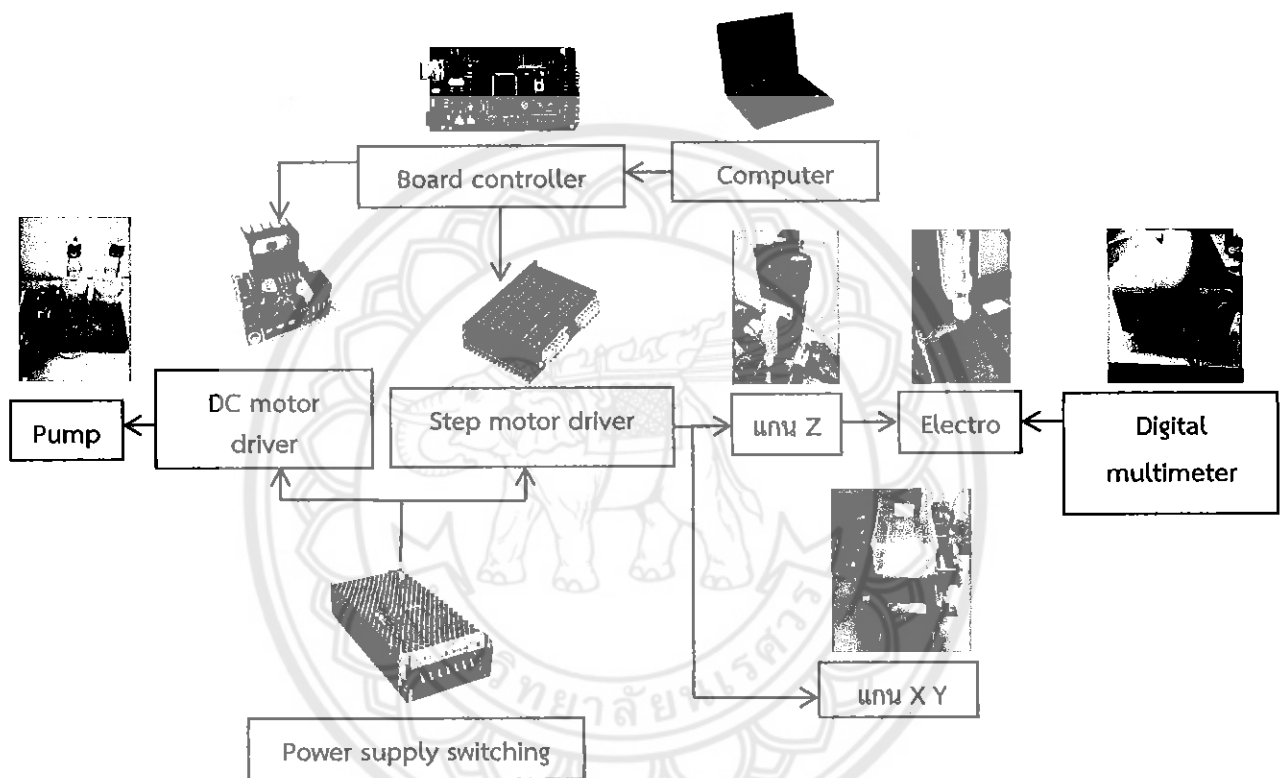
ในการออกแบบระบบการเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ โดยระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในแกน X Y และ Z จะใช้สเต็ปมอเตอร์ ระบบฉีดสารละลายโดยใช้ Peristaltic Pump และกล้องไมโครสโคป ทำหน้าที่จับภาพการเกิดปฏิกิริยาเคมี ระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมและสั่งการโดยใช้คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบเครื่องเจาะวัสดุไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี

1. แกน Z เป็นส่วนเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ของแท่งอิเล็กทรอนิกส์	5. Peristaltic Pump ทำหน้าที่ดูดสารละลาย
2. กล้องส่วนควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	6. ขวดบรรจุสารละลายอิเล็กทรอนิกส์
3. ตัวยึดแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ใช้ 3D ปริ้นเตอร์ในการสร้าง	7. แกน X Y เป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน
4. กล้องไมโครสโคป ทำหน้าที่ถ่ายภาพการเกิดปฏิกิริยา	

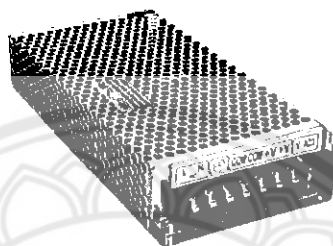
รูปที่ 3.2 กระบวนการเริ่มต้นที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยรับกระแสไฟฟ้าจาก Powersupply เพื่อไปควบคุมส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y Z และส่วนการฉีดสารละลายด้วย Peristaltic Pump ที่ดูดจากขวดบรรจุสารละลายทั้งสองขวด โดยขวดแรกเป็นอิเล็กโทรไลต์ก่อนทำปฏิกิริยากับสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้ว ในการทดลองมีการใช้ Powersupply ปรับค่าได้เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของกระบวนการกักตัวสดด้วยไฟฟ้าเคมี

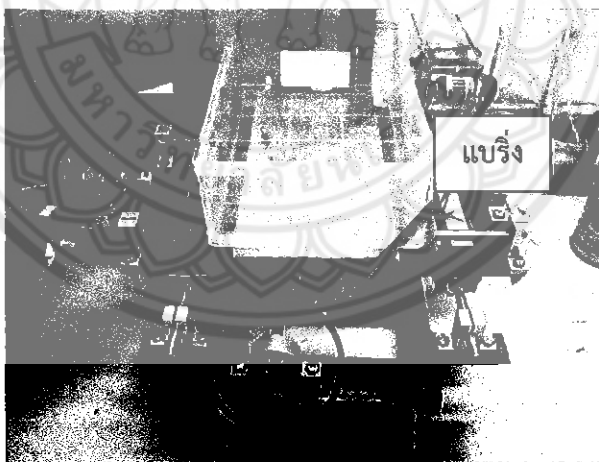
รูปที่ 3.3 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน X Y Z และการหมุนของ Peristaltic Pump สามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกน X Y Z ได้โดยการใส่อักขระตัว p และตามด้วยตำแหน่งของทั้ง 3 แกน เช่น p100,100,100 ดังรูปที่ 3.4 ทั้ง 3 แกนจะเคลื่อนที่ไป 100 สเต็ป และสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z แกนเดียวได้ด้วยการใส่อักขระตัว z ตามด้วยตำแหน่ง เช่น z100 ดังในรูปที่ 3.5 แกน Z จะเคลื่อนที่ไป 100 สเต็ป ในการควบคุมอัตราเร็วของปั๊มทำได้โดยการใส่อักขระตัว P และตามด้วยอัตราการหมุนของปั๊มทั้ง 2 ตัว เช่น P30,30 ดังในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.7 Power supply เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟให้กับบอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600 และบอร์ดขับ DC มอเตอร์ L298N ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และความเร็วรอบของปั๊ม คุณสมบัติของ Power supply มีหน้าที่ในการแปลงกระแสไฟฟ้าสลับขนาด 220 โวลต์ เป็นกระแสตรง 12 โวลต์



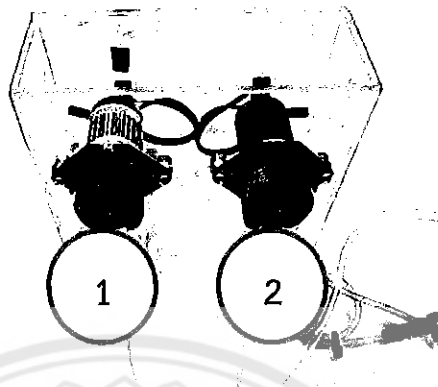
รูปที่ 3.7 Power supply ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแส

รูปที่ 3.8 ทำการปรับปรุง XY Stage โดยการเสริมแบริ่งที่ลึดสกรูช่วยควบคุมความผิดพลาดตามแนวแกน



รูปที่ 3.8 ชุดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบXY [11]

รูปที่ 3.9 Peristaltic Pump 2 ตัว มีการทำแท่นจับยึดด้วยแผ่นอะคริลิกเพื่อเป็นฐานให้กับปั๊ม โดยมีการควบคุมการทำงานของปั๊มด้วยบอร์ด Arduino ผ่านบอร์ดขับ DC มอเตอร์ L298N โดยปั๊มตัวที่ 1 จะทำหน้าที่ดูดสารละลายจากภาชนะรองรับสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำปฏิกิริยาแล้วกลับมายังขวดบรรจุสารละลาย ปั๊มตัวที่ 2 ทำหน้าที่ดูดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ยังไม่ผ่านการทำปฏิกิริยาและส่งไปยังแท่งอิเล็กโทรดเพื่อทำการฉีดสารละลายไปบนแผ่นชิ้นงาน



รูปที่ 3.9 ปุ่มที่ใช้ในการฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์[11]

รูปที่ 3.10 เป็นควบคุมดันภายในท่อสายยาง ทำงานโดยปั๊มจะส่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก่อนทำปฏิกิริยา เข้าไปยังชุดควบคุมแรงดัน โดยสายที่ออกจากชุดควบคุมแรงดันนั้นจะมีสองเส้น คือ ส่วนของสารละลายที่ส่งไปยังอิเล็กโทรด และส่วนที่กลับมายังสารละลายก่อนทำปฏิกิริยา สารละลายไหลกลับก็ต่อเมื่อความดันในสายส่งมีความดันสูง



รูปที่ 3.10 ชุดควบคุมความดันภายในท่อสายยาง[11]

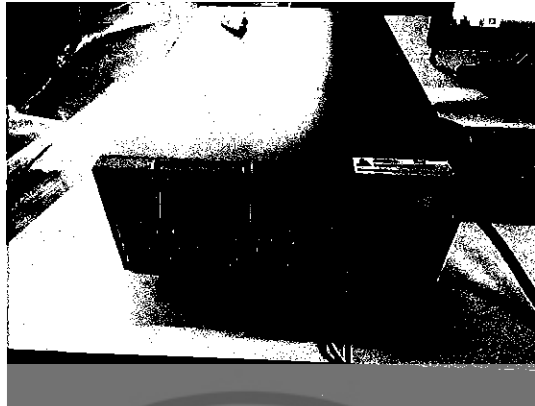
รูปที่ 3.11 Digital Power supply ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานและแท่งอิเล็กโทรด สามารถกำหนดค่าความต่างศักย์ตามที่ได้ออกแบบไว้โดยในการทดลองมีการปรับค่าความต่างศักย์ของสารอิเล็กโทรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ ไว้ที่ 5 7 9 และ 11 โวลต์ ส่วนโซเดียมไนเตรตตั้งไว้ 9 12 โวลต์ และกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1 แอมแปร์

19181541

14 ก.ย. 2560



สำนักหอสมุด



ฟรี
8485 ก
2559

รูปที่ 3.11 Digital Power supply ปรับค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าได้

ในการออกแบบชุดควบคุมในกระบวนการเจาะด้วยไฟฟ้าเคมี ประกอบไปด้วยการควบคุม การเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y และ Z การควบคุมอัตราการไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังรูปที่ 3.12 โดยในชุดควบคุมประกอบไปด้วย

หมายเลข 1 Power supply เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดควบคุมในวงจร

หมายเลข 2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก คอมพิวเตอร์แล้ว ส่งไป ยังส่วนควบคุมต่างๆ

หมายเลข 3 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600 ใช้ในการขับสเต็ปมอเตอร์ในแนวแกน Z

หมายเลข 4 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600 ใช้ในการขับสเต็ปมอเตอร์ในแนวแกน Y

หมายเลข 5 บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600 ใช้ในการขับสเต็ปมอเตอร์ในแนวแกน X

หมายเลข 6 สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

หมายเลข 7 สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

หมายเลข 8 สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

หมายเลข 9 บอร์ดขับมอเตอร์ DC ใช้ในการขับปั๊ม Peristaltic

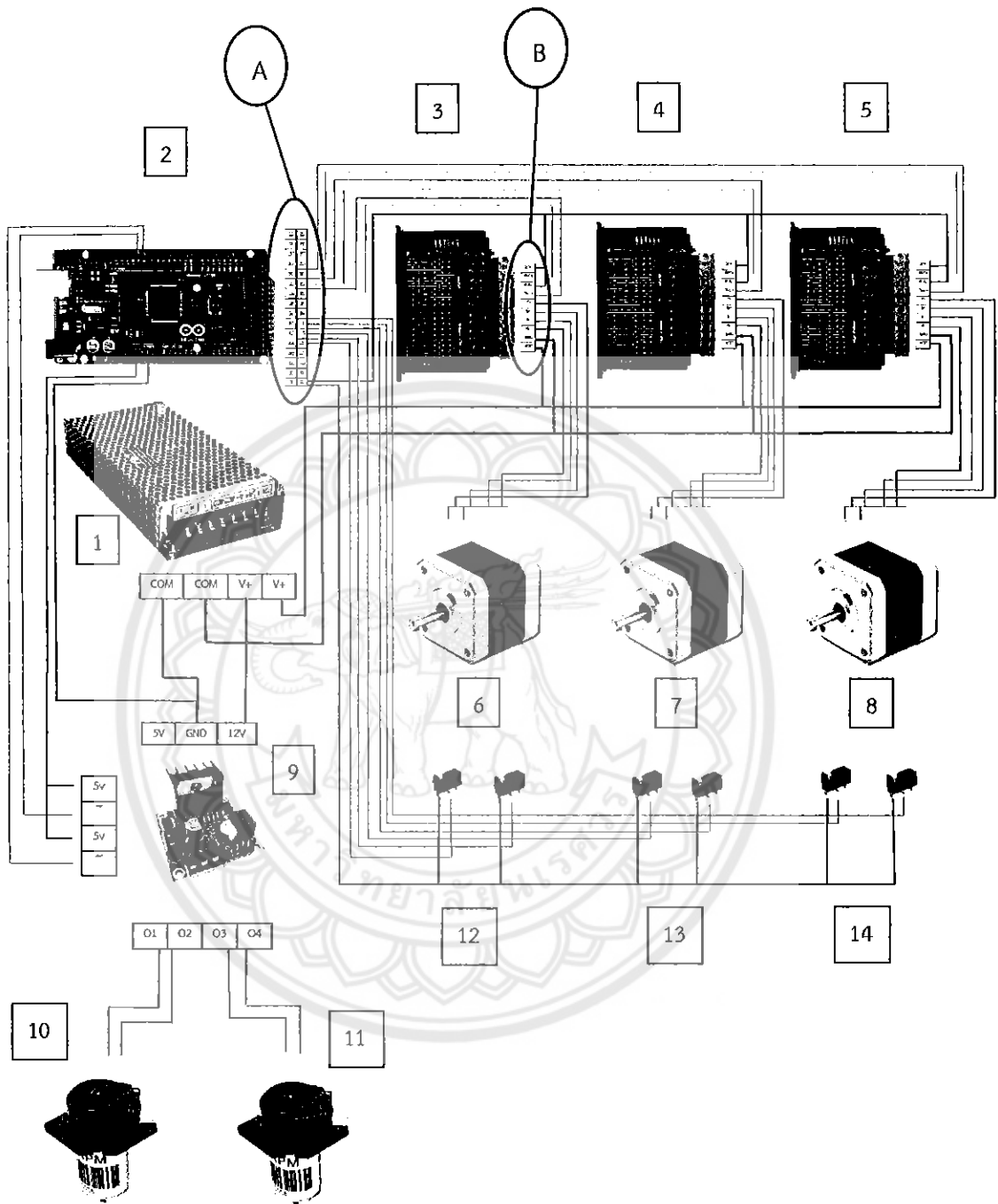
หมายเลข 10 ปั๊ม Peristaltic ใช้ในการฉีดสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการ

หมายเลข 11 ปั๊ม Peristaltic ใช้ในการดูดสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แล้ว

หมายเลข 12 limit switch ในแนวแกน Z

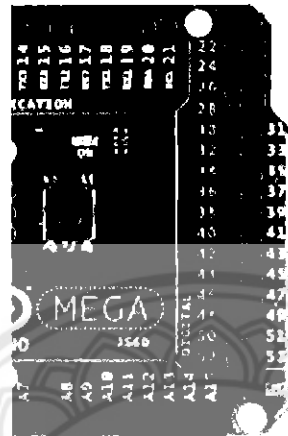
หมายเลข 13 limit switch ในแนวแกน Y

หมายเลข 14 limit switch ในแนวแกน X



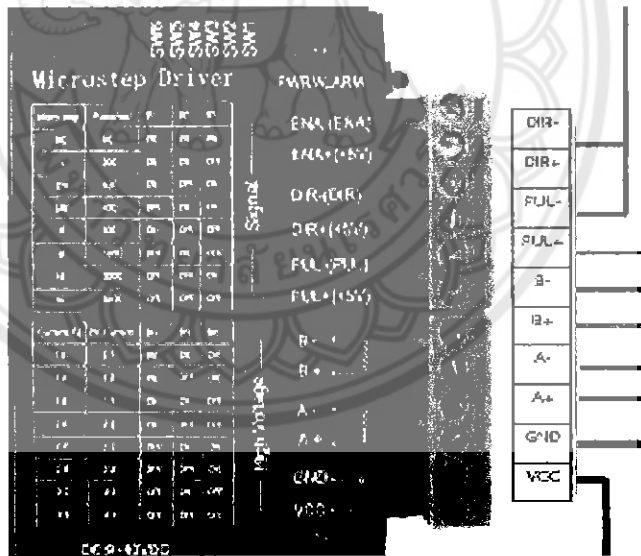
รูปที่ 3.12 ชุดควบคุมที่ใช้ในระบบการ

A



22	23
24	25
26	27
28	29
30	31
32	33
34	35
36	37
38	39
40	41
42	43
44	45
46	47
48	49
50	51
G	G

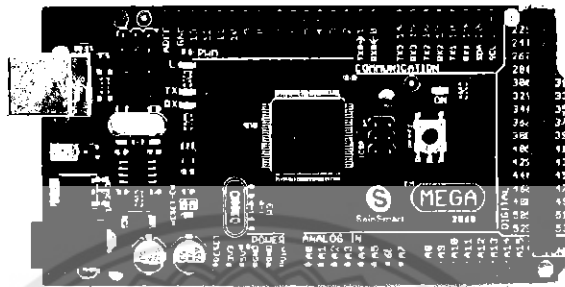
A



B

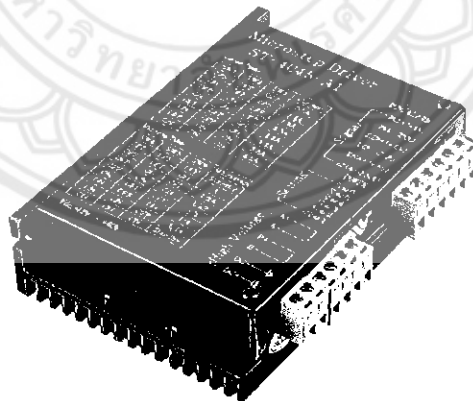
รูปที่ 3.13 ภาพขยายของ A และ B

รูปที่ 3.14 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA ทำหน้าที่รับสัญญาณจากคอมพิวเตอร์แล้วส่งไป ยังส่วนควบคุมบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ L298N และ TB6600



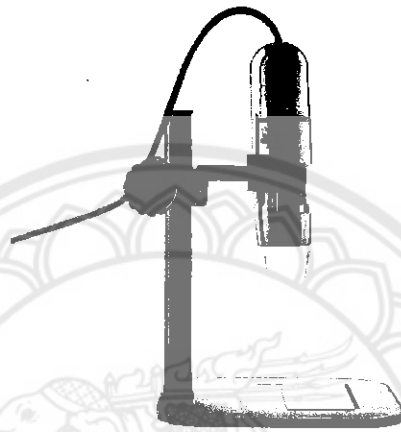
รูปที่ 3.14 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA

รูปที่ 3.15 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น TB6600 ทำหน้าที่รับสัญญาณจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA เพื่อไปควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ในแนวแกน X Y และ Z



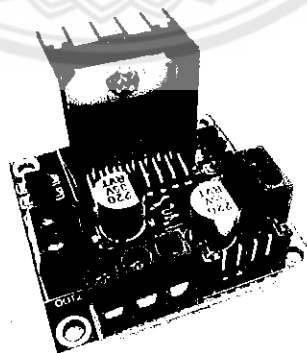
รูปที่ 3.15 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น TB6600

รูปที่ 3.16 กล้องไมโครสโคป ทำหน้าที่จับภาพการเกิดปฏิกิริยา ในระหว่างทำการเจาะวัสดุ และยังถูกใช้ในการถ่ายภาพชิ้นงานหลังจากทำการทดลองเสร็จ โดยภาพที่ได้นั้นมีความละเอียดสูง



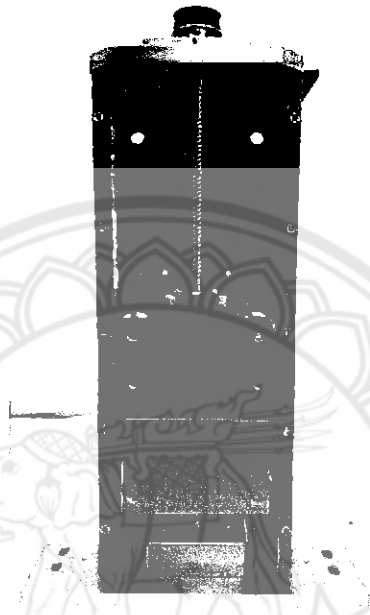
รูปที่ 3.16 กล้องไมโครสโคป

รูปที่ 3.17 บอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น L298N ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ในส่วนของ Peristaltic Pump 2 ตัว ที่มีหน้าที่ฉีดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังอิเล็กโทรดและดูดสารละลายกลับจากส่วนทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.17 บอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น L298N

รูปที่ 3.18 แกน Z สำเร็จรูปโดยประกอบไปด้วยวีแบริง และลิตสกรูที่มีระยะพิตซ์ 10 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ระยะเคลื่อนที่ 175 มิลลิเมตร ขับโดยสเต็ปมอเตอร์ 3.49 แอมแปร์



รูปที่ 3.18 แกน Z สำเร็จรูป

รูปที่ 3.19 ปุ่มที่ใช้ในการฉีดสารอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Peristaltic pump โดยมี 2 ตัว รับคำสั่งโดยบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น L298N ทำหน้าที่ฉีดสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ไปยังอิเล็กทรอนิกส์และดูดสารละลายกลับจากส่วนทำปฏิกิริยาแล้ว



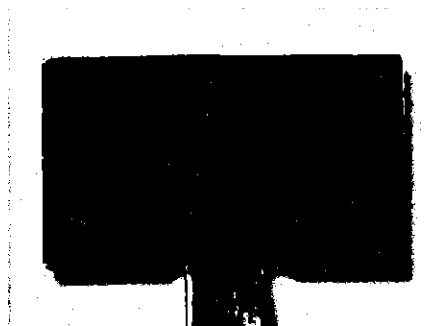
รูปที่ 3.19 ปุ่มที่ใช้ในการฉีดสารอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Peristaltic pump

รูปที่ 3.20 ภาพของเข็มที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด ซึ่งอยู่บริเวณแกน Z โดยเข็มที่ใช้มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร ที่ทำการฝนปลายเข็มแล้ว



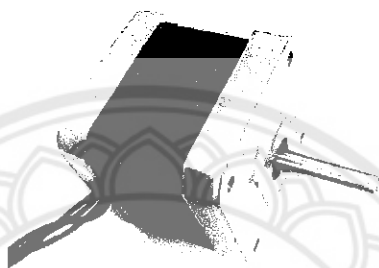
รูปที่ 3.20 ภาพของเข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด

รูปที่ 3.21 ชิ้นงานที่ใช้ในการเจาะชนิด Stainless Steel ความหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยก่อนที่ทำการเจาะได้ทำการขัดผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.21 ภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบชนิด Stainless Steel

รูปที่ 3.22 ภาพ Stepper Motor รับคำสั่งมาจากบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ TB6600 ที่ใช้ในการขับเคลื่อน X Y โดยเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ของชิ้นงาน โดยมีความละเอียดอยู่ที่ 10 ไมโครเมตร



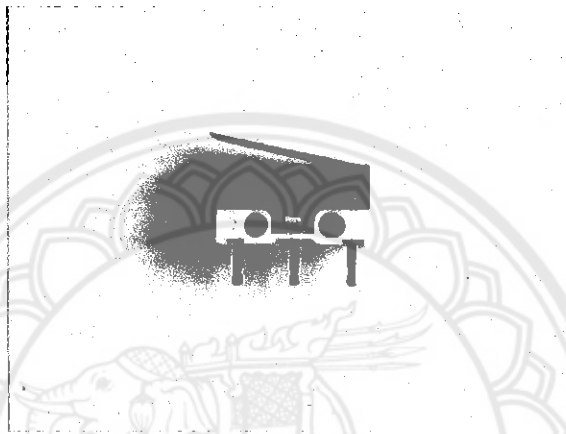
รูปที่ 3.22 ภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อน X Y

รูปที่ 3.23 ภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อน Z โดยรับคำสั่งมาจากบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ TB6600 ที่ใช้ในการขับเคลื่อน Z โดยเป็นส่วนการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีความละเอียดอยู่ที่ 6.3 ไมโครเมตร



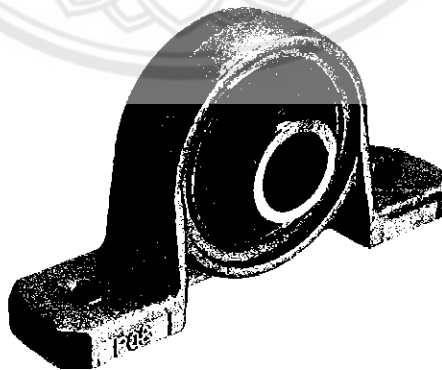
รูปที่ 3.23 ภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อน Z

รูปที่ 3.24 ภาพ Limit Switch โดยจะติดตั้งไว้ที่ส่วนขับเคลื่อนแกน X Y Z แกนละ 2 ตัว โดยมีหน้าที่หยุดการเลื่อนที่แต่ละแนวแกน เมื่อถึงขีดจำกัดการเคลื่อนที่



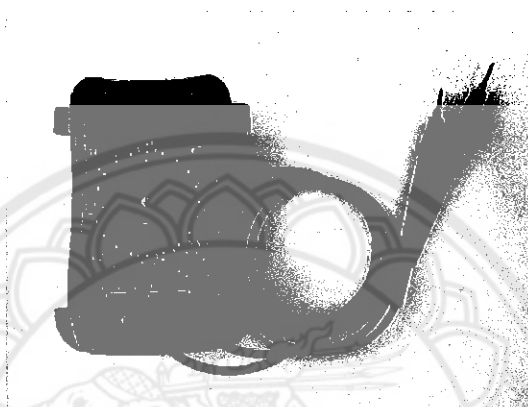
รูปที่ 3.24 ภาพ Limit Switch

รูปที่ 3.25 ภาพ Bearing โดยจะถูกติดตั้งบนแกน X Y ด้านปลายของลีดสกรู เพื่อเสริมความมั่นคงให้กับ แนวแกน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ทั้งหมด 2 ตัว



รูปที่ 3.25 ภาพ Bearing

รูปที่ 3.26 ภาพมัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์ และกระแสไฟฟ้าของระบบ โดยเราจะใช้วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่ปล่อยออกมาจากบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ วัดค่าความต้านทานไฟฟ้า และใช้ตรวจสอบความบกพร่องในสายไฟ



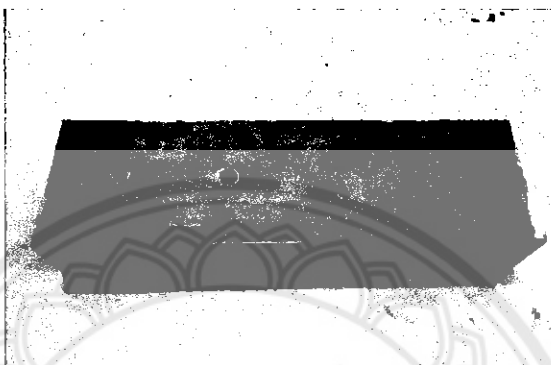
รูปที่ 3.26 ภาพมัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์ และกระแสไฟฟ้าของระบบ

รูปที่ 3.27 ภาพเหล็กฉากที่ใช้ทำโครงสร้างสำหรับยึดแกน Z โดยมีความหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำมาต่อกันโดยการเชื่อมโลหะ ตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อทำการประกอบเสร็จแล้วได้ทำการลงสีบนโครงสร้าง



รูปที่ 3.27 ภาพเหล็กฉากที่ใช้ทำโครงสร้างสำหรับยึดแกน Z

รูปที่ 3.28 ภาพเหล็กรงน้ำที่ใช้สำหรับเป็นฐานของ Micro ECM โดยส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นฐานรองระบบทั้งระบบ โดยจะมี Stage X Y วางอยู่ด้านบน โดยจะถูกยึดกับโครงสร้าง ที่แกน Z มีแผ่นยางรองเพื่อลดการสั่นของมอเตอร์



รูปที่ 3.28 ภาพเหล็กรงน้ำที่ใช้สำหรับเป็นฐานของ Micro ECM

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ทำการติดตั้งชิ้นงานบนแท่นยึดชิ้นงาน โดยจะนำขั้วบวกติดเข้ากับชิ้นงาน และขั้วลบติดเข้ากับแท่งอิเล็กโทรด จากนั้นทำการเคลื่อนที่แท่งอิเล็กโทรดมายังชิ้นงานโดยกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งเริ่มต้น

3.2.2 ตำแหน่งในการเจาะของแต่ละรู โดยแต่ละรูที่ทำการเจาะนั้นจะมีระยะห่างของแต่ละแถวเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละหลักเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ก่อนทำการเจาะจะยกแท่งอิเล็กโทรดให้ห่างจากชิ้นงาน 150 ไมโครเมตร

3.2.3 ทำการฉีดสารละลายโดยปั๊มสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยผ่าน Peristaltic Pump

3.2.4 ทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจาก Digital Power supply

3.2.5 ค่อยๆเคลื่อนแกน Z ลงมาตามความเร็วที่กำหนดจนกระทั่งชิ้นงานทะลุ เมื่อทะลุ แล้ว จึงจะยกแท่งอิเล็กโทรดขึ้นกลับไปตำแหน่งเดิม

ในการทดลองจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเจาะรูระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษามี อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด ความต่างศักย์ไฟฟ้า และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การทดลองทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 และ 0.15 โมลาร์ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์ โดยที่ขั้วลบจะทำการติดตั้งในส่วนของแท่งอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 550 ไมโครเมตร และขั้วลบจะติดตั้งในส่วนของชิ้นงาน ที่เป็นแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มีการทดลอง 2 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดตามรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การทดลองรูปแบบที่ 1 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ตารางที่ 3.1 เป็นการออกแบบการทดลองการเจาะวัสดุโดยจะทำการปรับค่าความต่างศักย์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด และความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 0.1 และ 0.15 โมลาร์ ทำการเจาะรูตามลำดับดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที โดยจะมีเก็บค่า อัตราการไหลของสารละลาย กระแสไฟฟ้า ระยะการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด และเวลาในการเจาะทะลุ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 ลำดับการทดสอบการเจาะโดยสารละลาย (NaCl) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.15 โมลาร์

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	5	10
5-8	5	20
9-12	7	10
13-16	7	20
17-20	9	10
21-24	9	20
25-28	11	10
29-32	11	20

หมายเหตุ รูที่ 4 8 12 16 20 24 28 และ 32 ทำการเจาะโดยเมื่อเจาะทะลุแล้วยังไม่หยุดการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด จนกว่าแท่งอิเล็กโทรดจะเคลื่อนที่ลงมาต่ำกว่าผิวล่างชิ้นงาน

รูป 3.29 และ 3.30 ตำแหน่งการเจาะรูของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ และ 0.15 โมลลาร์ โดยแต่ละรูที่ทำการเจาะนั้นจะมีระยะห่างของแต่ละแถวเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละหลักเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร ในระหว่างทำการเจาะนั้นจะทำการเก็บข้อมูล ค่ากระแสไฟฟ้า อัตราการไหล และอัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด เพื่อนำไปวิเคราะห์

1 .	5 .	9 .	13 .	17 .	21 .	25 .	29 .
2 .	6 .	10 .	14 .	18 .	22 .	26 .	30 .
3 .	7 .	11 .	15 .	19 .	23 .	27 .	31 .
4 .	8 .	12 .	16 .	20 .	24 .	28 .	32 .

รูปที่ 3.29 ลำดับในการเจาะรูที่ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลลาร์

1 .	5 .	9 .	13 .	17 .	21 .	25 .	29 .
2 .	6 .	10 .	14 .	18 .	22 .	26 .	30 .
3 .	7 .	11 .	15 .	19 .	23 .	27 .	31 .
4 .	8 .	12 .	16 .	20 .	24 .	28 .	32 .

รูปที่ 3.30 ลำดับในการเจาะรูที่ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลลาร์

การทดลองรูปแบบที่ 2 สารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3)

ตารางที่ 3.2 เป็นการออกแบบการทดลองการเจาะวัสดุโดยทำการปรับค่า ความต่างศักย์ และความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้อยู่ที่ 0.1 และ 0.15 โมลาร์ ทำการเจาะรูตามลำดับดังรูปที่ 3.31 จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที โดยมีการบันทึกค่า อัตราการไหลของสารละลาย กระแสไฟฟ้า ระยะการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด และเวลาในการเจาะทะลุ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อนำมาวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 ลำดับการทดสอบการเจาะโดยสารละลาย (NaNO_3) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.15 โมลาร์

การทดลองที่	ความต่างศักย์(โวลต์)	ความเข้มข้นของสารละลาย(โมลาร์)	อัตราการเคลื่อนอิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	9	0.1	8
5-8	12	0.1	8
9-12	9	0.15	8
13-16	12	0.15	8

หมายเหตุ รูที่ 4 8 12 และ 16 ทำการเจาะโดยเมื่อเจาะทะลุแล้วยังไม่หยุดการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด จนกว่าแท่งอิเล็กโทรดจะเคลื่อนที่ลงมาต่ำกว่าผิวล่างชิ้นงาน



รูปที่ 3.31 ลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-16 บนแผ่นสแตนเลส

หมายเหตุ ในการทดลองที่ความต่างศักย์ 9 และ 12 โวลต์ ที่อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที ไม่สามารถใช้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที เจาะจนทะลุได้ เนื่องจากปฏิกิริยาในการกัดวัสดุซ้ำ ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กโทรด กับชิ้นงาน ส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยา จึงเปลี่ยนไปใช้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ 8 ไมโครเมตรต่อนาที

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบการทำงานของระบบ

4.1.1 ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +X และ -X

จากที่ได้ทำการประกอบชุดอุปกรณ์ทั้งหมด จึงได้ทำการวัดค่าความเที่ยงตรงของสเต็ปมอเตอร์ แกน X โดยทำการปรับไมโครสเต็ปที่ 800 และทำการวัดค่าทุกๆ 10 มิลลิเมตร โดยทดสอบทั้งไปและกลับแล้วนำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ย โดยทำการทดลองเคลื่อนที่แกน X เป็นระยะ 50 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 เฉลี่ยแล้วระยะ +X มีค่าเท่ากับ 9.98 มิลลิเมตร และระยะ -X มีค่าเท่ากับ 9.998 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +X

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	1001	9.99	9.98	0.045
20	1998	10.01		
30	3000	10		
40	3998	10		
50	5001	9.9		

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน -X

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	998	10	9.99	0.004
20	1999	10		
30	3000	10		
40	4001	9.99		
50	4999	10		

4.1.2 ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Y และ -Y

วัดค่าความเที่ยงตรงของสแตปมอเตอร์ แกน Y โดยทำการปรับไมโครสแตปที่ 800 และทำการวัดค่าทุกๆ 10 มิลลิเมตร โดยทดสอบทั้งไปและกลับแล้วนำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ย โดยทำการทดลองเคลื่อนที่แกน Y เป็นระยะ 50 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4 เฉลี่ยแล้วระยะ +Y มีค่าเท่ากับ 9.97 มิลลิเมตร และระยะ -Y มีค่าเท่ากับ 9.996 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Y

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	1003	9.97	9.97	0.042
20	2000	10		
30	2997	10		
40	4002	9.99		
50	5001	9.9		

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน -Y

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	1001	9.99	9.996	0.005
20	1998	10		
30	2999	10		
40	4002	9.99		
50	4995	10		

4.1.3 ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Z และ -Z

วัดค่าความเที่ยงตรงของสเต็ปมอเตอร์ แกน Z โดยทำการปรับไมโครสเต็ปที่ 3200 และทำการวัดค่าทุกๆ 10 มิลลิเมตร โดยทดสอบทั้งไปและกลับแล้วนำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ย โดยทำการทดลองเคลื่อนที่แกน Z เป็นระยะ 50 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6 เฉลี่ยแล้วระยะ +Z มีค่าเท่ากับ 6.3 มิลลิเมตร และระยะ -Z มีค่าเท่ากับ 6.29 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน +Z

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	1600	6.25	6.3	0.043
20	3192	6.26		
30	4726	6.34		
40	6314	6.33		
50	7895	6.33		

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ในแนวแกน - Z

ระยะ (mm)	step	ระยะที่เคลื่อนที่ 1 step	เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
10	1604	6.23	6.29	0.049
20	3174	6.30		
30	4788	6.26		
40	6318	6.33		
50	7873	6.35		

1mm = 160.4 step
 0.1mm = 16.04 step
 (160.4 step)

4.1.4 การทดสอบระบบการทำงานของปั๊ม

ในการทดสอบความเสถียรของปั๊ม โดยทำการทดสอบแต่ละความเร็วรอบว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ความเร็วรอบที่ใช้ในการทดสอบจะทำการปรับค่า PWM ที่ 25 30 35 และ 40 และวิเคราะห์อัตราการไหลเฉลี่ย ดังตารางที่ 4.7 4.8 4.9 และ 4.10 เป็นการวัดอัตราการไหลของสารละลายที่ปริมาตร 500 มิลลิตร แล้วทำการจับเวลาทุกๆ 100 มิลลิตร แล้วนำมาคิดเป็นอัตราการไหล

ตารางที่ 4.7 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 25

ครั้ง	PWM	ปริมาตรสาร(ml)	เวลา(min)	อัตราการไหล	อัตราการไหลเฉลี่ย(ml)/ (min)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	25	100	4.56	21.93	23.39	1.047
2	25	100	4.41	22.68		
3	25	100	4.18	23.92		
4	25	100	4.17	23.98		
5	25	100	4.09	24.45		

ตารางที่ 4.8 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 30

ครั้ง	PWM	ปริมาตรสาร(ml)	เวลา(min)	อัตราการไหล	อัตราการไหลเฉลี่ย (ml)/ (min)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	30	100	3.35	29.85	29.67	0.642
2	30	100	3.46	28.90		
3	30	100	3.42	29.24		
4	30	100	3.36	29.76		
5	30	100	3.27	30.58		

ตารางที่ 4.9 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 35

ครั้ง	PWM	ปริมาตรสาร(ml)	เวลา(min)	อัตราการไหล	อัตราการไหลเฉลี่ย (ml)/ (min)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	35	100	3.27	30.58	31.72	0.788
2	35	100	3.20	31.25		
3	35	100	3.10	32.26		
4	35	100	3.08	32.47		
5	35	100	3.12	32.05		

ตารางที่ 4.10 ตารางทดสอบอัตราการไหลของปั๊มที่ PWM 40

ครั้ง	PWM	ปริมาตรสาร(ml)	เวลา(min)	อัตราการไหล	อัตราการไหล เฉลี่ย(ml)/ (min)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
1	40	100	2.5	40.00	40.84	1.006
2	40	100	2.39	41.84		
3	40	100	2.39	41.84		
4	40	100	2.45	40.82		
5	40	100	2.52	39.68		

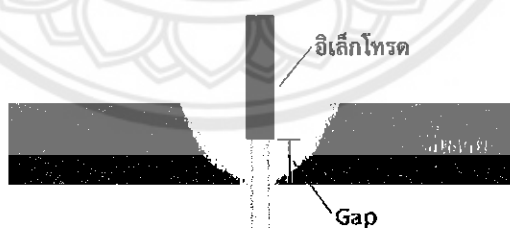
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการเจาะระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมีหรือ ECM จากชุดการทดลองที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะ ขนาดของรูเจาะ และความเรียบของผิวชิ้นงาน ค่าพารามิเตอร์ มีดังนี้

- ชนิดของสารประกอบไปด้วย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)
- ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์
- อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด ที่โซเดียมคลอไรด์ใช้ 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาทีและโซเดียมไนเตรทใช้ 8 ไมโครเมตรต่อนาที
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ใช้ที่ 5 7 9 และ 11 โวลต์ ส่วน โซเดียมไนเตรทใช้ที่ 9 และ 12 โวลต์
- อิเล็กโทรดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร

การเก็บค่าจากทดลองประกอบไปด้วย

- เวลาที่ใช้เจาะ (นาที)
- Gap หรือช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานการวัดระยะของ Gap ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Gap หรือช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน

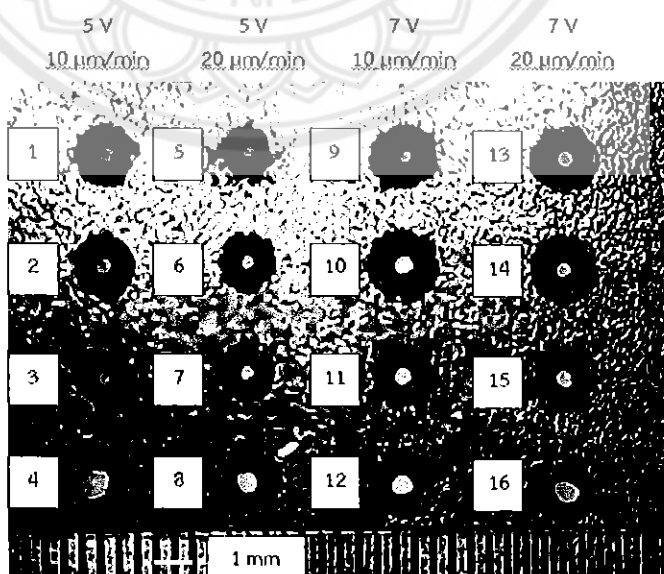
การวัดขนาดตำแหน่งของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) และขนาดรูเจาะที่ผิวล่างของชิ้นงาน (DH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังรูปที่ 4.2



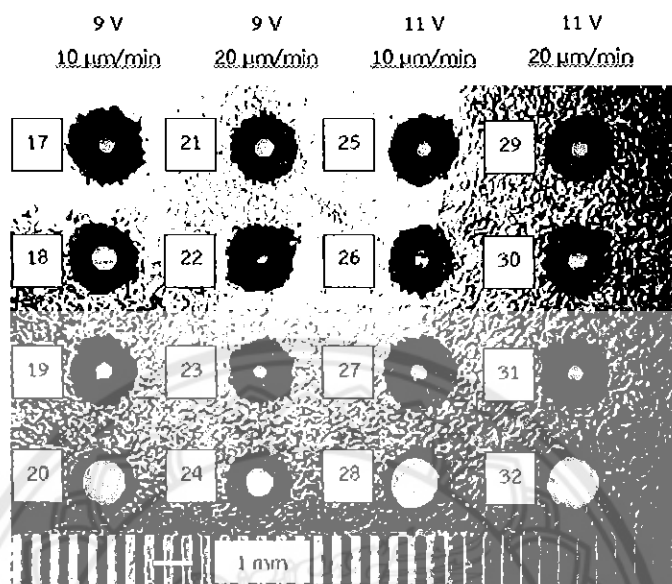
รูปที่ 4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) และขนาดรูเจาะ (DH)

4.3 ผลการทดลอง โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

การทดลองแผ่นที่ 1 และ 2 ใช้โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ในรูปที่ 1-8 และความต่างศักย์ 7 โวลต์ ในรูปที่ 9-16 อัตราเร็วของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ที่รูป 1-4 และ 9-12 อัตราเร็วของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ที่รูป 5-8 และ 13-16 ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.3 รูเจาะครั้งที่ 1-17 NaCl 0.1 โมลาร์ (แผ่นที่ 1)

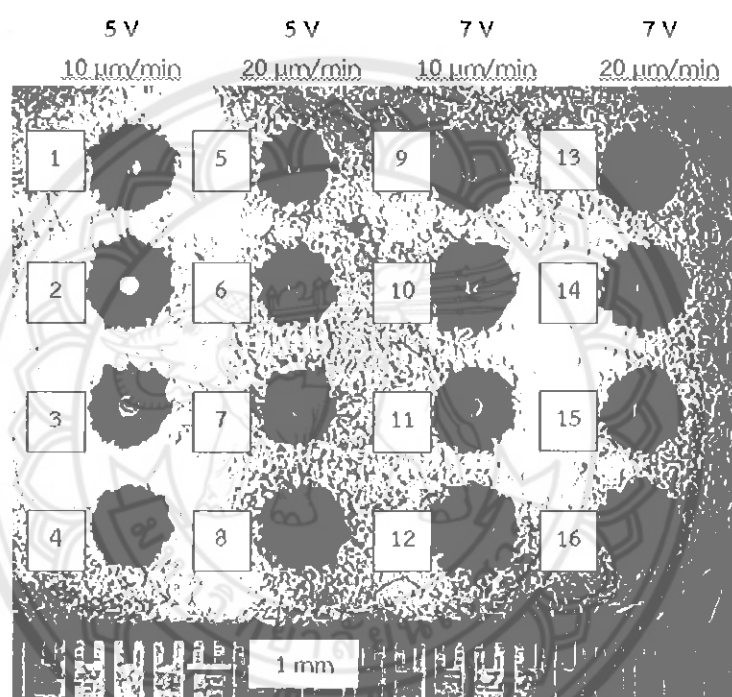


รูปที่ 4.4 รูเจาะครั้งที่ 17-32 NaCl 0.1 โมลาร์ (แผ่นที่ 2)

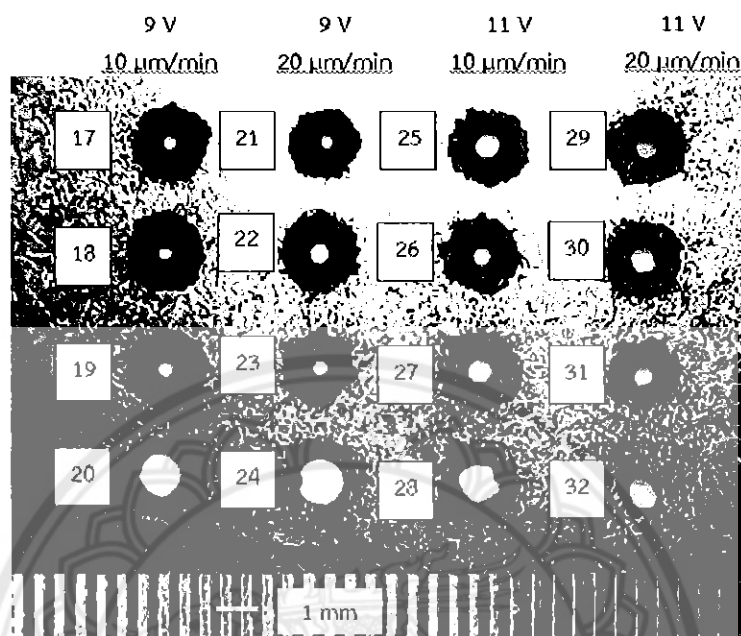
รูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นการเจาะโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และปรับค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า รูเจาะที่ 1-8 เป็นความต่างศักย์ที่ 5 โวลต์ รูเจาะที่ 9-16 เป็นความต่างศักย์ที่ 7 โวลต์ รูเจาะที่ 17-24 เป็นความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ และรูเจาะที่ 25-32 เป็นความต่างศักย์ที่ 11 โวลต์ สิ่งที่เกิดขึ้นได้คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานรูปที่ 4.3 มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่ารูปที่ 4.4 เพราะแผ่นที่สองนั้นใช้ความต่างศักย์สูงกว่า แสดงว่าค่าความต่างศักย์นั้นส่งผลต่อการเจาะ ในการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่าส่วนของรูที่ 4 8 12 16 20 24 28 และ 32 จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าทุกรูเนื่องมาจากการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด ไปที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าผิวล่างของชิ้นงาน ใช้ระยะเวลาและปฏิกิริยาทางเคมีที่นานกว่ารูอื่นๆ จึงทำให้รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่

4.4 ผลการทดลอง โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์

การทดลองแผ่นที่ 3 และ 4 ใช้โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ในรูปที่ 1-8 และความต่างศักย์ 7 โวลต์ ในรูปที่ 9-16 อัตราเร็วของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ที่รูป 1-4 และ 9-12 อัตราเร็วของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ที่รูป 5-8 และ 13-16 ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.5 รูเจาะครั้งที่ 1-16 NaCl 0.15 โมลาร์ (แผ่นที่ 3)



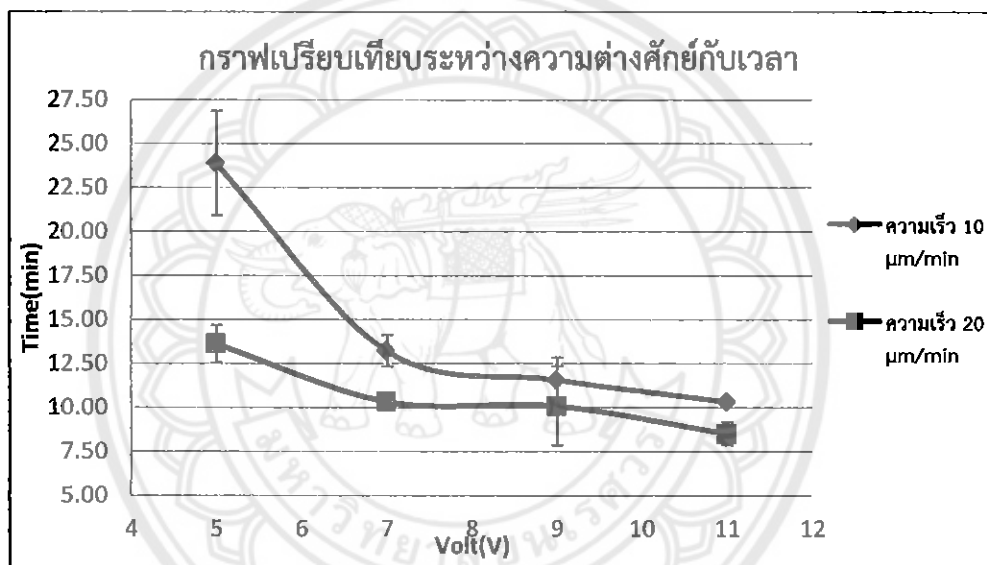
รูปที่ 4.6 รูเจาะครั้งที่ 17-32 NaCl 0.15 โมลาร์ (แผ่นที่ 4)

รูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการเจาะโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ และปรับค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า รูเจาะที่ 1-8 เป็นความต่างศักย์ที่ 5 โวลต์ รูเจาะที่ 9-16 เป็นความต่างศักย์ที่ 7 โวลต์ รูเจาะที่ 17-24 เป็นความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ และรูเจาะที่ 25-32 เป็นความต่างศักย์ที่ 11 โวลต์ สิ่งที่สังเกตเห็นได้คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานรูปที่ 4.6 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าและผิวของรูเจาะมีสภาพที่ขรุขระมากกว่า รูปที่ 4.5 อย่างเห็นได้ชัด เพราะแผ่นที่สองนั้นใช้ความต่างศักย์สูงกว่า แสดงว่าค่าความต่างศักย์นั้นส่งผลต่อการเจาะในการทดลองนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนของรูที่ 4 8 12 16 20 24 28 และ 32 จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าทุกๆ รู เนื่องมาจากการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด ไปที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าผิวล่างของชิ้นงานใช้ระยะเวลาและปฏิกิริยาทางเคมีที่นานกว่ารูอื่นๆ จึงทำให้รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า

4.5 เปรียบเทียบการทดลองโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์

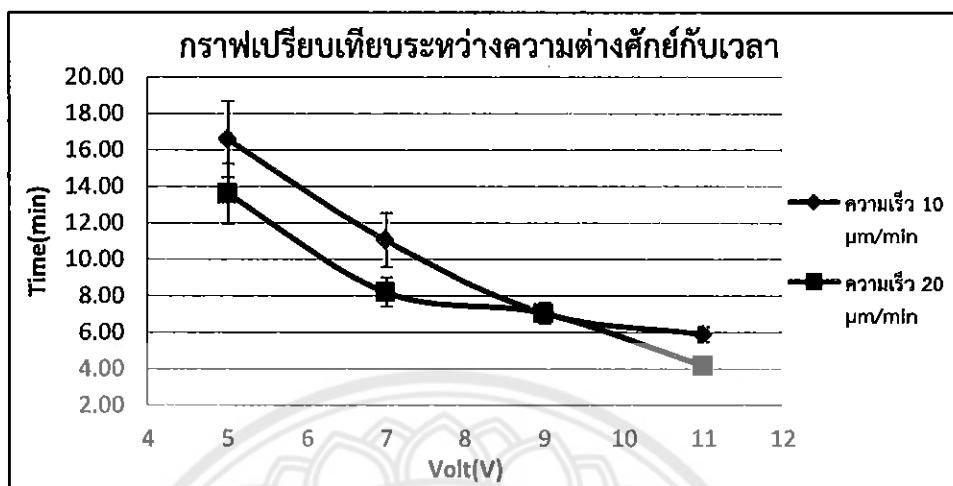
4.5.1 เวลาที่ใช้เจาะ (Time) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

เปรียบเทียบเวลาที่ใช้เจาะกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระหว่างอัตราเร็วของแท่งเล็กโทรดคือ 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ การจับเวลาจะจับเวลาทุก 5 นาที ตั้งแต่เริ่มจนจบการเจาะของแต่ละความต่างศักย์ เพื่อเปรียบเทียบว่าการใช้ความต่างศักย์ที่ต่างกันมีผลต่อเวลาที่ใช้เป็นอย่างไร



กราฟที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

กราฟที่ 4.1 สังเกตได้ชัดว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้น เวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะใช้เวลาเฉลี่ยในการเจาะทะลุ 10.64 นาทีต่อหนึ่งรู น้อยกว่าที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ย 14.75 นาที



กราฟที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-32 ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์

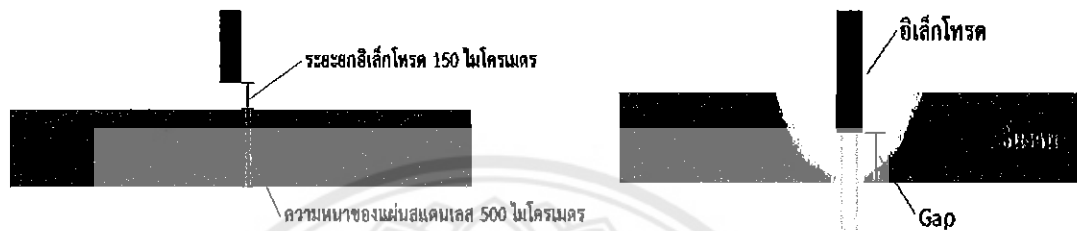
กราฟที่ 4.2 สังเกตได้ชัดว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆนั้น เวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้น โดยเฉพาะแล้วที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะใช้เวลาเฉลี่ยในการเจาะให้ทะลุ 8.27 นาทีต่อหนึ่งรู น้อยกว่าที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ย 10.15 นาที แต่ในความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ เวลาที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกันมากโดยที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลา 7.04 นาที และอัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลา 7.06 นาที ซึ่งอาจเป็นเพราะการสังเกตเห็นน้ำที่พุ่งลงโดยทันที จึงทำให้หยุดกระบวนการเลยส่งผลให้เวลามีค่าใกล้เคียงกัน

เปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ 4.1 กับกราฟที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการเจาะ โดยความเข้มข้นมากขึ้นเวลาที่ใช้เจาะลดลง และเวลาในการเจาะลดลงตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย ยกตัวอย่างเช่น ที่อัตราเร็วและความต่างศักย์เท่ากัน ที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาทีและ 5 โวลต์ ตามลำดับ ความเข้มข้นที่ 0.1 โมลาร์ ใช้เวลา 23.88 นาที ส่วนความเข้มข้นที่ 0.15 โมลาร์ ใช้เวลา 16.59 นาที

4.5.2 Gap หรือ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

การเปรียบเทียบช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานกับความต่างศักย์ไฟฟ้า ของโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ที่ระหว่างอัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรดคือ 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.3 และ 4.4

ตัวอย่างการหาคำนวนหาช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยระยะยกยกของแท่งอิเล็กโทรดรวมกับความหนาของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 650 ไมโครเมตร จะนำมาลบกับระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ได้เป็นระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานด้านล่าง ดัง รูปที่ 4.7

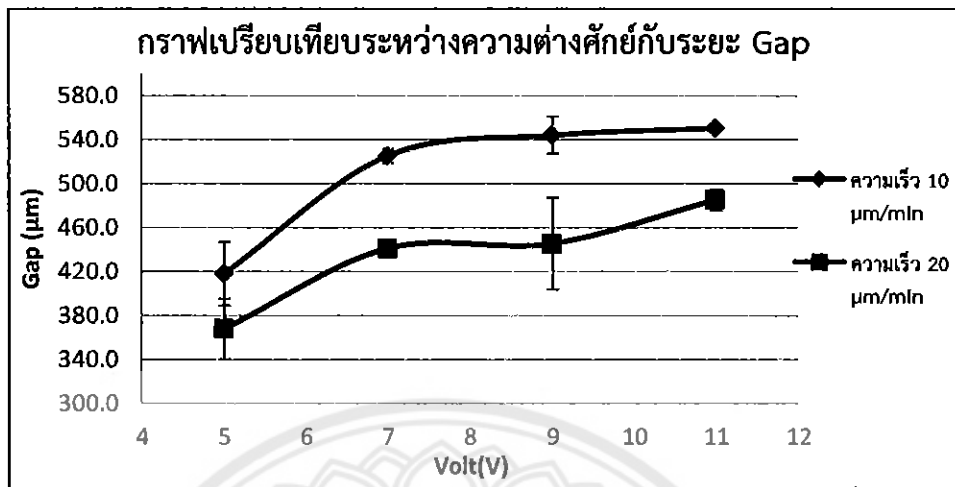


รูปที่ 4.7 การหาคำนวนหาช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน

ตารางที่ 4.11 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	10 ไมโครเมตรต่อนาที	20 ไมโครเมตรต่อนาที
5	418.1	367.7
7	525.2	441.2
9	554.1	445.4
11	550.4	485.3

ตารางที่ 4.11 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยการใช้ความต่างศักย์ 5 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 367.7 ไมโครเมตร และนำค่าในตารางพล็อตกราฟดังกราฟที่ 4.3



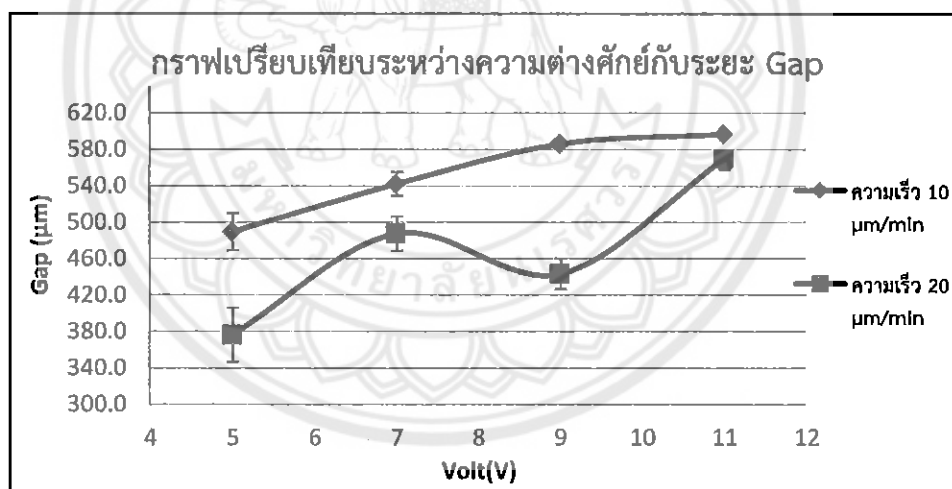
กราฟที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่าง
ชั้นงาน NaCl 0.1 โมลาร์

กราฟที่ 4.3 ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่ต่างกัน ที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงได้ลึกมากที่สุดก่อนที่ชั้นงานจะทะลุ ทำให้เกิดระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชั้นงานที่น้อยกว่าอัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที โดยที่อัตราเร็วที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 434.9 ไมโครเมตร และที่อัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 509.45 ไมโครเมตร เมื่อสังเกตในอัตราเร็วค่าใดค่าหนึ่ง การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่า ข้อมูลที่อัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพมากกว่า เนื่องจากมีแนวโน้มคงที่และดีขึ้นเรื่อยๆเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น

ตารางที่ 4.12 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	10 ไมโครเมตรต่อนาที	20 ไมโครเมตรต่อนาที
5	489.5	376.1
7	542.0	487.4
9	586.1	443.3
11	596.6	569.3

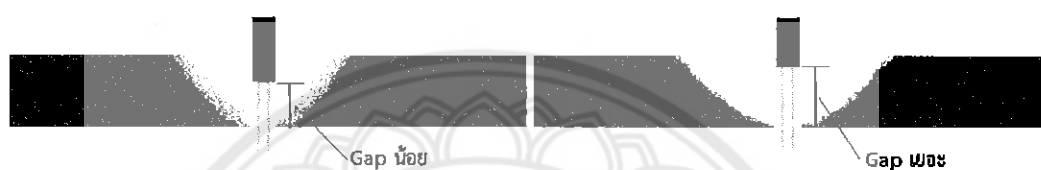
ตารางที่ 4.12 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยการใช้ความต่างศักย์ 5 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 376.1 ไมโครเมตร และนำค่าในตารางพล็อตกราฟดังกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน NaCl 0.15 โมลาร์

กราฟที่ 4.4 ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วการเคลื่อนที่อิเล็กโทรดที่ต่างกัน ที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่าก่อนที่ชิ้นงานจะทะลุ ทำให้เกิดระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานที่น้อยกว่าอัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที โดยที่อัตราเร็วที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 469.03 ไมโครเมตร และที่อัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 553.55 ไมโครเมตร เมื่อสังเกตในอัตราเร็วค่าใดค่าหนึ่ง การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่า ข้อมูลที่อัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพมากกว่าเนื่องจากมีแนวโน้มคงที่และดีขึ้นเรื่อยๆเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น

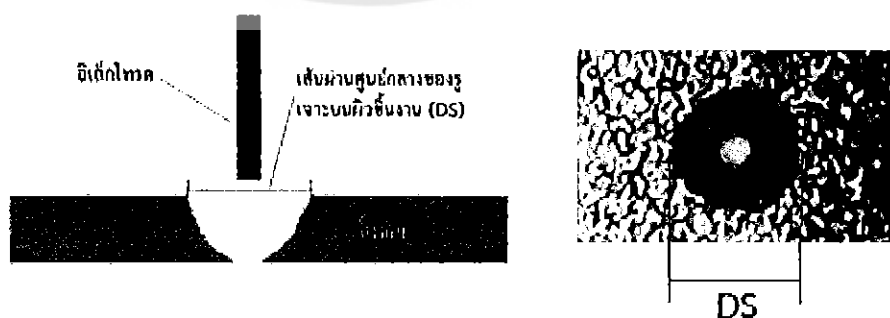
เปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ 4.3 กับกราฟที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น ส่งผลต่อช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน โดยความเข้มข้นมากช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานจะมากขึ้นตาม และช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานยังมากขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย เป็นเพราะการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และความต่างศักย์สูงนั้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีผลทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนลงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ชิ้นงานทะลุได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 Gap ที่อิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นน้อยและความต่างศักย์น้อย (ซ้าย) กับ Gap ที่อิเล็กโทรไลต์ความเข้มข้นมากกว่าและความต่างศักย์มากกว่า (ขวา)

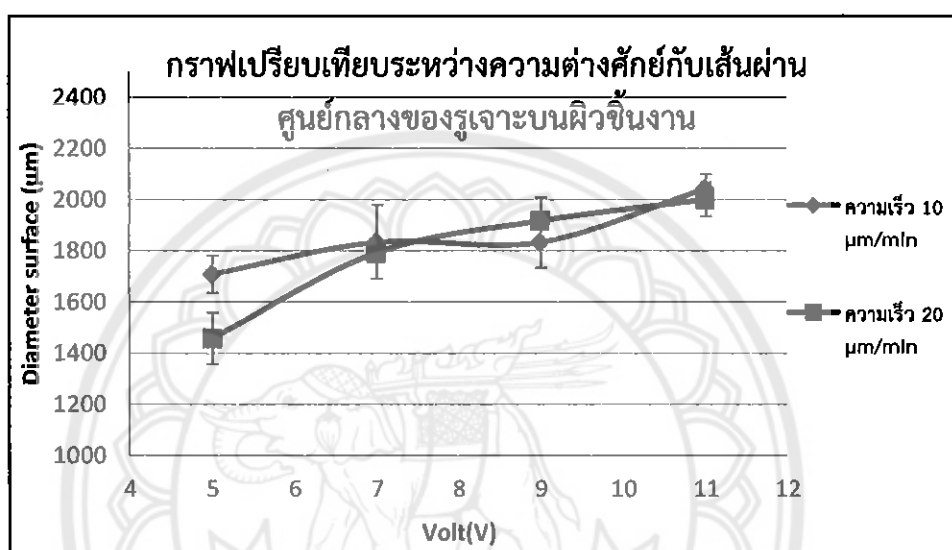
4.5.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ภาพตัวอย่างการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเจาะมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS)

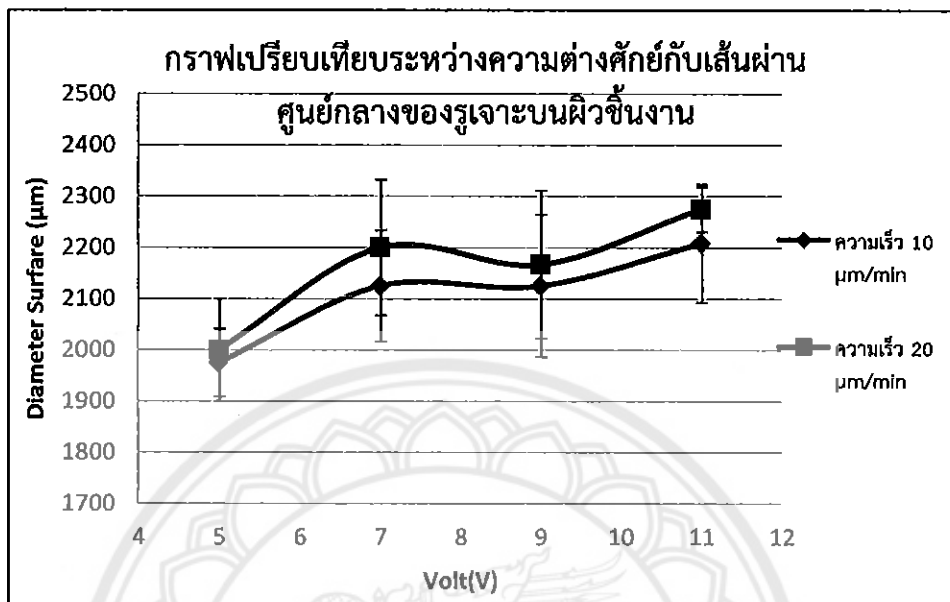
การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์กับขนาดรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ระหว่างอัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรดคือ 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเจาะมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.5 และ 4.6



กราฟที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-32 NaCl 0.1 โมลาร์

กราฟที่ 4.5 สังเกตได้ว่าที่ระดับ ความต่างศักย์ที่ 5 โวลต์นั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่อัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่มากกว่า 20 ไมโครเมตรต่อนาที โดยที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาทีนั้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1458.33 ไมโครเมตร และที่อัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1708.33 ไมโครเมตร เมื่อความต่างศักย์มากขึ้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น

เห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟนั้นยังไม่สามารถบอกได้ว่าความต่างศักย์ที่ใช้จะส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะได้ จะสังเกตได้ว่าที่อัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ความต่างศักย์ระหว่าง 7 ถึง 9 โวลต์ นั้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานเฉลี่ยมีขนาดเท่ากันพอดี ซึ่งอาจเกิดจากการที่เราสังเกตเห็นน้ำที่พุ่งลงมาโดยทันทีทันใด เนื่องจากแต่ละรูเราจะหยุดกระบวนการเมื่อมองเห็นสายน้ำที่พุ่งทะลุชิ้นงานลงมาข้างล่าง ทำให้อาจหยุดกระบวนการเร็วกว่าที่ควรจึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานเฉลี่ยของ 7 ถึง 9 โวลต์ นั้นเท่ากัน



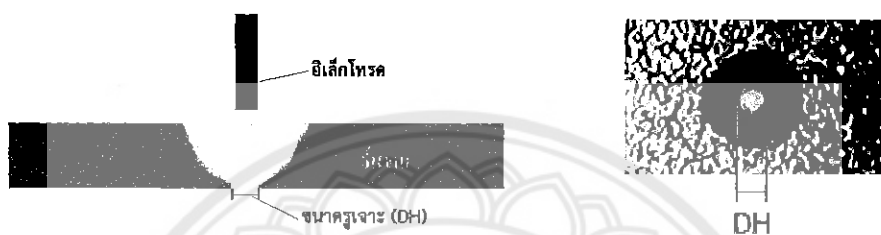
กราฟที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-32 NaCl 0.15 โมลาร์

กราฟที่ 4.6 สังเกตได้ว่าที่ระดับความต่างศักย์เดียวกันนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่อัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่มากกว่า 20 ไมโครเมตรต่อนาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานมากขึ้นตามความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นด้วย

เปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ 4.5 กับกราฟที่ 4.6 จะเห็นว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น ส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน โดยความเข้มข้นมาก เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานจะขนาดใหญ่ขึ้นตาม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานยังใหญ่ขึ้นตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย เป็นเพราะการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และความต่างศักย์สูงนั้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีผลทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนลงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้ชิ้นงานทะลุ

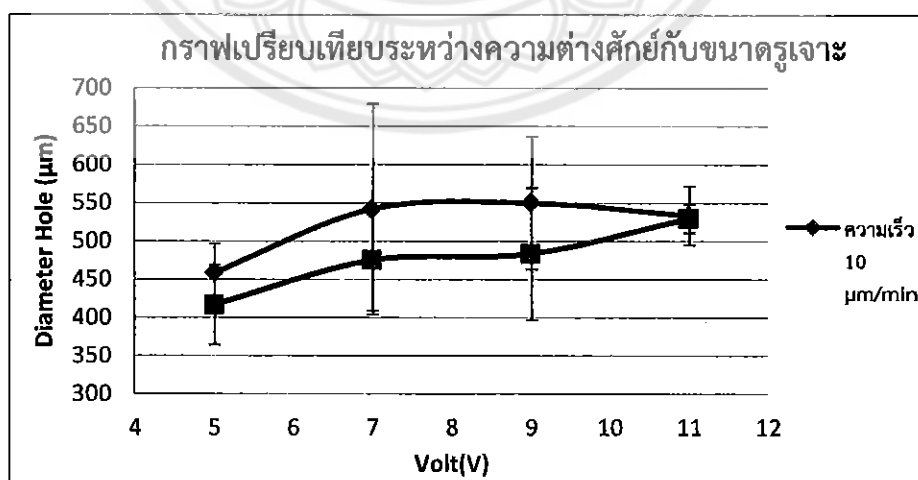
4.5.4 ขนาดรูเจาะ (DH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ภาพตัวอย่างการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวล่างชิ้นงาน (DH) ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเจาะมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.10



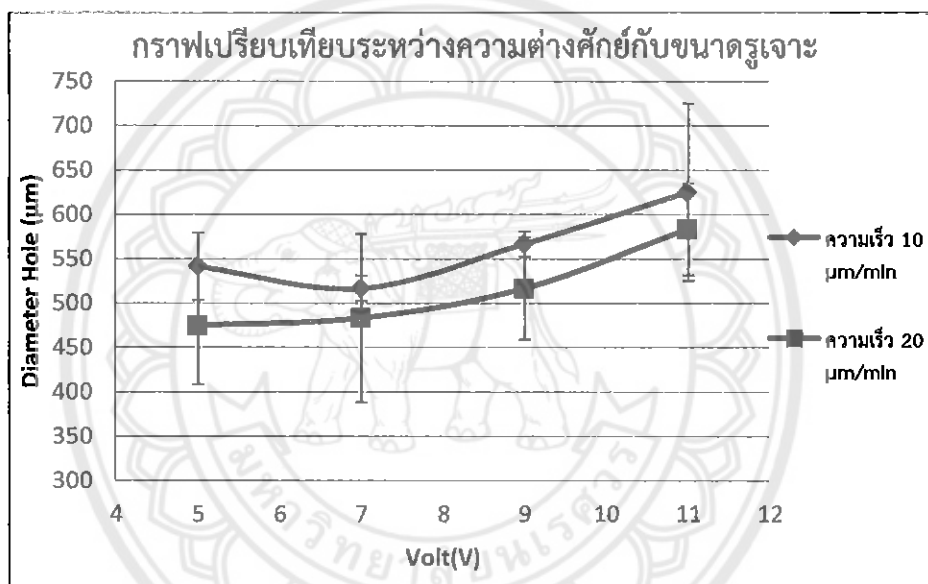
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของขนาดรูเจาะ (DH) และการวัดขนาดรู (DH)

การเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์กับขนาดรูเจาะบนผิวชิ้นงานที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ระหว่างอัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรดคือ 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเจาะมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.7 และ 4.8



กราฟที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-32 NaCl 0.1 โมลาร์

กราฟที่ 4.7 สังเกตได้ว่าที่ระดับ ความต่างศักย์เดียวกันนั้น การใช้อัตราการเคลื่อนที่ของ อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้ขนาดรูเล็กกว่าอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ยกเว้นความต่างศักย์สุดท้าย (11 โวลต์) ที่ขนาดรูเจาะเฉลี่ยมีขนาดใกล้เคียงกันมาก ที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 529 ไมโครเมตร และอัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 533 ไมโครเมตร แต่ในอัตราการเคลื่อนที่ของ อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ในความต่างศักย์อื่นๆ จะมีขนาดรูเจาะเล็กกว่าอัตราการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที



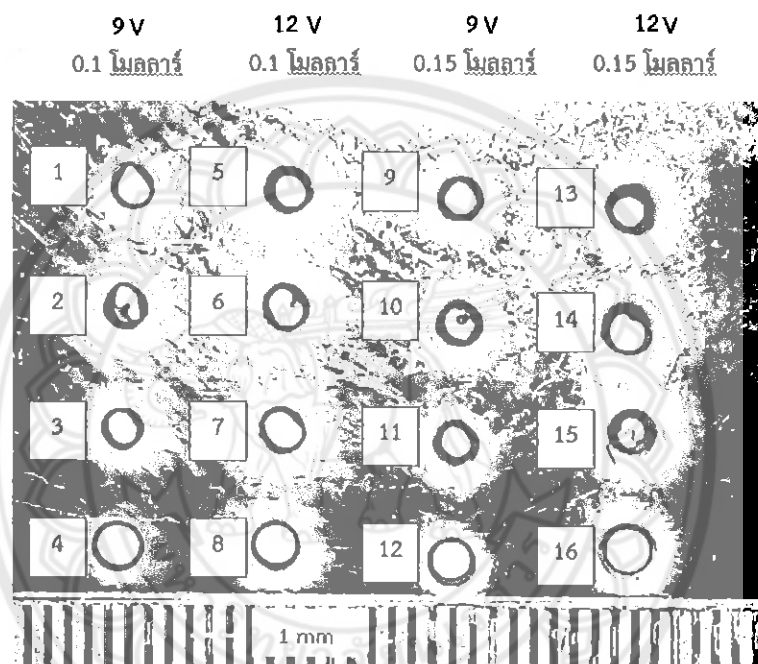
กราฟที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-32 NaCl 0.15 โมลาร์

กราฟที่ 4.8 สังเกตได้ว่าที่ระดับความต่างศักย์เดียวกันนั้น การใช้อัตราการเคลื่อนที่ของ อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดขนาดรูเล็กกว่า อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที และจะมีขนาดรูที่ใหญ่ขึ้นเมื่อความต่างศักย์สูงขึ้น ยกเว้นอัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ มีขนาดใหญ่มากกว่ารูที่ความต่างศักย์ 7 โวลต์ อาจเกิดจากเวลาใช้เวลารูเจาะนานและหยุดกระบวนการตอนสังเกตเห็นน้ำที่เจาะทะลุช้ากว่ารูอื่น

เปรียบเทียบระหว่างกราฟ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น ส่งผลต่อขนาดรูเจาะ โดยความเข้มข้นมากขนาดรูเจาะจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดรูเจาะยังมีขนาดใหญ่มากตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย เป็นเพราะการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และความต่างศักย์สูงนั้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีผลทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนลงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ชิ้นงานทะลุได้

4.6 ผลการทดลอง โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

การทดลองโซเดียมโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) จะใช้อัตราเร็วที่เหมาะสมที่ใช้คือ 8 ไมโครเมตรต่อนาที ความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรทที่ใช้ในกระบวนการเจาะคือ 0.1 โมลาร์ ใช้เจาะตั้งแต่รูที่ 1-8 และ 0.15 โมลาร์ ใช้เจาะตั้งแต่รูที่ 9-16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูเจาะครั้งที่ 1-16 (NaNO_3)

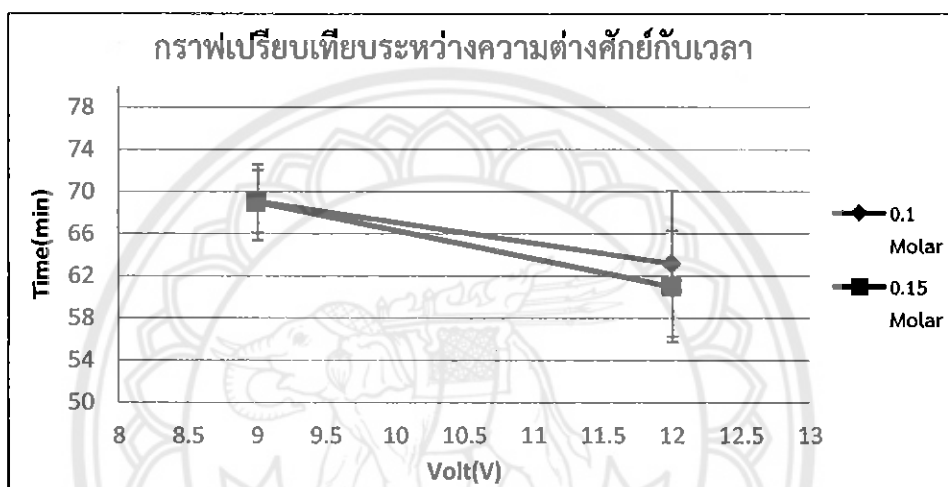
รูปที่ 4.11 เป็นการใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่ 8 ไมโครเมตรต่อนาที เพราะถ้าใช้อัตราการเคลื่อนที่ที่สูงกว่านี้จะทำให้อิเล็กโทรดกับชิ้นงานสัมผัสกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและไม่เกิดปฏิกิริยา โดยได้ทำการทดลองใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที จึงไม่สามารถเจาะได้

ดังนั้น อัตราเร็วที่เหมาะสมที่ใช้คือ 8 ไมโครเมตรต่อนาที ความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรทที่ใช้ในกระบวนการเจาะคือ 0.1 โมลาร์ ใช้เจาะตั้งแต่รูที่ 1-8 และ 0.15 โมลาร์ ใช้เจาะตั้งแต่รูที่ 9-16 การเจาะด้วยการใช้โซเดียมไนเตรท นั้นให้ผิวที่เรียบเนียนมาก สังเกตได้จากบริเวณรอบๆ ปากรูเจาะจะมีรอยการกัดกระจายออกเป็นวงน้อยมาก ต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้ ที่ทำให้เกิดรอยบริเวณปากรูเจาะเป็นวงกว้างเจาะ ในการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่าส่วนของรูที่ 4 8 12 และ 16 จะมีขนาดใหญ่กว่าทุกๆรูเนื่องมาจากการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด ไปที่ตำแหน่งที่ต่ำกว่าผิวล่างของชิ้นงานใช้ระยะเวลาและปฏิกิริยาทางเคมีที่นานกว่ารูอื่นๆ จึงทำให้รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า

4.7 เปรียบเทียบการทดลองโซเดียมไนเตรท 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์

4.7.1 เวลาที่ใช้เจาะ (Time) NaNO_3

เปรียบเทียบเวลาที่ใช้เจาะกับความต่างศักย์ไฟฟ้า ของโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที แท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.9

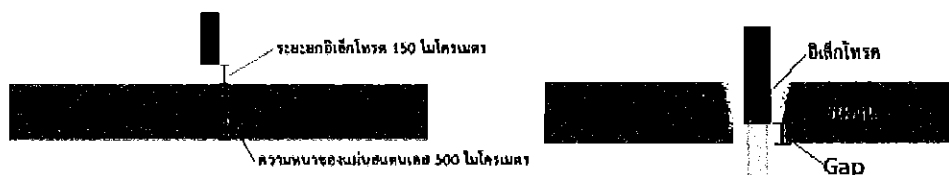


กราฟที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ 1-16 (NaNO_3)

กราฟที่ 4.9 สังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นนั้น เวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้นโดยเฉลี่ยแล้วที่ 9 โวลต์ ใช้เวลาเฉลี่ย 69.03 นาที และที่ 12 โวลต์ ใช้เวลาเฉลี่ย 62.08 นาที

4.7.2 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

ตัวอย่างการหาคำนวนหาช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมไนเตรท โดยระยะยกของแท่งอิเล็กโทรดรวมกับความหนาของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 650 ไมโครเมตร จะนำมาลบกับระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ได้เป็นระยะห่างระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานด้านล่าง ดังรูปที่ 4.12



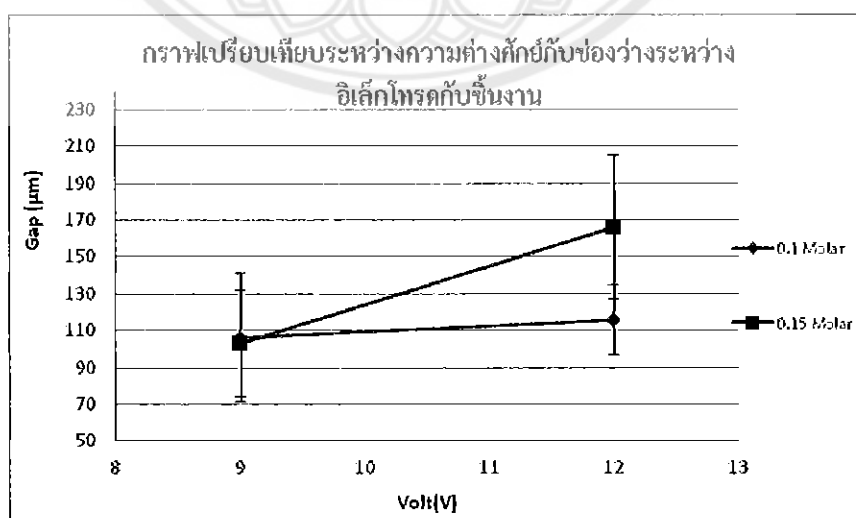
รูปที่ 4.12 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงานของสารละลายโซเดียมไนเตรท

ตารางที่ 4.13 ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	0.1 โมลาร์	0.15 โมลาร์
9	106.25	103.10
12	166.10	166.10

ตารางที่ 4.13 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน โดยการใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 103.10 ไมโครเมตร

เปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้ากับ ระยะช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานของโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาทีที่อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.10

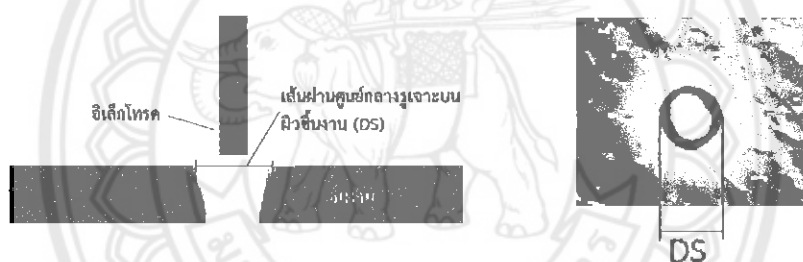


กราฟที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน 1-16 (NaNO_3)

กราฟที่ 4.10 การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่าใช้ความต่างศักย์ที่สูงกว่า โดยที่ 9 โวลต์ มีระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานเฉลี่ย 104.68 ไมโครเมตร และที่ 12 โวลต์ มีระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานเฉลี่ย 166.10 ไมโครเมตร และความเข้มข้นของอิเล็กโทไลต์แทบจะไม่มีผลต่อกระบวนการเจาะ เนื่องจากความลึกของอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ 12 โวลต์และใกล้เคียงกันมากที่ 9 โวลต์

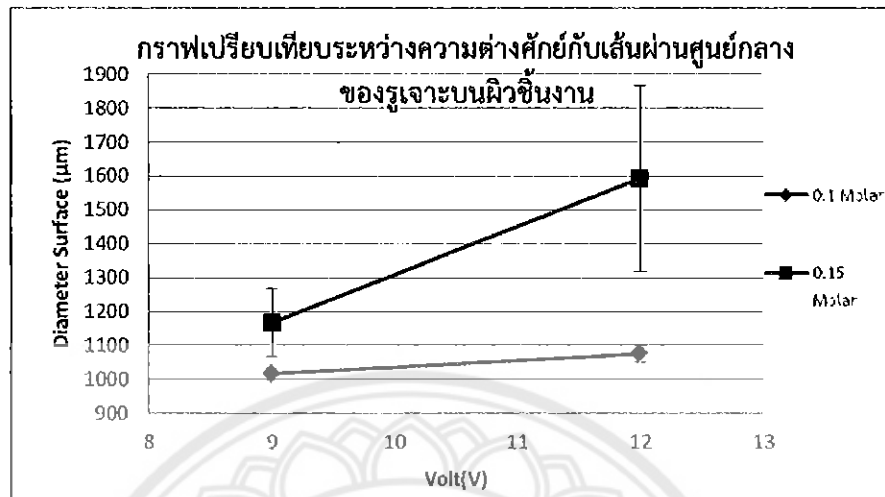
4.7.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) NaNO_3

ตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน วัดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อยู่บนผิวแผ่นสแตนเลส ของสารละลายโซเดียมไนเตรท อัตราเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ 550 ไมโครเมตร ในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) และการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) NaNO_3

เปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ผิวด้านบนชิ้นงานของโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที แท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.11

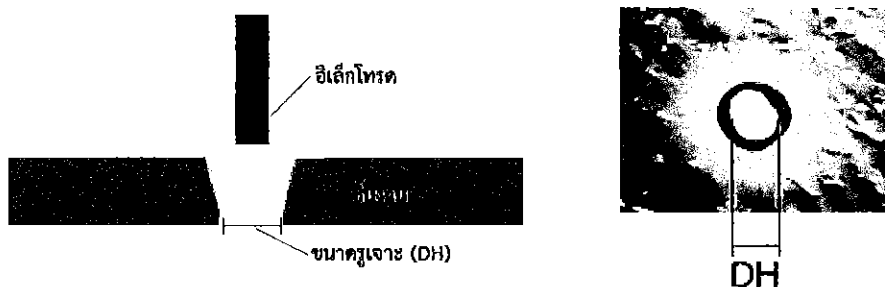


กราฟที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1-16 (NaNO_3)

กราฟที่ 4.11 สังเกตได้ว่าการใช้ความต่างศักย์สูงขึ้น ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และความเข้มข้นมากขึ้นส่งผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยเช่นกัน โดยความเข้มข้นที่ 0.1 โมลาร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูเจาะบนผิวชิ้นงานเล็กกว่า ความเข้มข้นที่ 0.15 โมลาร์ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน 1045.83 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูเจาะบนผิวชิ้นงานอยู่ที่ 1455.83 ไมโครเมตร ตามลำดับ

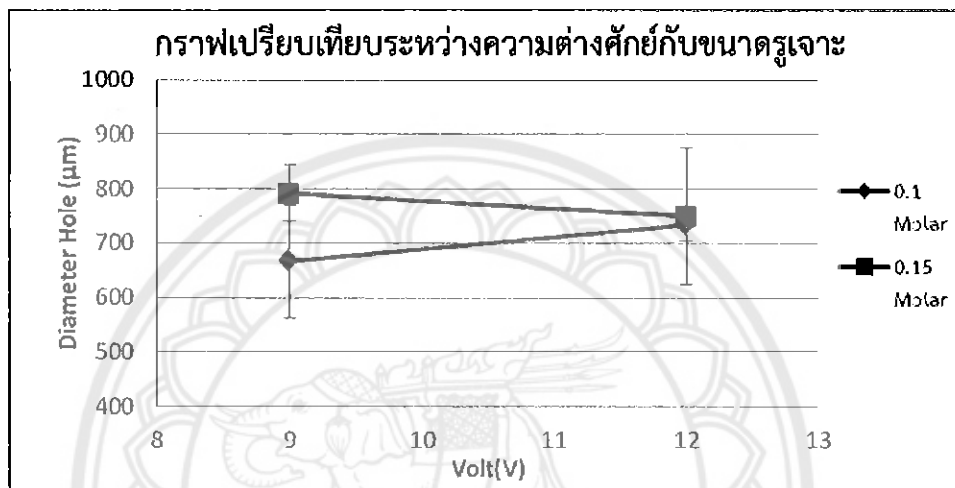
4.7.4 ขนาดรูเจาะ (DH) NaNO_3

ขนาดรูเจาะคือ รูที่น้ำพุ่งผ่านชิ้นงานได้ เป็นรูที่อยู่ผิวด้านล่างของโดยจะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.14 โดยจะเปรียบเทียบขนาดของรูเจาะบนผิวชิ้นงานระหว่างการใช้โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ 0.15 โมลาร์



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของขนาดรูเจาะ (DH) และการวัดขนาดรู (DH) NaNO_3

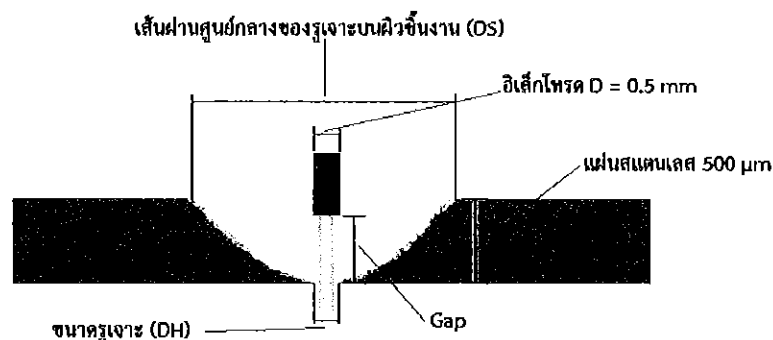
เปรียบเทียบความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะที่ผิวด้านล่างชิ้นงานของโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที แท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร ดังกราฟที่ 4.12



กราฟที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดรูเจาะ 1-16 (NaNO_3)

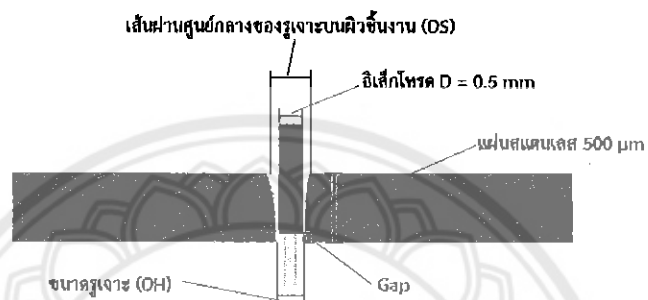
กราฟที่ 4.12 ที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ มีค่าเฉลี่ยของขนาดรูเล็กลง เมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีค่าเฉลี่ยของขนาดรูที่มากขึ้น เมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ยังอธิบายไม่ได้ว่าทำไมความเข้มข้นต่างกันถึงมีผลตรงกันข้าม

ตัวอย่างภาพจำลองของการเจาะรู ของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ของความต่างศักย์ 11 โวลต์ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน (Gap) ขนาดรูเจาะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) มากที่สุด รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ภาพจำลองรวมของการเจาะที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

รูปที่ 4.16 ภาพจำลองของการเจาะรู ของโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) แท่งอิเล็กโทรดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 550 ไมโครเมตรและความหนาของแผ่นชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 500 ไมโครเมตร โดยช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวล่างชิ้นงาน (Gap) ขนาดรูเจาะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะบนผิวชิ้นงาน (DS) มีค่าน้อย



รูปที่ 4.16 ภาพจำลองรวมของการเจาะ โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

บทที่ 5

สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองซึ่งประกอบไปด้วยส่วน เคลื่อนที่และส่วนควบคุม ส่วนเคลื่อนที่จะประกอบไปด้วย แกน X Y และ Z โดยใช้สเต็ปมอเตอร์ในการขับเคลื่อน แกน X Y จะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 10 ไมโครเมตร ส่วนแกน Z เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรด มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 6.3 ไมโครเมตร สารละลายถูกควบคุมผ่าน Peristaltic pump โดยอัตราการไหลอยู่ที่ 23 มิลลิลิตรต่อนาที ในการควบคุมประกอบไปด้วย บอร์ด Arduino mega ทำหน้าที่รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์เพื่อมาสั่งการส่วนต่างๆ

ในการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลกระทบต่อระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น ส่งผลต่อขนาดรูเจาะ โดยความเข้มข้นมากขนาดรูเจาะจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และขนาดรูเจาะยังมีขนาดใหญ่ตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นด้วย เป็นเพราะการใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง และความต่างศักย์สูงนั้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีผลทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงไปเล็กน้อยก็สามารถทำให้ชิ้นงานทะลุได้ อัตราเร็วการเคลื่อนที่อิเล็กโทรดที่ต่างกัน ที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงได้ลึกมากที่สุดก่อนที่ชิ้นงานจะทะลุ ทำให้เกิดระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานที่น้อยกว่าอัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาทีโดยที่อัตราเร็วที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 451 ไมโครเมตรและที่อัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะเฉลี่ย 531 ไมโครเมตร การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่าจะทำให้เกิดขนาดรูเล็กกว่า และจะมีขนาดรูที่ใหญ่ขึ้นเมื่อความต่างศักย์สูงขึ้น

สำหรับการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างชนิดกันนั้นสรุปได้ดังนี้ ความเร็วของผิวชิ้นงานการใช้โซเดียมไนเตรทในการกัดจะทำให้ผิวชิ้นงานเรียบเนียนมากกว่าการใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ โดยถ้าความต่างศักย์เพิ่ม มากขึ้นขนาดรูมากขึ้นตามไปด้วย โดย ระยะเวลาในการเจาะ การใช้โซเดียมไนเตรทในการกัดจะใช้เวลานานกว่าโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เวลาที่ใช้ในการเจาะ โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ ใช้เวลาเฉลี่ย 14.75 นาทีต่อหนึ่งรูการใช้โซเดียม และการใช้โซเดียมไนเตรท ใช้เวลาเฉลี่ย 65.55 นาทีต่อหนึ่งรู จึงสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์ในกระบวนการ ECM นั้นจะทำให้เจาะรูได้เร็วกว่า

จากการทำการทดลองประกอบกับการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง สรุปได้ว่า การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ความเข้มข้นต่างกัน ขนาดรูเจาะนั้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์สูงขึ้น และสภาพผิวของชิ้นงานจะมีความขรุขระตามไปด้วย การใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด เมื่อใช้อัตราเร็วที่ อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่ออนาที ที่โวลต์ต่ำ จำทำให้ชิ้นงานมีรูขนาดเล็ก และเวลาที่ใช้ในการเจาะจะลดลงตามไปด้วยโดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย จะใช้เวลาเจาะที่น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมไนเตรทและโซเดียมคลอไรด์ พบว่าความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าขนาดรูเจาะที่ใช้สารละลายโซเดียมไนเตรทมีขนาดใหญ่กว่ารูที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์แต่สภาพผิวจะเรียบเนียนกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรใช้เครื่องมือในการวัดขนาดของรูเจาะที่แม่นยำกว่านี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น
- 5.2.2 ในการทดลองเมื่อมีการอุดตันของแท่งอิเล็กโทรด จำเป็นต้องเปลี่ยนแท่งอิเล็กโทรดเป็นเหตุให้เกิดการคาดเคลื่อนของตำแหน่งบนแผ่นชิ้นงาน
- 5.2.3 ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการกัดวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี จะมีสนิมเกิดขึ้นที่วัสดุจับชิ้นงานและตัวแท่งอิเล็กโทรด จึงทำให้เกิดความต้านทานทางไฟฟ้า เป็นผลให้การนำปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี มีค่าน้อยลง
- 5.2.4 ภาชนะใส่สารละลายควรปิดให้มิดชิดเพราะฝุ่นหรือสิ่งสกปรกอาจตกลงไปในสารละลายได้ เพราะแท่งอิเล็กโทรดมีขนาดค่อนข้างเล็ก ซึ่งจะทำให้อุดตันได้
- 5.2.5 หลังจากการทดลองควรนำขั้วต่อไฟฟ้าไปล้างน้ำเปล่าแล้วเช็ดให้แห้งเพื่อป้องกันสนิม

อ้างอิง

- [1] วิบูลย์ ตั้งวัชรตมนุกูล, การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี, technology pramation(2011) 76-77
- [2] ณรงค์ชัย ใจเย็น, วรณวิชา ชุมแสง, วิชาวี แก้วก่อง, สารละลายอิเล็กโทรไลต์, สืบค้นวันที่ 9 พฤศจิกายน 2559, Wed site: <https://sites.google.com/site/acidsandbasestutorial/acid>
- [3] บริษัท ไทพ์วัน ซัพพลาย จำกัด, การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้า, สืบค้นวันที่ 9 พฤศจิกายน 2559, Wed site:
- [4] ประมูล บัวน้อย, วิธีคำนวณหาจำนวน องศาต่อ step ของมอเตอร์, สืบค้นวันที่ 18 พฤศจิกายน 2559, Wed site: <http://www.cnctak.com/?cid=1788067>
- [5] โปรแกรม LabView ,สืบค้นวันที่ 25 พฤศจิกายน 2559, Wed site: http://www.research-system.siam.edu/images/coop/DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_ELECTRICAL_MEASUREMENT_USING_LABVIEW_PROGRAM/ch2.pdf
- [6] Chuangchuang Chen, Jianzhong Li, Shicheng Zhan, Zuyuan Yu, Wenji Xu, Study of micro groove machining by micro ECM, Procedia CIRP 42 (2016) 418 – 422
- [7] Guodong Liua, Yong Lia, Quancun Konga, Hao Tonga, Research on ECM process of micro holes with internal features, Precision Engineering (2016)
- [8] Zhang Yan, Xu Zhengyang , Zhu Yun, Zhu Di, Machining of a film-cooling hole in a single-crystal superalloy by high-speed electrochemical discharge drilling, Chinese Journal of Aeronautics(2015)
- [9] จิตติ พัทธวงษ์, (2556), การทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปทรงและอัตราป้อนของอิเล็กโทรดต่อรูปร่างของร่องกัดในกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27
- [10] บอร์ดขับสเต็ปมอเตอร์ TB6600, สืบค้นวันที่ 19 พฤษภาคม 2560, web site : https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/TB6600_Stepper_Motor_Driver_SKU:_DRI004
- [11] ภาณุเดช ต้วงท่า,จักรพงษ์ จับแสงจันทร์,พุดินัย มูลณี การศึกษาระบบกัดวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี(Study of Electrochemical Micromachining)



1000 step = 10 mm

ตาราง ก.1 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
1	5	25	0	24	0.004	800	264.6
			5	15	0.006	650	
			10	8	0.011	550	
			15	1	0.013	500	
			20	-7	0.017	410	
			25	-15	0.024	330	
			27.1	-18	0.024	280	
2	5	25	0	24	0.015	1000	207.9
			5	16	0.004	850	
			10	9	0.017	750	
			15	1	0.018	630	
			20	-7	0.02	520	
			21.23	-9	0.012	500	
			0	24	0.025	750	
5	18	0.02	500				
10	10	0.017	350				
15	2	0.029	210				
20	-7	0.027	100				
23.32	-12	0.026	50				
3	5	30	0	24	0.003	650	252
			5	17	0.003	530	
			10	9	0.003	400	
			15	1	0.022	300	
			20	-7	0.022	200	
			25	-15	0.02	100	
			25.47	-16	0.021	70	

ตาราง ก.2 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
5	5	25	0	0	0.024	950	252
			5	-16	0.017	900	
			10	-34	0.025	850	
			12.4	-40	0.028	800	
6	5	25	0	24	0.027	830	296.1
			5	4	0.028	680	
			10	-14	0.035	540	
			14.06	-23	0.028	480	
7	5	30	0	29	0.023	950	302.4
			5	11	0.027	880	
			10	-4	0.027	750	
			14.39	-19	0.032	650	
8	5	30	0	34	0.017	1000	359.1
			5	18	0.022	850	
			10	2	0.023	790	
			15	-13	0.033	660	
			15.41	-15	0.025	650	
			18	-23	0.005	560	

ตาราง ก.3 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 7 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	ระยะ (μm)	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
9	7	25	0	24	0.033	830	132.3
			5	18	0.036	740	
			10	9	0.036	600	
			14.03	3	0.039	540	
10	7	25	0	24	0.038	550	126
			5	16	0.039	450	
			10	10	0.036	390	
			13.39	4	0.035	250	
11	7	30	0	24	0.042	950	119.7
			5	16	0.043	780	
			10	9	0.037	660	
			12.25	5	0.04	630	
12	7	30	0	24	0.038	950	132.3
			5	16	0.045	800	
			10	7	0.028	660	
			10.52	6	0.034	650	
			13	3	0.024	600	

โพท = 1000 ไม.พ.
 0.1 โมลาร์ 100 ไม.พ.

ตาราง ก.4 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 7 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั้ม	เวลา(นาที)	ระยะ (μm)	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
13	7	25	0	24	0.043	950	214.2
			5	8	0.04	850	
			10	-7	0.046	750	
			10.54	-10	0.045	720	
14	7	25	0	24	0.042	950	207.9
			5	9	0.042	850	
			10	-8	0.044	750	
			10.3	-9	0.052	740	
15	7	30	0	24	0.046	950	207.9
			5	6	0.034	840	
			10	-8	0.034	730	
			10.15	-9	0.037	725	
16	7	30	0	24	0.021	900	371.7
			5	5	0.027	750	
			10	-8	0.034	680	
			11.32	-16	0.038	600	
			15	-35	0.038	500	
			20	-54	0.008	350	

ตาราง ก.5 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาทื)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
17	9	25	0	24	0.05	1000	119.7
			5	17	0.065	890	
			10	10	0.06	790	
			12.53	5	0.032	700	
18	9	25	0	24	0.058	750	113.4
			5	17	0.064	650	
			10	9	0.055	530	
			12.04	6	0.052	470	
19	9	30	0	24	0.052	960	88.2
			5	18	0.052	750	
			10	11	0.057	640	
			10.12	10	0.062	630	
20	9	30	0	24	0.045	650	655.2
			5	16	0.04	510	
			10	8	0.044	470	
			11.04	7	0.045	460	
			15	-60	0.016	350	
			16	-80	0.033	320	

ตาราง ก.6 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาทื)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
21	9	25	0	24	0.048	940	157.5
			5	8	0.058	860	
			7.49	-1	0.053	810	
22	9	25	0	24	0.04	900	226.8
			5	8	0.043	790	
			10	-9	0.051	660	
			11.29	-12	0.05	640	
23	9	30	0	24	0.045	800	233.1
			5	9	0.051	650	
			10	-7	0.045	520	
			11.48	-13	0.064	480	
24	9	30	0	24	0.045	950	655.2
			5	9	0.041	800	
			7.5	-1	0.051	730	
			15	-80	0.045	620	

ตาราง ก.7 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
25	11	25	0	24	0.055	1000	100.8
			5	17	0.068	890	
			10	9	0.064	770	
			10.28	8	0.072	760	
26	11	25	0	24	0.054	1000	100.8
			5	17	0.067	900	
			10	9	0.07	810	
			10.42	8	0.075	800	
27	11	30	0	24	0.052	750	100.8
			5	17	0.063	590	
			10	9	0.066	450	
			10.27	8	0.001	440	
28	11	30	0	24	0.055	950	655.2
			5	17	0.054	800	
			9.42	9	0.052	650	
			15	-80	0.031	500	

ตาราง ก.8 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
29	11	25	0	24	0.058	1000	176.4
			5	7	0.075	900	
			9.25	-4	0.075	800	
30	11	25	0	24	0.065	800	163.8
			5	9	0.067	700	
			8.25	-2	0.077	640	
31	11	30	0	24	0.068	600	157.5
			5	9	0.062	460	
			8.02	-1	0.086	390	
32	11	30	0	24	0.059	690	655.2
			5	8	0.06	550	
			8.16	-1	0.016	470	
			10	-35	0.055	400	
			12	-80	0.052	370	

ตาราง ก.9 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
1	5	25	0	24	0.025	810	176.4
			5	17	0.025	730	
			10	9	0.022	620	
			15	1	0.03	500	
			18.26	-4	0	440	
2	5	25	0	24	0.022	900	170.1
			5	17	0.03	800	
			10	9	0.032	700	
			15	1	0.031	600	
			17.25	-3	0.023	550	
3	5	30	0	24	0.031	800	138.6
			5	17	0.03	650	
			10	9	0.032	500	
			14.25	2	0.038	440	
4	5	30	0	24	0.023	600	655.2
			5	17	0.031	440	
			10	9	0.026	300	
			14.02	3	0.031	220	
			15	1	0.035	180	
			18.29	-80	0.038	100	

ตาราง ก.10 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 5 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
5	5	25	0	24	0.022	890	308.7
			5	9	0.026	790	
			10	-7	0.028	700	
			15	-23	0.033	640	
			15.38	-25	0.031	630	
6	5	25	0	24	0.027	900	264.6
			5	8	0.032	790	
			10	-8	0.039	700	
			13.39	-18	0.03	630	
7	5	30	0	24	0.02	590	252
			5	6	0.024	450	
			10	-12	0.025	310	
			12.1	-16	0.031	280	
8	5	30	0	24	0.021	900	655.2
			5	7	0.024	750	
			10	-9	0.027	600	
			12.11	-14	0.034	550	
			15	-70	0.021	480	
			15.3	-80	0.024	470	

ตาราง ก.11 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 7 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่ เจาะ	โวล ล์	ปี ม	เวลา (นาที)	ระยะ (μm)	กระแส (A)	ปริมาตรน้ำ (mL)	ระยะที่เจาะ (μm)
9	7	25	0	24	0.031	700	119.7
			5	17	0.03	610	
			10	9	0.033	530	
			12.42	5	0.035	490	
10	7	25	0	24	0.033	700	113.4
			5	16	0.031	590	
			10	8	0.037	500	
			11.3	6	0.034	490	
11	7	30	0	24	0.035	550	94.5
			5	16	0.039	400	
			9.48	9	0.004	280	
12	7	30	0	24	0.038	950	113.4
			5	16	0.045	800	
			9.56	7	0.028	660	
			14.43	6	0.034	650	

ตาราง ก.12 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 7 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	ระยะ (μm)	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
13	7	25	0	24	0.035	800	182.7
			5	8	0.048	700	
			9.07	-5	0.057	620	
14	7	25	0	24	0.045	900	163.8
			5	7	0.051	800	
			8.03	-2	0.036	740	
15	7	30	0	24	0.049	900	144.9
			5	10	0.065	780	
			7.51	1	0.061	710	
16	7	30	0	24	0.057	790	655.2
			5	17	0.058	670	
			8.11	12	0.045	600	
			10.07	1	0.048	550	
			13	-80	0.035	480	

ตาราง ก.13 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
17	9	25	0	24	0.062	840	69.3
			5	17	0.085	750	
			7.55	13	0.08	720	
18	9	25	0	24	0.095	800	63
			5	17	0.083	720	
			6.48	14	0.083	680	
19	9	30	0	24	0.07	920	63
			5	17	0.091	800	
			7.15	14	0.083	750	
20	9	30	0	24	0.072	670	144.9
			5	17	0.092	560	
			7.51	9	0.041	510	
			10	3	0.056	450	
			12.17	1	0.044	400	

ตาราง ก.14 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
21	9	25	0	24	0.064	900	195.3
			5	9	0.06	800	
			7.41	-7	0.055	750	
22	9	25	0	24	0.055	650	201.6
			5	8	0.065	530	
			7.23	-8	0.063	470	
23	9	30	0	24	0.06	580	226.8
			5	6	0.066	460	
			6.49	-12	0.069	410	
24	9	30	0	24	0.066	900	239.4
			5	7	0.065	780	
			5.56	-9	0.041	740	
			10.13	-14	0.062	650	

ตาราง ก.15 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
25	11	25	0	24	0.088	680	56.7
			5	18	0.07	550	
			6.24	15	0.093	540	
26	11	25	0	24	0.075	460	56.7
			5	16	0.088	390	
			6.02	15	0.054	370	
27	11	30	0	24	0.088	880	50.4
			5	17	0.092	750	
			5.43	16	0.122	740	
28	11	30	0	24	0.093	820	94.5
			4.48	17	0.092	700	
			7.3	9	0.087	650	

ตาราง ก.16 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 11 โวลต์ ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมคลอไรด์							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 20 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
29	11	25	0	24	0.095	700	94.5
			4.49	9	0.105	580	
30	11	25	0	24	0.098	520	75.6
			4.02	12	0.075	440	
31	11	30	0	24	0.125	780	75.6
			4.06	12	0.103	690	
32	11	30	0	24	0.081	900	207.9
			4.22	7	0.092	780	
			5.55	-9	0.096	740	

ตารางที่ ก.17 ลำดับการทดสอบการเจาะโดยสารละลาย (NaNO_3) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.15 โมลลาร์

การทดลองที่	ความต่างศักย์(โวลต์)	อัตราการเคลื่อนอิเล็กโทรด(ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	9	8
5-8	12	8
9-12	9	8
13-16	12	8

ตาราง ก.18 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรด 0.1 โมลลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรด							
ความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ ที่ความเร็ว 10 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
1	9	25	0	24	0.02	700	592.2
			5	18	0.033	51	
			10	10	0.043	490	
			15	3	0.058	300	
			20	-5	0.078	180	
			25	-13	0.102	50(1000)	
			30	-20	0.104	950	
			35	-28	0.198	850	
			40	-35	0.129	760	
			45	-43	0.124	670	
			50	-45	0.13	560	
			55	-50	0.138	490	
			60	-57	0.135	410	
			65	-64	0.112	340	
68	-70	0.05	280				

ตาราง ก.19 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
2	9	25	0	24	0.055	890	567
			5	19	0.061	780	
			10	12	0.06	680	
			15	6	0.062	700	
			20	-1	0.075	520	
			25	-7	0.09	430	
			30	-13	0.096	300	
			35	-19	0.107	200	
			40	-26	0.122	110	
			45	-32	0.131	90(750)	
			50	-38	0.134	680	
			55	-45	0.145	550	
			60	-51	0.143	470	
			65	-59	0.154	370	
			70	-64	0.136	300	
			72	-66	0.12	290	

*ที่ปริมาตรน้ำ 90(750) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 750 มิลลิลิตร

ตาราง ก.20 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
3	9	30	0	24	0.062	1000	522.9
			5	19	0.061	860	
			10	12	0.062	790	
			15	6	0.053	690	
			20	0	0.068	580	
			25	-7	0.091	400	
			30	-14	0.098	280	
			35	-20	0.114	180	
			40	-26	0.124	50(1000)	
			45	-32	0.132	890	
			50	-38	0.138	800	
			55	-45	0.142	700	
			60	-51	0.145	590	
			65	-58	0.141	470	
66.11	-59	0.079	450				

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.21 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
4	9	30	0	24	0.084	980	655.2
			5	19	0.077	870	
			10	12	0.075	750	
			15	6	0.079	650	
			20	0	0.096	540	
			25	-7	0.126	430	
			30	-13	0.136	310	
			35	-20	0.138	190	
			40	-26	0.149	90(900)	
			45	-32	0.139	780	
			50	-38	0.117	680	
			55	-45	0.073	590	
			60	-51	0.059	480	
			65	-58	0.076	420	
			70	-64	0.075	410	
			75	-71	0.076	230	
			80	-77	0.079	150	
82.19	-80	0.071	100				

*ที่ปริมาตรน้ำ 90(900) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 900 มิลลิลิตร

ตาราง ก.22 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
5	12	25	0	0	0.082	900	384.3
			5	-5	0.1	800	
			10	-11	0.091	740	
			15	-18	0.112	650	
			20	-25	0.145	570	
			25	-31	0.133	500	
			30	-35	0.142	480	
			35	-40	0.124	400	
			40	-46	0.122	300	
			45	-51	0.146	200	
			50	-55	0.155	110	
			55	-60	0.144	50(1000)	
			55.5	-61	0.022	1000	

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.23 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
6	12	25	0	24	0.076	1000	516.6
			5	19	0.06	890	
			10	13	0.06	740	
			15	6	0.074	600	
			20	-1	0.088	460	
			25	-6	0.095	400	
			30	-13	0.108	300	
			35	-19	0.119	200	
			40	-25	0.13	90(1000)	
			45	-32	0.145	900	
			50	-38	0.166	800	
			55	-44	0.163	720	
			60	-51	0.172	630	
			65	-58	0.182	520	

*ที่ปริมาตรน้ำ 90(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.24 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
7	12	30	0	24	0.038	900	554.4
			5	19	0.03	780	
			10	12	0.06	650	
			15	6	0.072	52	
			20	0	0.072	400	
			25	-7	0.074	280	
			30	-13	0.062	150	
			35	-19	0.094	50	
			40	-26	0.125	700	
			45	-32	0.134	570	
			50	-38	0.147	450	
			55	-45	0.163	340	
			60	-51	0.177	200	
			65	-58	0.173	50(700)	
			69	-64	0.064	600	

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(700) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 700 มิลลิลิตร

ตาราง ก.25 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรด 0.1 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรด							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
8	12	30	0	24	0.063	1000	655.2
			5	19	0.061	850	
			10	13	0.073	720	
			15	6	0.087	590	
			20	0	0.101	460	
			25	-7	0.113	320	
			30	-13	0.123	160(1000)	
			35	-19	0.133	890	
			40	-26	0.149	770	
			45	-32	0.165	650	
			50	-38	0.154	580	
			55	-45	0.162	380	
			60	-53	0.131	200	
			63	-56	0.1	150	
			65	-58	0.07	130	
			70	-67	0.068	25(1000)	
74.3	-80	0.095	900				

*ที่ปริมาตรน้ำ 160(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

*ที่ปริมาตรน้ำ 25(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.26 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
9	9	25	0	24	0.063	840	522.9
			5	19	0.07	740	
			10	12	0.067	640	
			15	6	0.072	500	
			20	0	0.066	400	
			25	-7	0.072	300	
			30	-13	0.088	180	
			35	-19	0.085	50(600)	
			40	-26	0.09	500	
			45	-32	0.097	360	
			50	-39	0.144	260	
			55	-45	0.16	130	
			60	-51	171	50(300)	
			65	-58	0.152	280	
			66	-59	0.138	270	

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(600) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 600 มิลลิลิตร

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(300) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 300 มิลลิลิตร

ตาราง ก.27 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรด 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรด							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาทื)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
10	9	25	0	24	0.048	950	579.6
			5	19	0.055	830	
			10	13	0.054	720	
			15	6	0.06	600	
			20	0	0.066	450	
			25	-6	0.073	340	
			30	-13	0.083	200	
			35	-19	0.106	60	
			40	-26	0.109	860	
			45	-32	0.1	740	
			50	-38	0.117	600	
			55	-45	0.119	470	
			60	-51	0.159	390	
			65	-57	0.166	320	
			70	-64	0.165	250	
73	-68	0.03	200				

ตาราง ก.28 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
11	9	30	0	24	0.054	980	541.8
			5	19	0.057	850	
			10	12	0.054	700	
			15	5	0.067	560	
			20	0	0.064	450	
			25	-7	0.087	350	
			30	-13	0.086	200	
			35	-19	0.107	50(1000)	
			40	-26	0.11	890	
			45	-33	0.113	780	
			50	-38	0.131	650	
			55	-45	0.137	520	
			60	-51	0.15	400	
			65	-58	0.136	250	
68	-62	0.124	200				

*ที่ปริมาตรน้ำ 50(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.29 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
12	9	30	0	24	0.063	1000	655.2
			5	19	0.065	860	
			10	12	0.06	750	
			15	6	0.064	630	
			20	0	0.058	490	
			25	-7	0.092	370	
			30	-13	0.112	240	
			35	-20	0.12	100	
			40	-26	0.125	25(1000)	
			45	-33	0.122	880	
			50	-39	0.149	750	
			55	-45	0.14	640	
			60	-51	0.149	550	
			63	-56	0.03	330	
			65	-58	0.021	290	
			70	-72	0.075	250	
72	-80	0.032	190				

*ที่ปริมาตรน้ำ 25(1000) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 1000 มิลลิลิตร

ตาราง ก.30 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
13	12	25	0	24	0.058	950	516.6
			5	19	0.055	860	
			10	13	0.058	780	
			15	6	0.064	680	
			20	0	0.074	560	
			25	-7	0.082	460	
			30	-13	0.104	360	
			35	-20	0.114	260	
			40	-26	0.137	170	
			45	-32	0.146	70(900)	
			50	-39	0.162	860	
			55	-45	0.143	820	
			60	-51	0.198	770	
			65	-58	0.165	700	

*ที่ปริมาตรน้ำ 70(900) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 900 มิลลิลิตร

ตาราง ก.31 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
14	12	25	0	24	0.093	1000	441
			5	19	0.092	900	
			10	13	0.094	800	
			15	6	0.103	700	
			20	0	0.109	560	
			25	-7	0.124	440	
			30	-13	0.118	300	
			35	-19	0.157	200	
			40	-26	0.185	100(900)	
			45	-32	0.19	820	
			50	-39	0.203	710	
			55	-46	0.135	590	

*ที่ปริมาตรน้ำ 100(900) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 900 มิลลิตร

ตาราง ก.32 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาท)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
15	12	30	0	24	0.052	1000	497.7
			5	19	0.067	850	
			10	12	0.071	740	
			15	6	0.081	640	
			20	0	0.089	500	
			25	-7	0.103	370	
			30	-13	0.114	250	
			35	-19	0.133	190	
			40	-26	0.144	80(900)	
			45	-32	0.149	820	
			50	-39	0.153	720	
			55	-45	0.16	620	
			60	-51	0.176	520	
			63	-55	0.153	460	

*ที่ปริมาตรน้ำ 80(900) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 900 มิลลิลิตร

ตาราง ก.33 บันทึกค่าการทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรต 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 12 โวลต์ ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$

สารละลายโซเดียมไนเตรต							
ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ความเร็ว 8 $\mu\text{m}/\text{min}$							
รูที่เจาะ	โวลต์	ปั๊ม	เวลา(นาที)	step	กระแส(A)	ปริมาตรน้ำ(mL)	ระยะที่เจาะ(μm)
16	12	30	0	24	0.068	950	655.2
			5	19	0.079	850	
			10	13	0.088	750	
			15	6	0.095	650	
			20	0	0.109	560	
			25	-7	0.107	470	
			30	-13	0.129	390	
			35	-19	0.131	290	
			40	-26	0.142	200	
			45	-32	0.151	100(900)	
			50	-39	0.168	820	
			55	-44	0.171	750	
			60	-47	0.162	690	
			63	-56	0.143	600	
			65	-73	0.143	500	
68	-80	0.131	440				

*ที่ปริมาตรน้ำ 100(900) หมายถึงน้ำเหลือปริมาณที่น้อยจึงเติมน้ำเพิ่ม เป็น 900 มิลลิลิตร



การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

(มวลโมเลกุลของ Na = 23 , Cl = 35)

หามวลโมเลกุลของของผสมหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$MW_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n X_i MW_i$$

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

$$MW_{\text{NaCl}} = (1 \times 23) + (1 \times 35) = 58 \text{ g}$$

หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ ได้ดังนี้

$$\text{โมลาร์} = \frac{\text{จำนวนโมลของสารตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}}$$

$$C = \frac{N}{V} = \frac{\frac{A}{MW_{\text{NaCl}}}}{V}$$

โดยที่ c = ความเข้มข้นของสารละลายมีหน่วยเป็น โมลาร์ (mol/L)

A = น้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

N = จำนวนโมลของสาร มีหน่วยเป็น โมล (g/mol)

V = ปริมาตรของน้ำกลั่น 1 ลิตร

$$0.1 = \frac{A}{58}$$

$$A = 5.8 \text{ g}$$

การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.15 โมลาร์

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

(มวลโมเลกุลของ Na = 23 , Cl = 35)

หามวลโมเลกุลของของผสมหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$MW_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n X_i MW_i$$

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

$$MW_{\text{NaCl}} = (1 \times 23) + (1 \times 35) = 58 \text{g}$$

หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.15 โมลาร์ ปริมาณ 1000 cm³ ได้ดังนี้

$$C = \frac{N}{V} = \frac{\frac{A}{MW_{\text{NaCl}}}}{V}$$

โดยที่ c = ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น โมลาร์ (mol/L)

A = น้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

N = จำนวนโมลของสาร มีหน่วยเป็น โมล (g/mol)

V = ปริมาตรของน้ำกลั่น 1

$$0.15 = \frac{\frac{A}{58}}{1 \text{ ลิตร}}$$

$$A = 8.7 \text{ g}$$

การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์

โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

(มวลโมเลกุลของ $\text{Na} = 23$, $\text{N} = 14$, $\text{O} = 16$)

หามวลโมเลกุลของของผสมได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$MW_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n X_i MW_i$$

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

$$MW_{\text{NaNO}_3} = (1 \times 23) + (1 \times 14) + (3 \times 16) = 85 \text{ g}$$

หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์

$$C = \frac{N}{V} = \frac{A}{V}$$

โดยที่ c = ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น โมลาร์ (mol/L)

A = น้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

N = จำนวนโมลของสาร มีหน่วยเป็น โมล (g/mol)

V = ปริมาตรของน้ำกลั่น 1 ลิตร

$$0.1 = \frac{A}{1}$$

$$A = 8.5 \text{ g}$$

การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ทำสารละลายอีเล็กโทรไลต์ 0.15 โมลาร์

โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

(มวลโมเลกุลของ Na = 23 , N = 14 , O = 16)

หามวลโมเลกุลของของผสมหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$MW_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n X_i MW_i$$

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

$$MW_{\text{NaNO}_3} = (1 \times 23) + (1 \times 14) + (3 \times 16) = 85 \text{g}$$

หาน้ำหนักของสารประกอบที่
ใช้ในการผสมสารละลายอีเล็ก
โทรไลต์ 0.15 โมลาร์

$$C = \frac{N}{V} = \frac{A}{V}$$

โดยที่ c = ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น โมลาร์ (mol/l)

A = น้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอีเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

N = จำนวนโมลของสาร มีหน่วยเป็น โมล (g/mol)

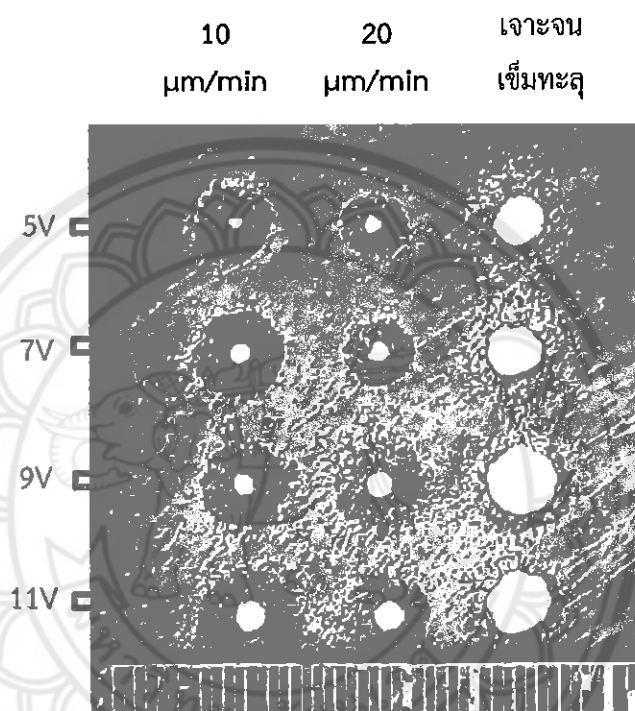
V = ปริมาตรของน้ำกลั่น 1 ลิตร

$$0.15 = \frac{A}{1}$$

$$A = 12.75 \text{ g}$$

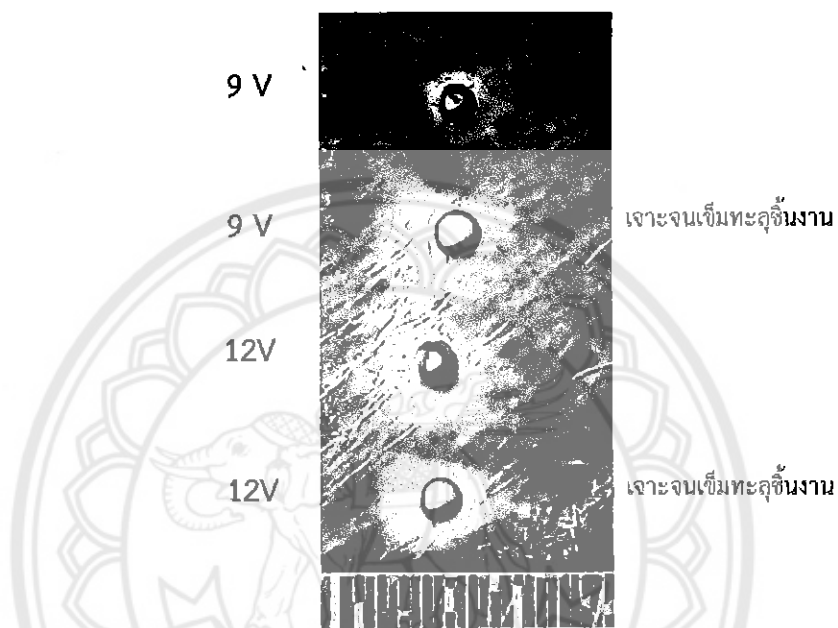


การทดลองที่ 1 ทดลองโดยใช้เข็มขนาด 300 ไมโครเมตรในการเจาะรูที่แผ่นสแตนเลสหนา 500 ไมโครเมตร โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยใช้ความต่างศักย์ 5 โวลต์ 7 โวลต์ 9 โวลต์ และ 11 โวลต์ อัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้คือ 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 รูเจาะด้วยเข็มขนาด 300 ไมโครเมตรด้วยโซเดียมคลอไรด์

การทดลองที่ 2 ทดลองโดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรท ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใช้ความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ และ 12 โวลต์ ที่อัตราเร็วของแท่งอิเล็กโทรด 8 ไมโครเมตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ ค.2



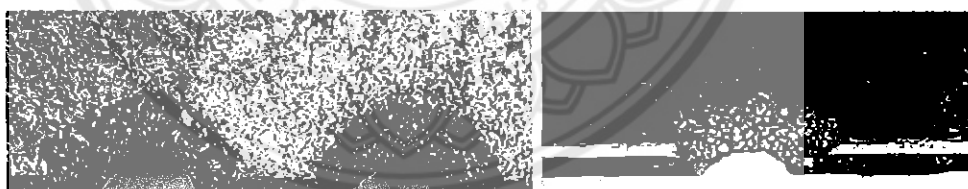
รูป ค.2 รูเจาะด้วยเข็มขนาด 300 ไมโครเมตรด้วยโซเดียมไนเตรท

การทดลองที่ 3 ทดลองเพื่อดูความเป็นไปได้ในการกัดในแนวแกน X และ แกน Y โดยใช้สารละลายโซเดียมไนเตรทที่ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ใช้ความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ อัตราเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแกน X Y อยู่ที่ 8 ไมโครเมตรต่อนาที ผลการทดลองดังรูปที่ ค.3



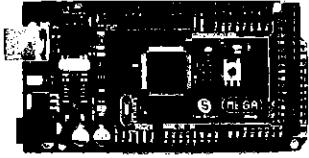
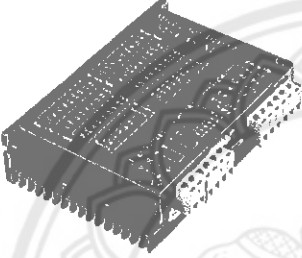
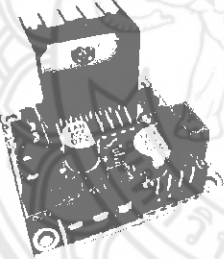

รูป ค.3 การกัดในแนวแกน X Y


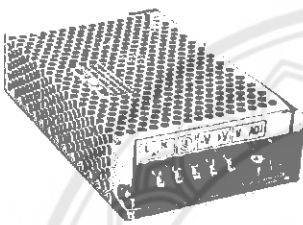


การทดลองที่ 4 ทดลองโดยการนำแผ่นสแตนเลส 2 แผ่นมาวางต่อกันแล้วการเจาะระหว่างรอยต่อของแผ่นสแตนเลส โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในการเจาะใช้ความต่างศักย์ 5 7 9 และ 11 โวลต์ เพื่อดูลักษณะของรูที่เกิดขึ้น ผลการทดลองดังรูปที่ ค.4

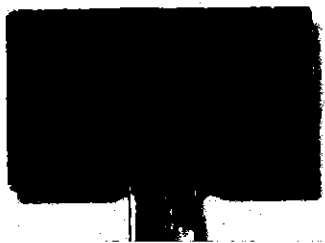

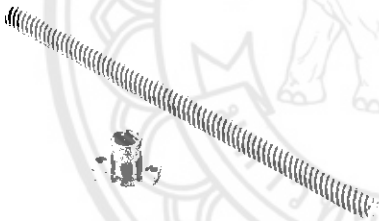
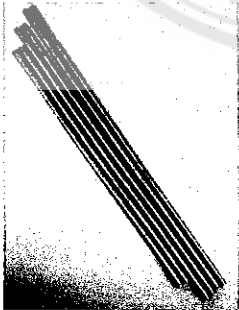


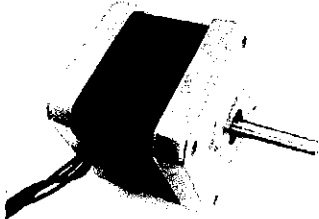



รูป ค.4 ลักษณะรูที่เจาะระหว่างรอยต่อของแผ่นสแตนเลส

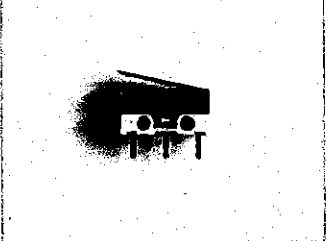

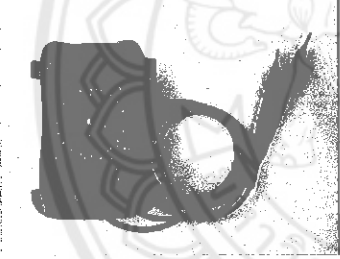
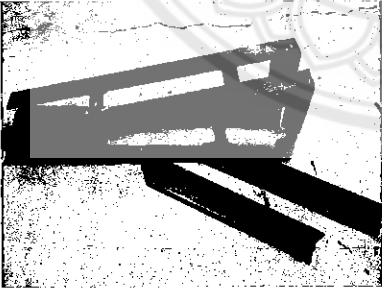


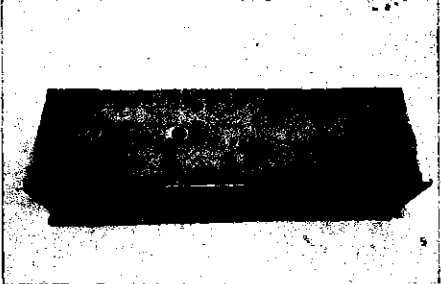
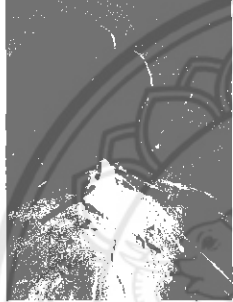


	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA
	บอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น TB6600
	บอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น L298N
	แกน Z สำเร็จรูป

	<p>ปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Peristaltic pump</p>
	<p>Power Supply</p>
	<p>ท่อซิลิโคนใช้ในการลำเลียงสารอิเล็กทรอนิกส์</p>
	<p>เข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์</p>

	ชิ้นงานใช้ในการทดสอบชนิด Stainless Steel
	Linear Ball Bearing Block
	Lead Screw
	เพลานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

	Stepper Motor ที่ใช้ในการขับ XY Stage
	Stepper Motor ที่ใช้ในการขับ Z Stage
	Coupling ขนาด 5 มิลลิเมตร – 8 มิลลิเมตร
	Support ที่มีช่องสวมเพลาขนาด 8 มิลลิเมตร

	Limit Switch
	Bearing
	มัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์
	โครงสร้างสำหรับยึดแกน Z

	<p>เหล็กงานน้ำที่ใช้สำหรับเป็นฐานของ Micro ECM</p>
	<p>ขั้นตอนการประกอบโครงสร้างแกน Z</p>
	<p>แกน Z ที่ประกอบเข้ากับเหล็กงาน</p>
	<p>การเจาะรูก่อนทำการยึดด้วยน็อต</p>

	<p>ทำการวัดความเที่ยงตรงของระบบ</p>
	<p>ทำการทดลองเจาะรูตามที่ได้ออกแบบ</p>



ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ - สกุล : นายชาญชัย คำสุทธิ
 วัน เดือน ปี เกิด : 09 มิถุนายน พ.ศ. 2537
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 74 หมู่ที่ 8 ตำบล โคกสลด อำเภอบางกระพุ่ม จังหวัด
 พิชณโลก 65110

ประวัติการศึกษา

2559 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร
 2555 : มัธยมศึกษา โรงเรียน บางกระพุ่มพิทยาคม

ชื่อ - สกุล : นาย ดำรงค์ ถาวรกุล
 วัน เดือน ปี เกิด : 16 สิงหาคม พ.ศ. 2537
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 16 หมู่ที่ 3 ตำบล สนามคลี อำเภอบางกระพุ่ม จังหวัด
 พิชณโลก 65110

ประวัติการศึกษา

2559 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร
 2555 : มัธยมศึกษา โรงเรียน บางกระพุ่มพิทยาคม

ชื่อ - สกุล : นาย อนุชา อินยา
 วัน เดือน ปี เกิด : 21 พฤศจิกายน 2537
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 14 หมู่ที่ 5 ตำบล น้ำไผ่ อำเภอน้ำป่าด จังหวัด
 อุตรดิตถ์ 53110

ประวัติการศึกษา

2559 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร
 2555 : มัธยมศึกษา โรงเรียน สหคริสเตียน