

อภิธานการ



สำนักหอสมุด



การศึกษาระบบกัดวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี
Study of Electrochemical Micromachining

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันลงทะเบียน..... 5 ก.ย. 2558
เลขทะเบียน..... 1919668
เลขเรียกหนังสือ.....

นายภาณุเดช ต้วงทำ รหัส 55360772

นายจักรพงษ์ จั๊บแสงจันทร์ รหัส 55362950

นายพฤตินัย มูลณี รหัส 55363360

๗๕
๓๕๓๓
๒๕๕๗

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีการศึกษา 2558



ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อโครงการ : การศึกษาระบบกักตัวสเตรตซ์ไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี

ผู้ดำเนินโครงการ : นายภาณุเดช ตั้งท่า รหัส 55360772
 : นายจักรพงษ์ จับแสงจันทร์ รหัส 55362950
 : นายพุดตินัย มุลณี รหัส 55363360

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม

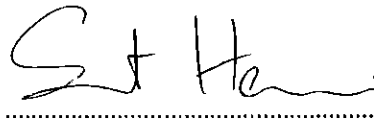
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล


ปีการศึกษา : 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

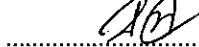
คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร.สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย)

.....ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

หัวข้อโครงการ	: การศึกษาระบบกัดวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายภาณุเดช ด้วงท่า รหัส 55360772
	: นายจักรพงษ์ จัปแสงจันทร์ รหัส 55362950
	: นายพฤตินัย มูลณี รหัส 55363360
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	: ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	: ดร.ภมรรัตน์ จันทรธรรม
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ และพัฒนาระบบเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ (1) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบ X-Y ซึ่งมีความละเอียด 40 ไมโครเมตร ขับเคลื่อนด้วย stepping motors ร่วมกับ lead screws โดยควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (2) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีความละเอียด 1 ไมโครเมตร ทำได้โดยนำเครื่องทดสอบแรง UTM รุ่น H50KS มาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมความเร็วในการเจาะรูระดับไมโครได้อย่างเหมาะสม (3) ระบบฉีดและควบคุมสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้ peristaltic pump ร่วมกับการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ และ (4) โปรแกรมควบคุมการทำงานของกระบวนการซึ่งพัฒนาด้วยภาษา LabVIEW โดยในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี ทำโดยการนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในการเจาะรูบนแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้แท่งอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 550 ไมโครเมตร สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มี 3 ชนิดคือ NaCl H₂SO₄ และ NaNO₃ ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สำหรับปัจจัยด้านศักย์ไฟฟ้านั้นมีการปรับค่าเป็นสี่ระดับคือ 4.5 , 6 , 7.5 และ 9 โวลต์ ด้านอัตราการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรดแบ่งเป็น 2 ระดับคือ 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ในการประเมินขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และคุณภาพรูเจาะด้วยภาพถ่ายจากมุมมองด้านบน

ผลการทดลองบ่งชี้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ในการเจาะรูระดับไมโครได้สำเร็จ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 363-1026 ไมโครเมตร โดยในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด และคุณภาพของรูเจาะพบว่า ความต่างศักย์จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยหากความต่างศักย์สูงจะทำให้ใช้เวลาในการเจาะน้อยกว่า โดยระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการนั้นจะส่งผลกระทบต่อขนาด

ของรูเจาะ ถ้าใช้เวลามากจะทำให้รูเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นด้วย การใช้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งอิเล็กโทรดที่เหมาะสมนั้น จะรักษาช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดให้พอเหมาะ หากเคลื่อนที่เร็วเกินไปจะทำให้เกิดการสัมผัสกันของแท่งอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหยุด ทั้งนี้หากเคลื่อนที่ช้าจะทำให้รูเจาะมีขนาดใหญ่มากขึ้นได้เนื่องจากมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก ในส่วนของการเลือกใช้สารละลายพบว่า การใช้โซเดียมไนเตรทควบคู่กับการใช้ความต่างศักย์ที่ 9 โวลต์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดเป็น 10 ไมโครเมตรต่อนาทีจะทำให้ได้คุณภาพของรูเจาะดีที่สุด



Project Title	: Study of electrochemical micro machining		
Name	: Mr.Phanudate	Dongtam	ID. 55360772
	: Mr.Jukkamong	Jubsangjun	ID. 55362950
	: Mr.Phuretinai	Moonnee	ID. 55363360
Project advisor	: Dr.Sumet	Heamawatanachai	
Project advisor	: Dr.Pamonrat	Juntam	
Major	: Mechanical Engineering		
Department	: Mechanical Engineering		
Academic year	: 2558		

Abstract

This research is the design and development of an electrochemical micromachining system. The developed system consists of: (1) an XY motion control system with resolution of 40 μm actuated by 2 stepping motors; (2) a Z-axis motion control using a UTM model H50KS which has resolution of 1 μm ; (3) an electrolyte flow control system using 2 peristaltic pumps; and (4) a control software coding with LabVIEW program. 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 . Three types of electrolyte (NaCl , H_2SO_4 and NaNO_3) with concentration of 0.1 M were used. There were 4 steps of DC supply voltages in this experiment which were 4.5V, 6V, 7.5V and 9V. The using tool feed rates were 10 and 20 $\mu\text{m}/\text{min}$. The size and quality of holes were analyzed using a microscope.

The results from experiments reveal that the system was capable to drill micro-holes ranging from 363-1026 μm . Increment of supply voltage will increase the rate of reaction result in reducing of drilling time. The feed rate should be adjusted to a suitable value to maintain the gap between the electrode and the work piece. In case of too high feed rate, the electrode would touch the work piece, then the electrochemical reaction stop. Lower feed rate will increase the reaction time and make the drilled holes larger. In conclusion, the best quality of the drilled holes occurs using NaNO_3 as electrolyte with 9V power supply and feed rate of 10 $\mu\text{m}/\text{min}$.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการศึกษาาระบบเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่านซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกใคร่ขอกราบพระคุณคือท่าน ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ได้ให้ความรู้ คำแนะนำตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียนโครงการการศึกษาาระบบเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีนี้ออกมาสมบูรณ์ที่สุด ท่านที่สอง ท่าน ดร.ภมรรัตน์ จันทรธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้คำแนะนำในการผสมสารเคมี

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบ ท่านแรก ท่าน รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์ ท่านที่สอง ท่าน อาจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของรูปเล่มโครงการการศึกษาาระบบเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

ขอขอบคุณหน่วยงานหลายหน่วยงานซึ่งหน่วยงานแรกขอกราบขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ (PMET) ที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำต่างๆ ห้องที่ใช้ในการทำโครงการ อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ หน่วยงานที่สอง คือ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำต่างๆ เทคนิคการนำเสนอรายงานปากเปล่า และเทคนิคในการใช้เครื่องมือช่าง ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน หน่วยงานที่สาม คือ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมเคมี ที่ได้ให้สารประกอบเคมีเพื่อผสมเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สุดท้ายนี้ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้ศึกษาเสมอมา ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
Abstract.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญกราฟ.....	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte).....	5
2.1.2 กระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (ECM).....	6
2.1.3 กระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้า (EDM)	6
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	7
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	20
3.1 ศึกษาและออกแบบระบบเจาะวัสดุระดับไมโคร	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2	วิธีการทดลอง 25
3.2.1	การทดลองรูปแบบที่ 1 แผ่นสแตนเลสกับน้ำเกลือ (NaCl).....26
3.2.2	การทดลองรูปแบบที่ 2 แผ่นสแตนเลสกับกรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄).....28
3.2.3	การทดลองรูปแบบที่ 3 แผ่นสแตนเลสกับโซเดียมไนเตรต (NaNO ₃).....30
3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้..... 32
3.4	วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล 40
บทที่ 4	ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง 41
4.1	ผลการทดลองชุดที่ 1โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)..... 41
4.2	ผลการทดลองชุดที่ 2 กรดซัลฟิวริก (H ₂ SO ₄)..... 45
4.3	ผลการทดลองชุดที่ 3โซเดียมไนเตรท (NaNO ₃) 48
บทที่ 5	สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ52
5.1	สรุปผล 52
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 53
อ้างอิง.....55
ภาคผนวก ก	ตารางบันทึกผลการทดลอง56
ภาคผนวก ข	ตัวอย่างการคำนวณ.....62
ภาคผนวก ค	รูปภาพแสดงการสร้างเครื่อง และโปรแกรม66
ภาคผนวก ง	การทดสอบ Pump76
ภาคผนวก จ	ทดลองเพิ่มเติมกับวัสดุชนิดอื่นๆ.....78
ประวัติผู้จัดทำ.....85

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน	4
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ EDM กับ ECM	7
ตารางที่ 3.1 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 1	26
ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 2	28
ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 3	30
ตารางที่ 3.4 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
ตารางที่ 4.1 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (NaCl)	44
ตารางที่ 4.2 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (H ₂ SO ₄)	48
ตารางที่ 4.3 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (NaNO ₃)	51
ตาราง ก.1 รูปแบบการทดลองชุดที่ 1	57
ตาราง ก.2 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-16 (แผ่นที่ 1)	57
ตาราง ก.3 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 17-32 (แผ่นที่ 2)	58
ตาราง ก.4 รูปแบบการทดลองชุดที่ 2	59
ตาราง ก.5 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-12 (แผ่นที่ 3) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที	59
ตาราง ก. 6 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 13-28 (แผ่นที่ 4) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที	60
ตาราง ก.7 รูปแบบการทดลองชุดที่ 3	60
ตาราง ก.8 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-8 (แผ่นที่ 5) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที	61
ตาราง ง.1 ผลการทดสอบ pump (หมุนตามเข็มนาฬิกา)	77
ตาราง ง.2 ผลการทดสอบ pump (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)	77

สารบัญกราฟ

หน้า

กราฟที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ 1-32 (NaCl).....	42
กราฟที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ (NaCl).....	43
กราฟที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะความลึกของอิเล็กโทรดที่ทำให้ ขึ้นงานทะเล (NaCl)	44
กราฟที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ (H ₂ SO ₄).....	46
กราฟที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลา (H ₂ SO ₄).....	47
กราฟที่ 4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะที่ขึ้นงานทะเล (H ₂ SO ₄)	47
กราฟที่ 4.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ ที่อัตราการเคลื่อนที่ ของอิเล็กโทรด 10 (NaNO ₃).....	49
กราฟที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ ที่อัตราการเคลื่อนที่ของอี เล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที (NaNO ₃).....	50
กราฟที่ 4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะความลึกที่ทำให้ขึ้นงานทะเล ที่ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที (NaNO ₃).....	50

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบหลักของกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี.....	2
รูปที่ 2.1 แสดงสารละลายอิเล็กโทรไลต์	5
รูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง SEDCM [2].....	7
รูปที่ 2.3 ชิ้นงานจากการกัดด้วยกระบวนการ EDM และ ECM [2].....	8
รูปที่ 2.4 แสดงกราฟแสดงค่าระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดและระยะความลึกของการกัด [2].....	8
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ TSECDD [3].....	9
รูปที่ 2.6 แสดง Cross section of a micro-hole machined [3].....	9
รูปที่ 2.7 แสดงชิ้นจากกระบวนการEDM และTSECDD [3]	10
รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการสร้างไมโครอิเล็กโทรดด้วย ECM [4].....	11
รูปที่ 2.9 แสดงชิ้นงานที่ได้ [4]	11
รูปที่ 2.10 แสดงการกำหนดตัวแปรต่างๆ [5].....	12
รูปที่ 2.11 แสดงการสะสมฟองออกซิเจน ไว้ที่บริเวณมุมระหว่าง PDMS mask กับชิ้นงาน [5].....	12
รูปที่ 2.12 a แสดงรูปที่ได้จากการใช้ PDMS mask หน้า 50 ไมโครเมตร [4] b แสดงรูปที่ได้จากการใช้ PDMS mask หน้า 250 ไมโครเมตร [5].....	13
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟแสดงความลึกเมื่อเพิ่มเวลาเรื่อยๆ [5].....	13
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟแสดงความลึกเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆ [5]	14
รูปที่ 2.15 แสดงกระบวนการเจาะด้วยไฟฟ้าเคมีและการขัด [6]	14
รูปที่ 2.16 แสดงรูเจาะที่เสร็จสิ้นกระบวนการเรียบร้อยแล้ว [6].....	15
รูปที่ 2.17 แสดงภาพตัดด้านข้างของรูเจาะ [6].....	15
รูปที่ 2.18 แสดงแผนผังของระบบ [7].....	16
รูปที่ 2.19 แสดงชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ EDM และ ECM ตามลำดับจากซ้ายไปขวา บนลงล่าง [7].....	17
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการเจาะรู [8]	18
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการหุ้มฉนวน [8]	18
รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะเครื่อง ECM [9]	19
รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบของพื้นผิวหลังจาก pulsed [9]	19
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานทั้งหมดของระบบการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี	20
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี	21

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ	21
รูปที่ 3.4 แสดงชุดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ XY	22
รูปที่ 3.5 แสดงบอร์ดชุดควบคุมการทำงาน	22
รูปที่ 3.6 แสดงปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารละลายอีเล็กโทรไลต์	23
รูปที่ 3.7 แสดงชุดลดแรงดันภายในท่อสายยางของระบบการฉีดสารละลายอีเล็กโทรไลต์	23
รูปที่ 3.8 แสดงโปรแกรมควบคุมระบบด้วยภาษา Labview	24
รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งชุดทดลองเข้ากับเครื่อง UTM	24
รูปที่ 3.10 แสดงภาพระหว่างกระบวนการเจาะ	25
รูปที่ 3.11 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-16 บนแผ่นสแตนเลส	27
รูปที่ 3.12 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 17-32 บนแผ่นสแตนเลส	27
รูปที่ 3.13 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-12 บนแผ่นสแตนเลส	29
รูปที่ 3.14 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 13-28 บนแผ่นสแตนเลส	29
รูปที่ 3.15 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-8 บนแผ่นสแตนเลส	30
รูปที่ 3.16 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	33
รูปที่ 3.17 แสดงบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รุ่น L298N	33
รูปที่ 3.18 แสดงปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารอีเล็กโทรไลต์ชนิด Peristaltic pump	33
รูปที่ 3.19 แสดงท่อ PVC ที่ใช้ในการทำชุดลดแรงดันภายในสายยาง	34
รูปที่ 3.20 แสดงภาพสายยางที่ใช้ในการลำเลียงสารอีเล็กโทรไลต์	34
รูปที่ 3.21 แสดงภาพของเข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอีเล็กโทรด	34
รูปที่ 3.22 แสดงภาพของเครื่อง UTM รุ่น H50KS	35
รูปที่ 3.23 แสดงภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบชนิด Stainless Steel	35
รูปที่ 3.24 แสดงภาพ Linear Ball Bearing Block	35
รูปที่ 3.25 แสดงภาพ Lead Screw	36
รูปที่ 3.26 แสดงภาพเพลลาที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร	36
รูปที่ 3.27 แสดงภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับ XY Stage	36
รูปที่ 3.28 แสดงรูป Coupling ขนาด 5 มิลลิเมตร – 8 มิลลิเมตร	37
รูปที่ 3.29 แสดงภาพ Support ที่มีช่องสวมเพลลาขนาด 8 มิลลิเมตร	37
รูปที่ 3.30 แสดงภาพ Limit Switch	37
รูปที่ 3.31 แสดงภาพของหัวสว่านที่ใช้ในการจับอีเล็กโทรด	38

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.32 แสดงภาพของน็อตที่ใช้ในการจับยึด XY Stage.....	38
รูปที่ 3.33 แสดงภาพของสายไฟที่ใช้ต่อวงจรภายในระบบ	38
รูปที่ 3.34 แสดงภาพ Power Supply ที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ	39
รูปที่ 3.35 แสดงภาพของบีกเกอร์ที่ใช้ในการบรรจุสารอีเล็กโทรไลต์	39
รูปที่ 3.36 แสดงภาพของมัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์ และกระแสไฟฟ้าของระบบ	39
รูปที่ 4.1 แสดงรูเจาะครั้งที่ 1-16 (แผ่นที่ 1).....	41
รูปที่ 4.2 แสดงรูเจาะครั้งที่ 17-32 (แผ่นที่ 2)	42
รูปที่ 4.3 แสดงรูเจาะครั้งที่ 1-12 (แผ่นที่ 3).....	45
รูปที่ 4.4 แสดงรูเจาะครั้งที่ 13-28 (แผ่นที่ 4)	45
รูปที่ 4.5 แสดงภาพรูเจาะ 1-8 (แผ่นที่ 5).....	49
รูปที่ 4.6 แสดงภาพจำลองช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับระยะที่เกิดการกัดชิ้นงานลงไปได้จริง	51
รูป ค.1 แสดงกระเบรรองรับสารอีเล็กโทรไลต์และแท่นจับจับชิ้นงานแบบพร้อมใช้งานแล้ว	67
รูป ค.2 แสดงตัวล้อคกระเบรรองรับสารอีเล็กโทรไลต์และแท่นจับจับชิ้นงาน	67
รูป ค.3 แสดง stage XY ด้านหน้า	68
รูป ค.4 แสดง stage XY ด้านหลัง.....	68
รูป ค.5 แสดง stage XY ข้างขวา.....	69
รูป ค.6 แสดง stage XY ข้างซ้าย.....	69
รูป ค.7 แสดงการวัดและตัดแผ่นสแตนเลส.....	70
รูป ค.8 แสดงการมาร์คตำแหน่งเพื่อเจาะรู	70
รูป ค.9 แสดงการเจาะรู.....	71
รูป ค.10 แสดงการเชื่อมฐาน stage XY	71
รูป ค.11 แสดงการตั้งระดับน้ำเพื่อทำการเจาะรูแบบเรียงเข้ากับฐาน stage XY	72
รูป ค.12 แสดงชุดหัวเจาะเพื่อยึดกับเครื่อง UTM ที่ทำจากเครื่อง 3D Printer	72
รูป ค.13 แสดงอุปกรณ์ใช้ทำแท่นจับชิ้นงาน	73
รูป ค.14 แสดงแท่นจับชิ้นงาน.....	73
รูป ค.15 แสดงชุดลดแรงดันภายในสายยาง.....	74
รูป ค.16 กล่องบอร์ดควบคุมการทำงานของ Stage และ Pump	74
รูป ค.17 แสดงป้อนในการดูดสารละลายอีเล็กโทรไลต์ไปยังเข็มฉีดยา.....	74
รูป ค.18 แผนภาพโปรแกรมควบคุมชุดทดลอง 1	75
รูป ค.19 แผนภาพโปรแกรมควบคุมชุดทดลอง 2.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป จ.1 ภาพรูเจาะ แผ่นสแตนเลส 4000 ไมโครเมตร – โซเดียมคลอไรด์.....	79
รูป จ.2 ภาพรูเจาะ แผ่นสแตนเลส 4000 ไมโครเมตร – โซเดียมไนเตรท.....	80
รูป จ.3 ภาพรูเจาะ แผ่นทองแดง 1300 ไมโครเมตร – โซเดียมคลอไรด์.....	80
รูป จ.4 ภาพรูเจาะ แผ่นทองแดง 1300 ไมโครเมตร – โซเดียมไนเตรท.....	81
รูป จ.5 ภาพรูเจาะแผ่นอลูมิเนียม 400 ไมโครเมตร – โซเดียมคลอไรด์.....	81
รูป จ.6 ภาพรูเจาะแผ่นอลูมิเนียม 400 ไมโครเมตร – โซเดียมไนเตรท.....	82
รูป จ.7 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในกระบวนการของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์.....	82
รูป จ.8 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์.....	83
รูป จ.9 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์.....	83



บทที่ 1

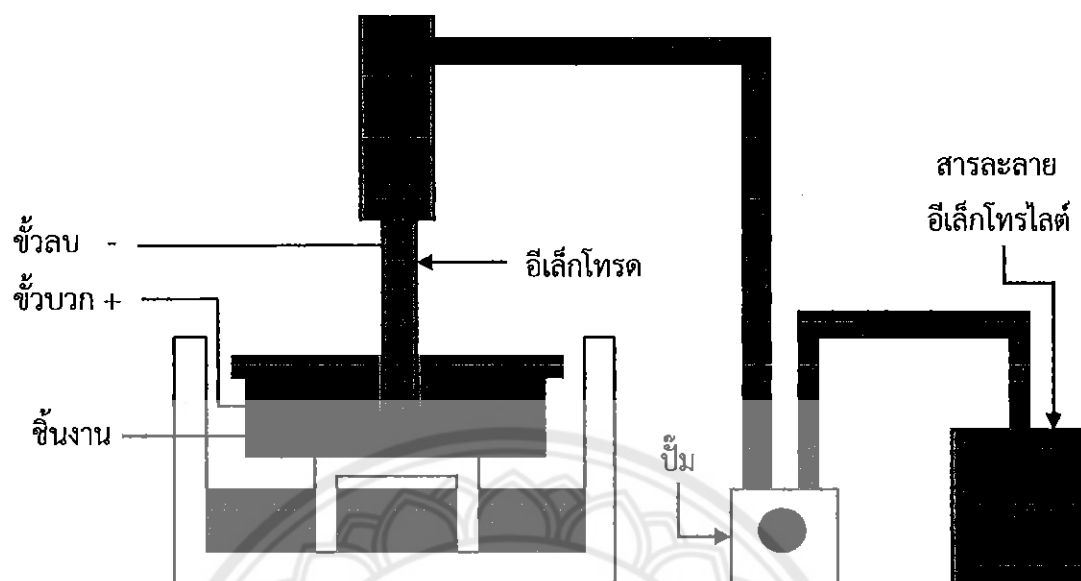
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระดับไมโคร ได้มีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยเทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาในหลายด้าน ทั้งด้านอิเล็กทรอนิกส์ ด้านวัสดุศาสตร์ ด้านการแพทย์ และเทคโนโลยีการบิน โดยในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีต่างๆได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีการผลิตชิ้นส่วนในระดับไมโคร คือการขึ้นรูปหรือสร้างรูปร่างต่างๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าหนึ่งมิลลิเมตร ลงบนวัสดุต่างๆ มีหลายวิธี เช่น การกัดวัสดุเชิงกลระดับไมโคร (Micro-milling) การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) และการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Machining) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยกระแสไฟฟ้าร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดหรือเจาะวัสดุประเภทโลหะ โดยมีข้อดีคือ

1. เป็นกระบวนการที่ไม่อาศัยแรงในการกัดวัสดุทำให้สามารถสร้างรูปร่างบนวัสดุบาง หรืองานระดับไมโครได้
2. ไม่ทำให้เกิดความร้อนสูงบนวัสดุ ทำให้วัสดุไม่เกิดรอยแตกร้าวภายใน
3. โดยทฤษฎีแล้วไม่ทำให้เกิดความสึกหรอต่อแท่งอิเล็กโทรดที่ใช้ ทำให้สามารถใช้อิเล็กโทรดเดิมในการกัดวัสดุได้หลายครั้ง ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ

ส่วนประกอบหลักของกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นแสดงในรูปที่ 1 โดยมีแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ป้อนที่ใช้ในการกัดสารละลายอิเล็กโทรด (Tool) วัสดุชิ้นงาน (Work piece) ซึ่งหลักการของกระบวนการนี้จะเริ่มจากต่อขั้วแอโนด (Anode) ไปที่ชิ้นงาน แล้วต่อขั้วแคโทด (Cathode) ไปที่อิเล็กโทรด จากนั้นก็จะมีการกัดอิเล็กโทรไลต์ไปที่ชิ้นงานตลอดเวลาด้วยป้อน



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบหลักของกระบวนการกักตัววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าไปที่ขั้วงานและตัวอิเล็กโทรด จะทำให้อิเล็กโทรดเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้วัสดุขั้วงานและสารละลายเกิดการแตกตัว และจับกันเป็นสารใหม่ ด้วยกระบวนการกักตัววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีนี้จะสามารถสนับสนุนกระบวนการการขึ้นรูปของวัสดุที่มีขนาดระดับไมโครได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อสร้างส่วนประกอบสำหรับทดลองกระบวนการกักตัววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาการเจาะรูที่เล็กระดับไมโครสเกล

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะเช่น ความต่างศักย์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ

1.2.5 เพื่อศึกษาแนวทางในการออกแบบและพัฒนาเครื่องเจาะรูระดับไมโครด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ชุดทดลองกระบวนการกักตัววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี เพื่อการเจาะรูระดับไมโคร

1.3.2 ได้ความรู้ด้านปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการกักตัววัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

1.4 ขอบเขตของโครงการงาน

1.4.1 สารละลายเจือจางที่ใช้มี 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และโซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

1.4.2 ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเป็นกระแสตรง 4 ระดับ

1.4.3 ทดลองปรับความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 2 ระดับ คือ 10 และ 20 ไมโครเมตร ต่อนาที

1.4.4 วัสดุชิ้นงานหนึ่งชนิดคือ สแตนเลสแผ่นบาง 0.5 มิลลิเมตร

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

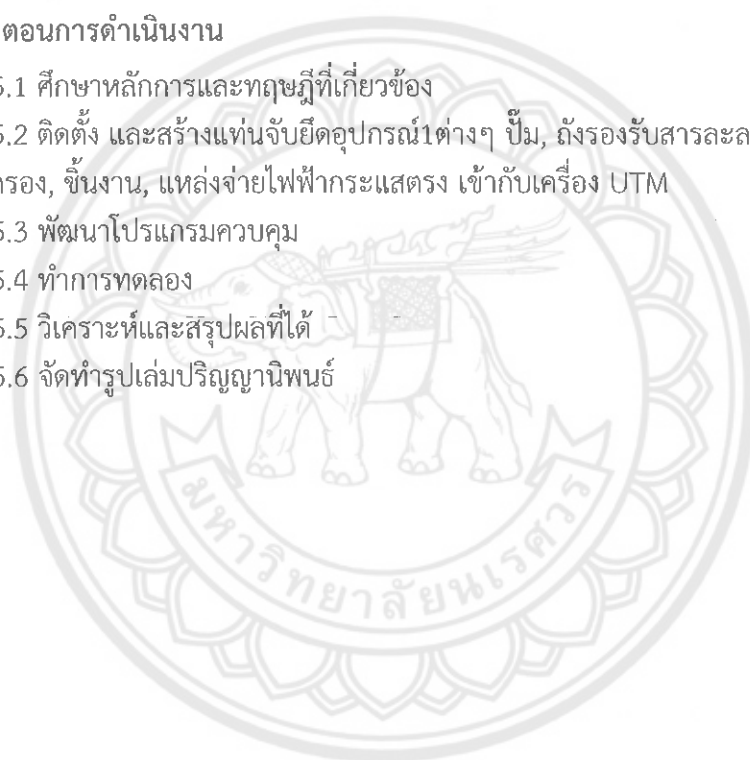
1.5.2 ติดตั้ง และสร้างแท่นจับยึดอุปกรณ์ต่างๆ ปีม, ถังรองรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์, อิเล็กโทรด, กรอง, ชิ้นงาน, แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เข้ากับเครื่อง UTM

1.5.3 พัฒนาโปรแกรมควบคุม

1.5.4 ทำการทดลอง

1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้

1.5.6 จัดทำรูปเล่มปริิญาานิพนธ์



1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงาน

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

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

- 1.7.1 กระดาษ 500 บาท
- 1.7.2 จัดทำรูปเล่ม 2000 บาท
- 1.7.3 ค่าวัสดุไฟฟ้า 3000 บาท
- 1.7.4 ค่าอุปกรณ์อื่นๆ 1500 บาท

บทที่ 2

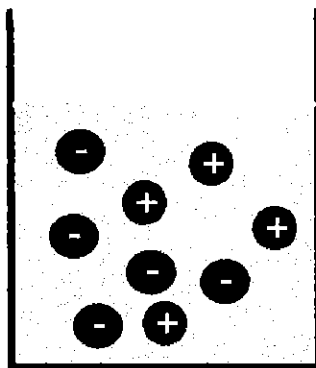
ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็กโทรไลต์ หมายถึง สารที่เมื่อละลายในน้ำจะนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีไอออนซึ่งอาจจะเป็นไอออนบวก หรือไอออนลบเคลื่อนที่อยู่ในสารละลาย สารละลายอิเล็กโทรไลต์นี้อาจเป็นสารละลายกรด เบส หรือเกลือก็ได้ ตัวอย่างเช่น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และสารละลายโซเดียมไนเตรท (NaNO_3) เป็นต้น โดยในสารละลายดังกล่าวประกอบด้วยไอออน H^+ , Cl^- , Na^+ และ OH^- ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ นำไฟฟ้าได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนของอิเล็กโทรไลต์ไม่เท่ากัน อิเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวเป็นไอออนได้มากกว่า ก็จะนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอิเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยกว่า อิเล็กโทรไลต์แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. อิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้มาก อาจแตกตัวได้ 100% และนำไฟฟ้าได้ดีมาก เช่น กรดแก่ และเบสแก่ และเกลือส่วนใหญ่จะแตกตัวได้ 100% เป็นต้น
2. อิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) หมายถึง สารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวได้บางส่วน นำไฟฟ้าได้น้อย



รูปที่ 2.1 แสดงสารละลายอิเล็กโทรไลต์

2.1.2 กระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (ECM)

กระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี^[1] (electrochemical machining) หรือ ECM ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการกัดวัสดุด้วยวิธีการขั้นสูง ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กเช่นในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือชิ้นส่วนที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและซับซ้อน เช่น การขึ้นรูปใบพัด (turbine blade) หรืออาจเป็นการกัดวัสดุบนแผ่นงานที่มีความบางมากๆ และยากแก่การใช้กรรมวิธีอื่นๆ ในการกัดเอาเนื้อวัสดุออกในปริมาณน้อยๆ โดยไม่ก่อให้เกิดความเค้นทางกลหรือทางความร้อนภายในโครงสร้างวัสดุ

ECM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสารละลายอิเล็กโทรไลต์วัสดุงาน และวัสดุต้นแบบ หรือ อิเล็กโทรด แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่กระบวนการ ECM จะจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (anode) เข้าที่ชิ้นงานและขั้วลบ (cathode) ที่อิเล็กโทรด โดยทั้งชิ้นงานและอิเล็กโทรดจะถูกจุ่มลงในสารละลายที่เรียกว่าอิเล็กโทรไลต์ รูปแบบเช่นนี้ก็คือนกระบวนการแยกสารเคมีด้วยไฟฟ้าหรือ Electrolysis นั่นเอง

ปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าไปที่ชิ้นงาน และตัวอิเล็กโทรด ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้วัสดุงานและสารละลายเกิดการแตกตัวและจับตัวกันเป็นสารใหม่ ยกตัวอย่างเช่นวัสดุงานที่เป็นโลหะ Fe เมื่อเกิดการแตกตัวจะกลายเป็น Fe^{2+} ซึ่งจะไปรวมตัวกับไอออน Cl^- และ OH^- ในสารละลายตามลำดับจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น $Fe(OH)_2$ ตกตะกอนเป็นผงอยู่ในสารละลายดังแสดงในสมการที่ 2.1 และจะมีฟองก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดขึ้นที่ขั้วลบ



และจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้น้ำเกิดการแตกตัวในขณะที่ NaCl หรือเกลือไม่ได้หายไปจากระบบดังนั้นเมื่อกระบวนการกัดดำเนินไปได้ในระยะเวลาหนึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายมีมากขึ้นการเติมน้ำเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยน้ำที่หายไปและรักษาระดับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการกัดแบบ ECM

2.1.3 กระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้า (EDM)

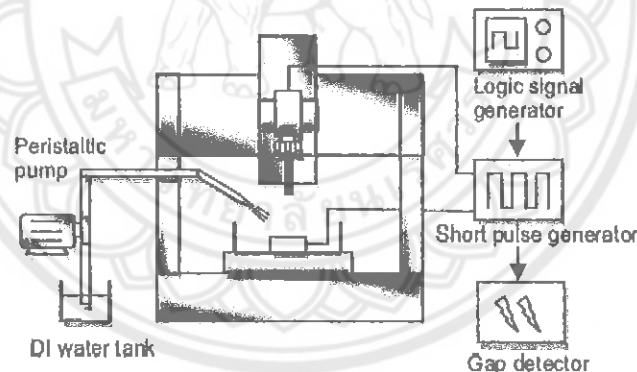
EDM หรือ Electrical Discharge Machine นั้นหมายถึง เครื่องกัดเนื้อโลหะด้วยหลักการทำงานของกระแสไฟฟ้ามีความต่างศักย์สูง โดยการปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุที่เป็นโลหะสองชิ้น ได้แก่ ชิ้นงานและอิเล็กโทรดขณะที่อิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงานก็จะเกิดการสปาร์คระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่เป็นเหล็กเกิดความร้อนและละลายออกมาจนเกิดรูทรงตามอิเล็กโทรด งานที่เหมาะสมกับการใช้ EDM นั้น ส่วนมากจะเป็นงานที่ต้องการความเที่ยงตรง งานที่ไม่สามารถขึ้นรูปหรือตัดเฉือนด้วยวิธีปกติได้ เช่น กลิ้งไม้ได้ กัดด้วยมิลลิ่ง (Milling) ไม่ได้ เจียรนัยไม้ได้ หรือทำได้แต่ทำได้ยากเพราะมีรูปร่างซับซ้อน หรือเป็นชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว เช่น เบ้าแม่พิมพ์

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ EDM กับ ECM

EDM	ECM
ใช้โวลต์สูง	โวลต์ต่ำ
เกิดความร้อน สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลง	ไม่เกิดความร้อน สมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลงใช้
มีความเที่ยงตรงมากกว่า	เที่ยงตรงน้อยกว่า, มีความคลาดเคลื่อน
อีเล็กโทรดเสียหายเร็ว	ใช้อีเล็กโทรดได้นานกว่า

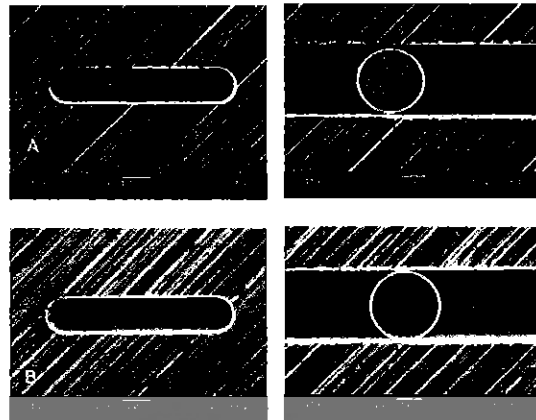
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

จากงานวิจัยของ DangNguyen et al. [2] แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบกระบวนการ EDM กับ ECM เป็นการวิเคราะห์ทกลไกการกัดวัสดุด้วยกระบวนการต่างๆ micro-EDM (กัดด้วยไฟฟ้า), SEDCM (กัดด้วยกระแสไฟฟ้าและไฟฟ้าเคมี), และ micro-ECM (กัดด้วยไฟฟ้าเคมี) โดยใช้ชุดทดลองเดียวกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้เราเห็นความแตกต่างของแต่ละกระบวนการ โดยกระบวนการ ECM ที่เราสนใจจะให้ชิ้นงานที่รอยกัดเรียกว่า ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 และใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอีเล็กโทรดต่ำกว่าดังที่แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.2 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง SEDCM [2]

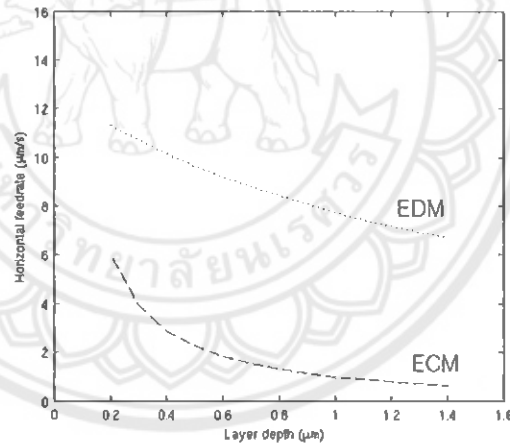
ทดลองโดยการเปลี่ยนค่าอัตราการเคลื่อนที่ของอีเล็กโทรดไปเรื่อยๆ โดยแสดงให้เห็นว่าเมื่ออีเล็กโทรดมีการเคลื่อนที่เร็ว จะทำให้การกัดนั้นถูกกระทำด้วยความต่างศักย์ของไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 (A) ซึ่งก็คือกระบวนการ EDM แต่ถ้าหากอีเล็กโทรดมีการเคลื่อนที่ช้าลงการกัดก็จะถูกกระทำด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 (B) ซึ่งก็คือกระบวนการ ECM นั่นเอง



รูปที่ 2.3 ชิ้นงานจากการกัดด้วยกระบวนการ EDM และ ECM [2]

A แสดงชิ้นงานจากการกัดด้วยกระบวนการ EDM

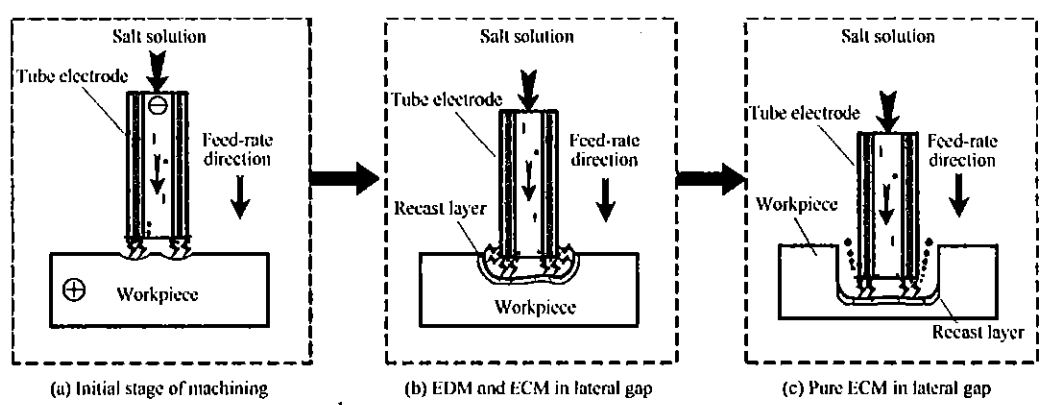
B แสดงชิ้นงานจากการกัดด้วยกระบวนการ ECM



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงค่าระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดและระยะความลึกของการกัด [2]

จากงานวิจัยของ Zhang Yan et al. [3] ซึ่งประยุกต์ใช้กระบวนการ ECM ร่วมกับ EDM โดยเป็นการนำเสนอการขึ้นรูปวัสดุ single-crystal super alloy ที่ใช้ในการผลิตใบพัดกังหันของเครื่องยนต์ไอพ่น ซึ่งมีความแข็งแรงมาก ขึ้นรูปกระบวนการ tube electrode high-speed electrochemical discharge drilling (TSECDD) คือการประยุกต์ใช้กระบวนการ EDM ร่วมกับ ECM

หลักการคือ กระบวนการ TSECDD จะเริ่มกัดวัสดุด้วยกระบวนการ EDM ต่อมาก็ใช้ EDM ผสมกับ ECM จนเมื่อขนาดของช่องว่างรอบๆอิเล็กโทรดขยายมากขึ้น ระบบก็จะเปลี่ยนไปใช้กระบวนการ ECM อย่างเต็มตัวดังที่แสดงในรูปที่ 2.5

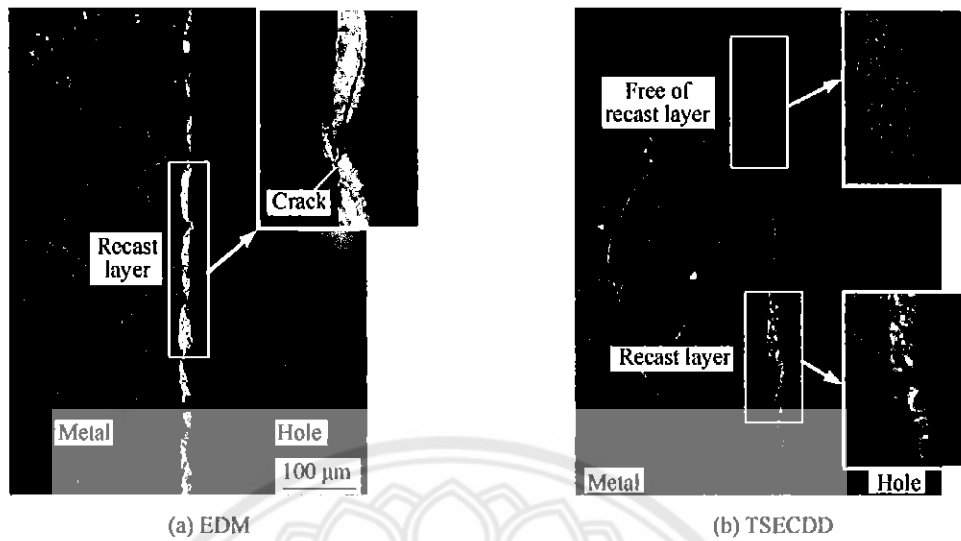


รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ TSECDD [3]

ทำการทดลองโดยการเจาะรูได้ชิ้นงานดังที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดง Cross section of a micro-hole machined [3]

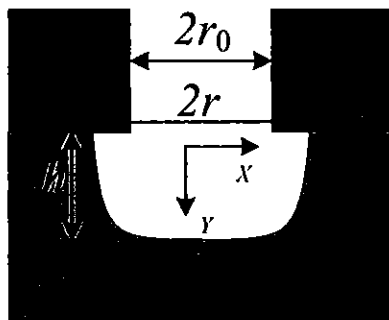


รูปที่ 2.7 แสดงชิ้นงานจากกระบวนการ EDM และ TSECDD [3]

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ TSECDD นั้นมีรอย Crack ที่น้อยกว่ากระบวนการ EDM

จากงานวิจัยของ Yong Liu et al. [4] กระบวนการ ECM ในการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดย การสร้างอิเล็กทรอนิกส์ทรงกระบอกสำหรับใช้ในกระบวนการ ECM สามารถทำได้ด้วยกระบวนการ ECM เช่นกัน แต่จะต่างจากการกัดวัสดุตรงที่เราจะใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นมีรูตรงกลาง โดยขนาดของรูนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ที่เราจะได้

หลักการคืออิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นแผ่นมีรูต่อเข้ากับขั้วลบ จะเชื่อมต่อในสารอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นงาน คือแท่งทั้งสแตนต่อเข้ากับขั้วบวก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 จะค่อยๆเคลื่อนที่ลงผ่านรูบนแผ่น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นก็เหมือนกระบวนการ ECM ทั่วไป แท่งทั้งสแตนที่ต่อกับขั้วบวกจะถูกกัดออก ทำให้ได้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดระดับไมโคร ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9



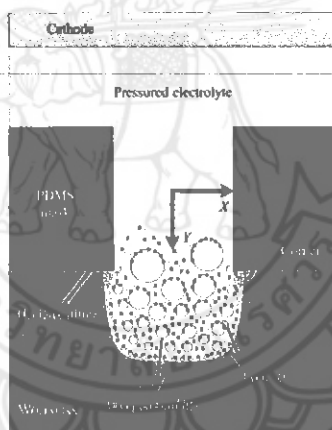
รูปที่ 2.10 แสดงการกำหนดตัวแปรต่างๆ [5]

Δr = ความคลาดเคลื่อน

h = ความลึกของหลุม

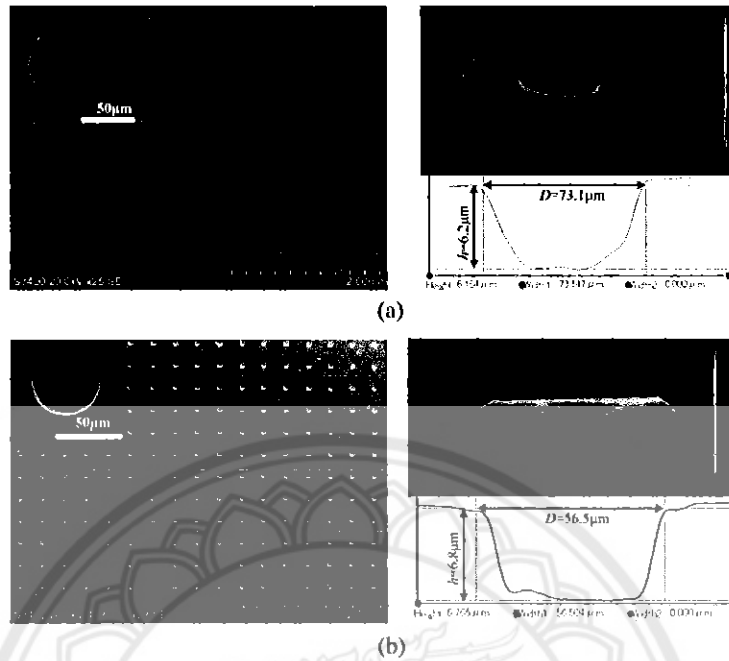
r_0 = รัศมีของหลุมบน PDMS mask

r = รัศมีของหลุมบนชิ้นงาน



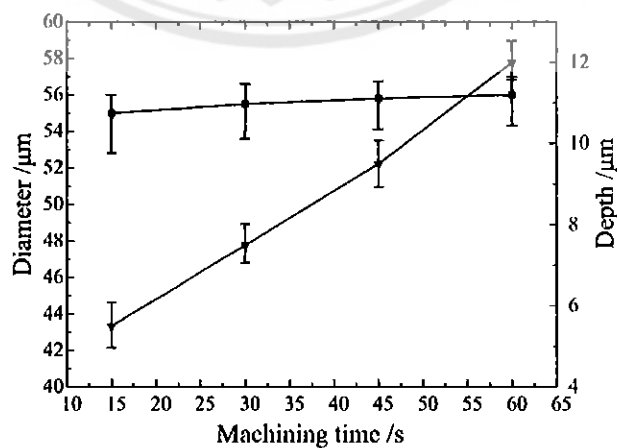
รูปที่ 2.11 แสดงการสะสมฟองออกซิเจน ไว้ที่บริเวณมุมระหว่าง PDMS mask กับชิ้นงาน [5]

ทดลองโดยการใช้ PDMS mask ที่มีรูขนาด 50 ไมโครเมตร ความต่างศักย์ 12 โวลต์ หนา 50 และ 250 ไมโครเมตร ได้ชิ้นงานดังที่แสดงในรูปที่ 2.12 a และ b

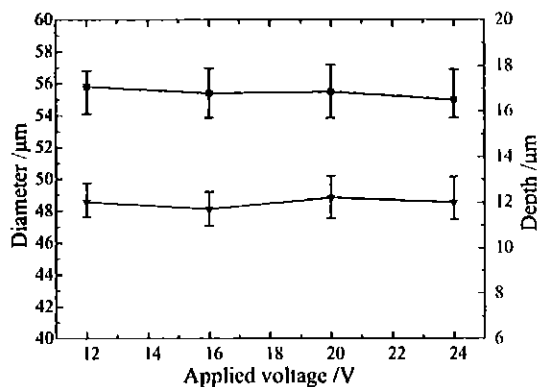


รูปที่ 2.12 a แสดงรูปที่ได้จากการใช้ PDMS mask ทนา 50 ไมโครเมตร [4]
 b แสดงรูปที่ได้จากการใช้ PDMS mask ทนา 250 ไมโครเมตร [5]

จากการทดสอบพบว่าหลุมมีขนาดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย และจะไม่มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ และเพิ่มระยะเวลาในการกัด พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ความลึกของหลุมจะเพิ่มขึ้นน้อยมากๆ (แทบไม่มีผล) แสดงในรูปที่ 2.14 แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดำเนินกระบวนการ ความลึกของหลุมจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นการจะสร้างหลุมที่ความลึกต่างๆนั้นจะควบคุมได้โดยเวลา

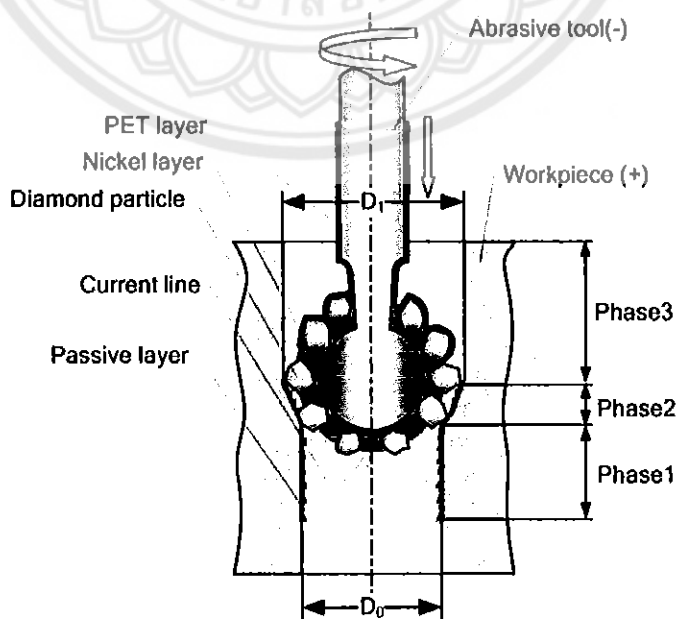


รูปที่ 2.13 แสดงกราฟแสดงความลึกเมื่อเพิ่มเวลาเรื่อยๆ [5]



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟแสดงความลึกเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆ [5]

จากงานวิจัย D. Zhu et al. [6] ความละเอียดของรูเจาะขนาดเล็กโดยผสมผสานกระบวนการของการเจาะด้วยไฟฟ้าเคมีและการขัด เป็นการนำเสนอหลักการของกระบวนการผสมผสานของการเจาะแบบไฟฟ้าเคมี และการขัดโดยอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นแกนเหล็กตรงปลายเป็นทรงกลมเคลือบด้วยอนุภาคเพชร หมุนด้วยความเร็วสูงและกำจัดเนื้อวัสดุด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและใช้หลักการทางแมคคานิคเพื่อนำร่องรูเจาะ โดยรูเจาะที่นำร่องจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_0 ส่วนรูเจาะที่เสร็จสิ้นกระบวนการแล้วมีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_1 ในระหว่างการเจาะอิเล็กโทรดจะต่อกับขั้วลบ ส่วนชิ้นงานจะต่อขั้วบวกโดยที่ปลายของอิเล็กโทรดจะมีอนุภาคเพชรยื่นออกมาจากชั้นผิวของนิเกิล และจะมีช่องว่างระหว่างผิวของนิเกิล และผนังของรูเจาะเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาของไฟฟ้าเคมีระหว่างผิวของรูเจาะ และผิวของนิเกิล



รูปที่ 2.15 แสดงกระบวนการเจาะด้วยไฟฟ้าเคมีและการขัด [6]

ในขั้นตอนการกำจัดวัสดุของกระบวนการจะเกิดขึ้นในระยะที่ 2 ซึ่งให้เห็นตามรูปที่ 2.15 ปฏิกริยาจะเริ่มตันขึ้นเมื่อช่องว่างเต็มไปด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ (NaNO_3)

ระยะที่ 1 จะเริ่มมีการเกิดปฏิกริยาเล็กน้อย

ระยะที่ 2 จะเกิดกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีและกระบวนการขัดไปพร้อมๆ กัน

ระยะที่ 3 จะเป็นระยะที่กระบวนการเสร็จสิ้น

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17

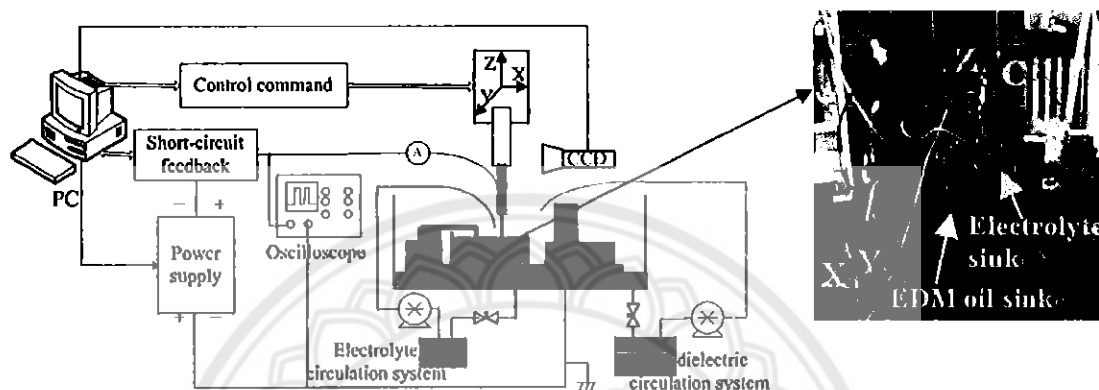


รูปที่ 2.16 แสดงรูเงาะที่เสร็จสิ้นกระบวนการเรียบร้อยแล้ว [6]



รูปที่ 2.17 แสดงภาพตัดด้านข้างของรูเงาะ [6]

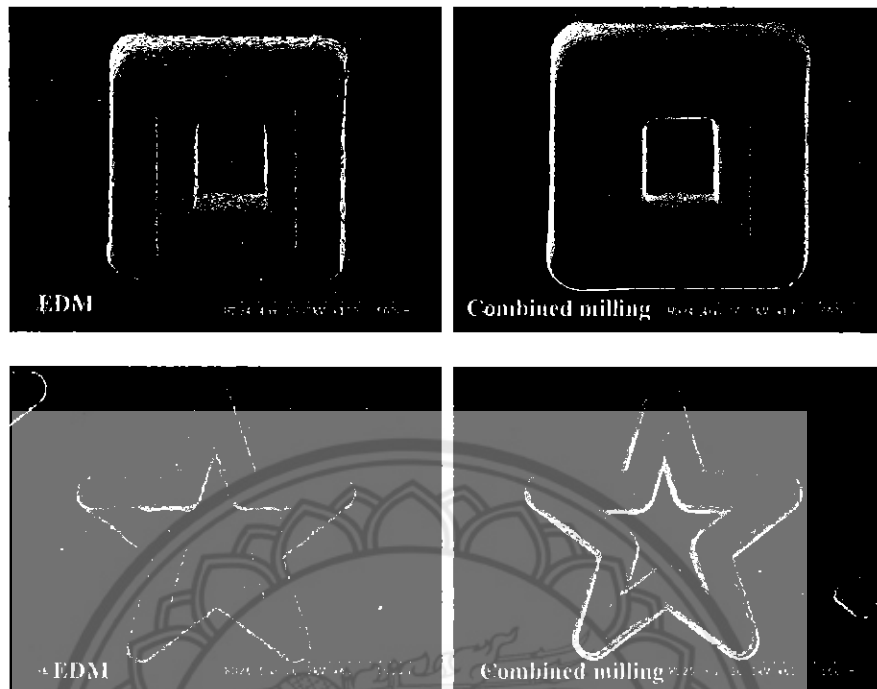
จากงานวิจัย Zenga et al. [7] การศึกษาการทำงานร่วมกันของกระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้าในระดับไมโคร (μ EDM) และกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (μ ECM) สำหรับโครงสร้างโลหะ 3 มิติในระดับไมโคร ในบทความนี้เป็นการศึกษากระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้าในระดับไมโคร (μ EDM) กับกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (μ ECM)



รูปที่ 2.18 แสดงแผนผังของระบบ [7]

จากรูปที่ 2.18 จะมีการควบคุมแกน X และแกน Y ด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ส่วนแกน Z ขับเคลื่อนด้วยลิเนียร์มอเตอร์ อิเล็กโทรดเป็นทั้งสแตนเลสด้วยความเร็วในช่วง 0 ถึง 4000 รอบต่อนาที อิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ NaClO_3 เพื่อใช้ในกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี และใช้ EDM oil ในกระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้า จ่ายสัญญาณในรูปแบบ pulse แรงดัน 3-15 โวลต์

โดยจะขึ้นรูปด้วยกระบวนการกัดวัสดุด้วยกระแสไฟฟ้าในระดับไมโคร (μ EDM) ก่อนจะได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรง และแม่นยำแต่พื้นผิวของชิ้นงานจะมีลักษณะขรุขระและเกิดรอยแตกขนาดเล็ก จึงต้องใช้กระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีในระดับไมโคร (μ ECM) เพื่อที่จะลบรอยขรุขระ และรอยแตกของชิ้นงานให้ดูเรียบเนียนขึ้น



รูปที่ 2.19 แสดงชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ EDM และ ECM ตามลำดับจากซ้ายไปขวา บนลงล่าง [7]

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าเมื่อขึ้นรูปวัสดุด้วยวิธี EDM แล้วผิวของชิ้นงานจะมีลักษณะขรุขระ จึงใช้วิธีการ EDM เพื่อลดรอยขรุขระด้วยความดัน 8 โวลต์ แล้วก็เพิ่มแรงดันเป็น 9 โวลต์ และ 10 โวลต์ จนทำให้พื้นผิวของชิ้นงานดูเรียบเนียน

จากงานวิจัย L. Yong et al. [8] การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีของรูหัวฉีดเชื้อเพลิงกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี (ECM) ของรูสำหรับหัวฉีดเชื้อเพลิงในเครื่องบินไอพ่น จากรูปที่ 2.20 หลังจากได้รูที่เป็นทรงกระบอกเจาะตรงโดยใช้เครื่อง EDM เจาะนำร่องก่อนขึ้นตอนที่ 2 จะเจาะด้วยกระบวนการ ECM แล้วเคลื่อนที่อีเล็กโทรดลงอย่างช้าๆ จากรูปที่ 2.21 จะหุ้มฉนวนที่อีเล็กโทรด เพื่อจะทำให้อีเล็กโทรดทำปฏิกิริยาเฉพาะตรงปลายอีเล็กโทรดเท่านั้นจะได้รูเจาะที่เรียวและมีพื้นผิวที่เรียบขึ้น

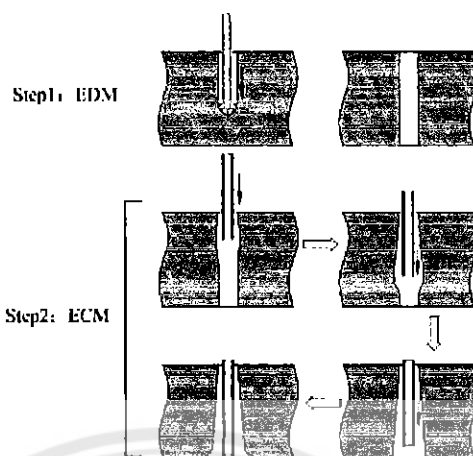
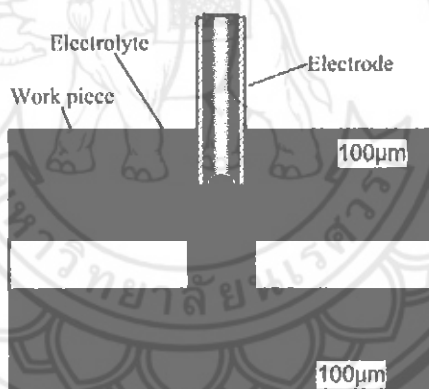


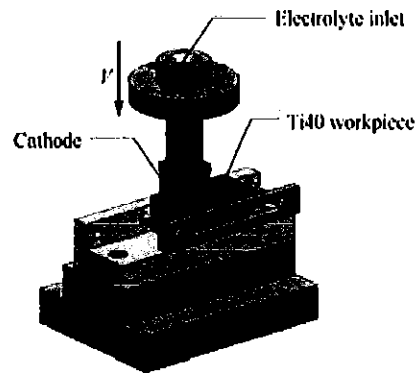
Fig.1 Micro ECM scheme for tapered hole machining

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการเจาะรูแบบเอียง [8]

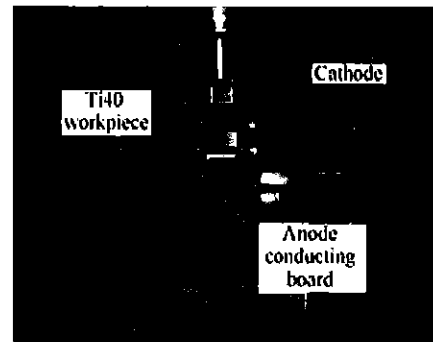


รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการหุ้มฉนวนอีเล็กโทรด [8]

จากงานวิจัย Zhengyang et al. [9] การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีของไททานเนียมอัลลอยที่ทนต่อการเผาไหม้ ศึกษากระบวนการกัดวัสดุโดยใช้ไฟฟ้าเคมี (ECM) ในการผลิตชิ้นส่วนที่สำคัญจากโลหะผสมไททานเนียมอัลลอยที่ทนต่อการเผาไหม้ จากรูปที่ 2.22 แสดงการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมีของไททานเนียมอัลลอยที่ทนต่อการเผาไหม้ซึ่งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของรูที่เจาะด้วยกระบวนการ ECM ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า อัตราการไหลของสารอีเล็กโทรไลต์ อัตราเร็วของอีเล็กโทรด และความเข้มข้นของสารละลาย จากรูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบของพื้นผิวหลังจากการกัดด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และแหล่งจ่ายไฟแบบ pulsed



(a) Schematic of apparatus for ECM of a square cavity



(b) Photograph of apparatus

รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะเครื่อง ECM [9]



รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบของพื้นผิวหลังจาก pulsed [9]

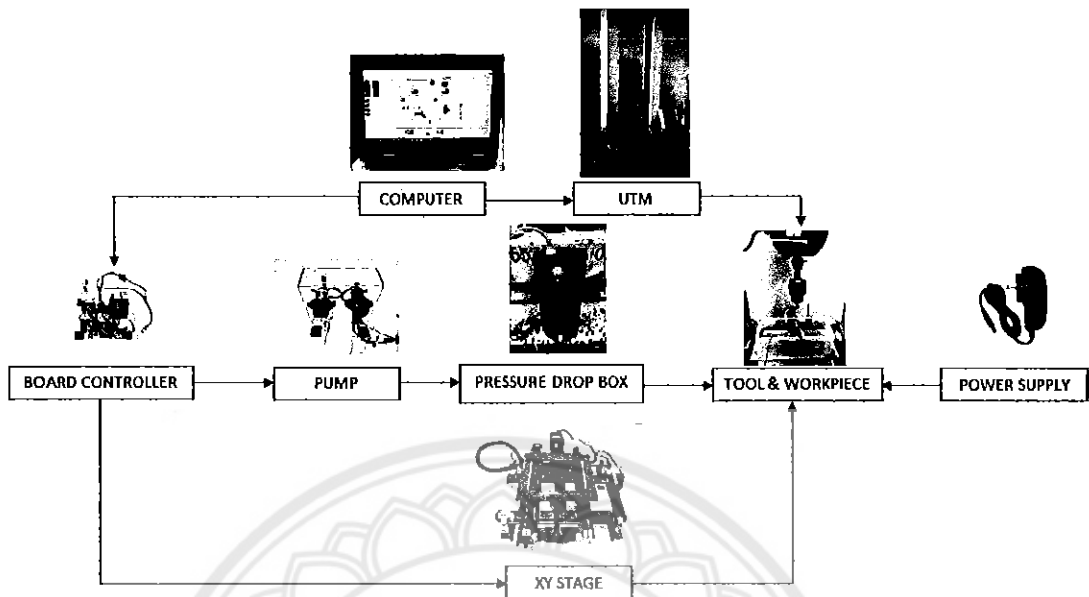
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

ในการทดลองโครงงานนี้ เป็นการทดลองการเจาะวัสดุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี โดยทำการเจาะบนวัสดุสแตนเลสแผ่นบาง 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้สารละลาย โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สารละลาย กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และสารละลาย โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยออกแบบระบบการเจาะเองทั้งหมด เช่น ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในแนวแกน X แกน Y ออกแบบชุดควบคุมการทำงาน ออกแบบปั๊มออกแบบชุดลดแรงดันภายในสาย ออกแบบชุดหัวเจาะที่จะมายึดกับเครื่อง UTM เป็นต้น จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์ ทำการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

3.1 ศึกษาและออกแบบระบบเจาะวัสดุระดับไมโคร

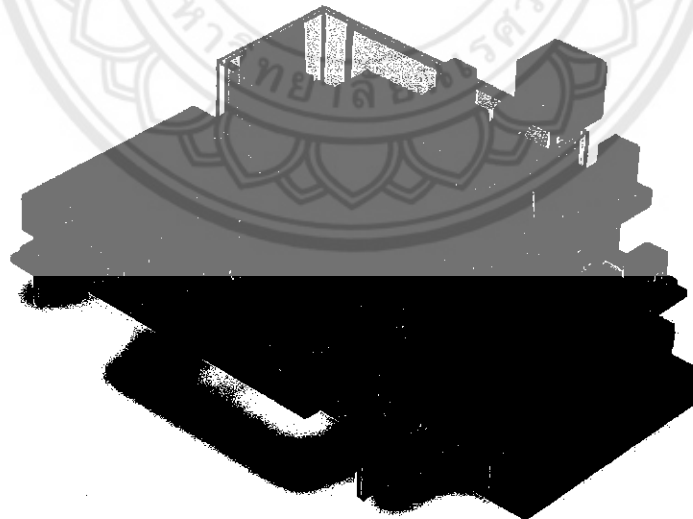


รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานทั้งหมดของระบบการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

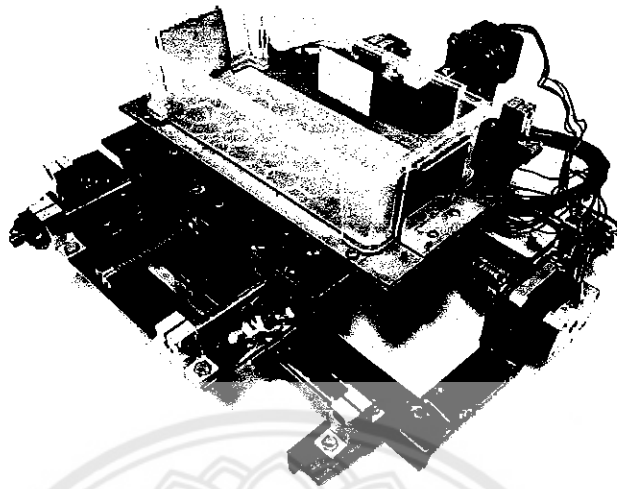


รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพการทำงานของกระบวนการกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี

จากรูปที่ 3.2 กระบวนการเริ่มต้นโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่อง UTM ในการเคลื่อนที่ขึ้นลง และสั่งการบอร์ดคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมปั๊ม และ XY stage นำอิเล็กโทรด และชิ้นงานติดตั้งเข้าไปที่เครื่อง UTM และใช้ Power Supply เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรด และชิ้นงาน

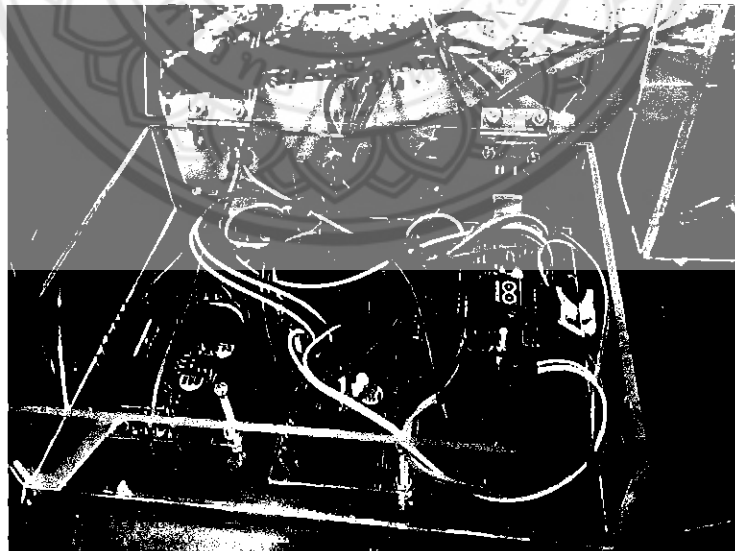


รูปที่ 3.3 แสดงการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ



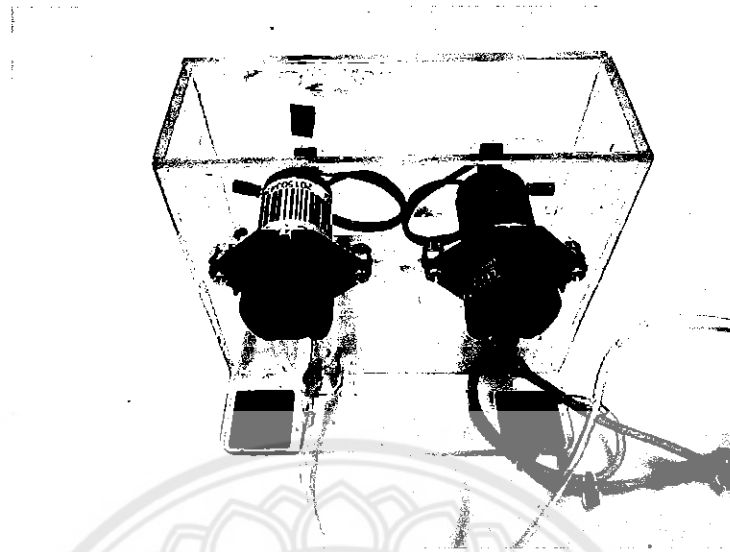
รูปที่ 3.4 แสดงชุดการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ XY

ทำการออกแบบ XY stage ของชุดทดลองด้วยโปรแกรม Solidwork ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสร้างชุดทดลองตามแบบ มีการติดตั้ง step motor และกล่องสำหรับรองรับสารอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.5 แสดงบอร์ดชุดควบคุมการทำงาน

ระบบควบคุมประกอบด้วย บอร์ด Arduino 1 บอร์ด และ L298N 3 บอร์ดซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของ XY Stage และ Peristaltic Pump



รูปที่ 3.6 แสดงปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารละลายอีเล็กโทรไลต์

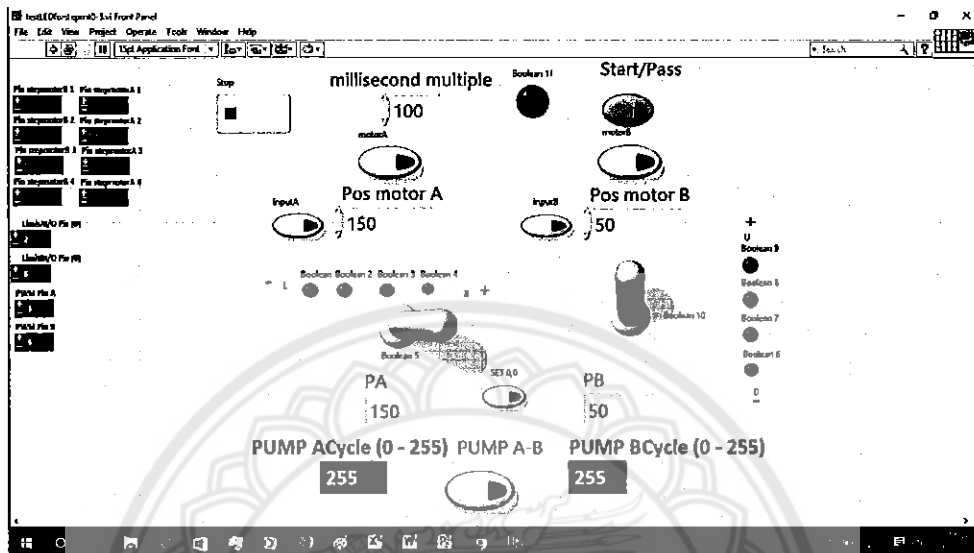
จากรูปที่ 3.6 เป็น Peristaltic Pump 2 ตัว มีการทำแทนจับยึดด้วยแผ่นอะคริลิกเพื่อเป็นฐานให้กับปั๊ม โดยมีการควบคุมการทำงานของปั๊มด้วยบอร์ด Arduino และ L298N ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.7 แสดงชุดลดแรงดันภายในท่อสายยางของระบบการฉีดสารละลายอีเล็กโทรไลต์

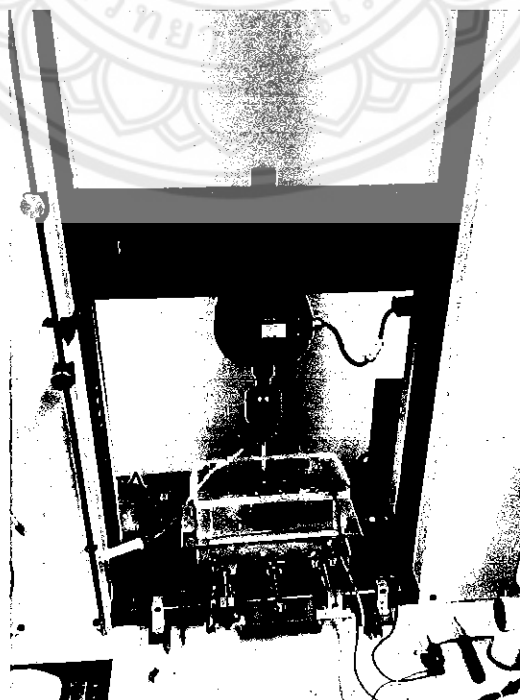
จากรูปที่ 3.7 แสดงชุดลดแรงดันภายในท่อสายยางโดยจะมีทางเข้าของสารละลายอีเล็กโทรไลต์ 1 ทาง (ด้านบนของชุดลดแรงดัน) ทางออกของสารละลายอีเล็กโทรไลต์ 2 ทาง

(ด้านล่างทางซ้ายและขวาของชุดลดแรงดัน) โดยที่ทางด้านขวาจะไหลไปสู่เชื่อมส่วนทางด้านซ้ายจะให้ไหลกลับมาสู่ปั๊กรวมบรรจูละลาย และมีการวัดระดับน้ำภายในด้วย (ด้านหน้าของชุดลดแรงดัน)



รูปที่ 3.8 แสดงโปรแกรมควบคุมระบบด้วยภาษา Labview

จากรูปที่ 3.8 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในควบคุมการเคลื่อนที่ของ XY stage และการหมุนของ Peristaltic Pump สามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อน XY stage และอัตราเร็วของ Peristaltic Pump ได้



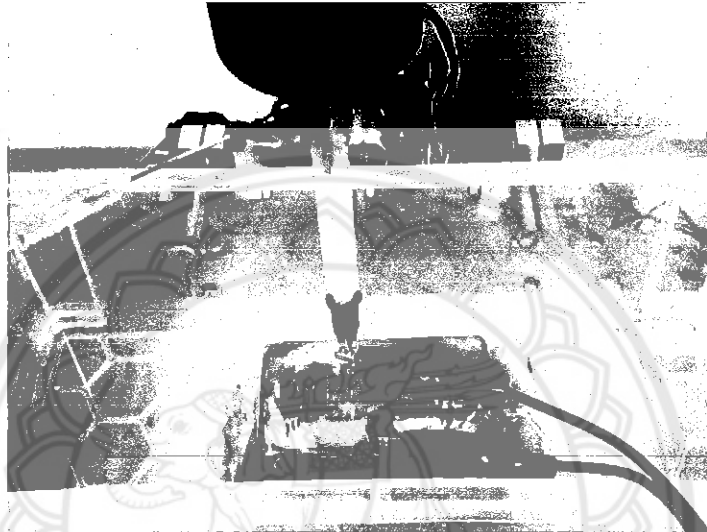
รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งชุดทดลองเข้ากับเครื่อง UTM

19196168



สำนักหอสมุด

จากรูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งชุดทดลองเข้ากับเครื่อง UTM โดย Stage XY จะยึดถือไว้ ส่วนล่างเพื่อไว้ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นงานในแนวแกน X-Y ส่วนเครื่องมือที่ใช้ในการจับอิเล็กโทรดก็จะใช้น็อตยึดติดเข้ากับส่วนคานบนของเครื่อง UTM



รูปที่ 3.10 แสดงภาพระหว่างกระบวนการเจาะ

จากรูปที่ 3.10 แสดงถึงกระบวนการในการเจาะรูระดับไมโครด้วยกระบวนการเจาะวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี โดยจะใช้อิเล็กโทรดคือ เข็มฉีดยาขนาด 550 ไมโครเมตร ขึ้นงานเป็นแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร มีการต่อขั้วลบไปที่อิเล็กโทรด ขั้วบวกไปที่ชิ้นงาน

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 นำขั้วบวกหนีบเข้ากับชิ้นงานและขั้วลบหนีบเข้ากับเข็มฉีดยา (ชุดหัวเจาะ) ซึ่งติดอยู่กับเครื่อง UTM

3.2.2 ป้อนสารละลายผ่านชุดลดแรงดันเข้ามาที่เข็มฉีดยา

3.2.3 จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 แอมแปร์

3.3.4 ก่อนทำการเจาะปลายเข็มฉีดยากับชิ้นงานห่างกัน 50 ไมโครเมตร

3.3.5 ค่อยๆเคลื่อนเครื่อง UTM ลงมาตามความเร็วที่กำหนดจนกระทั่งชิ้นงานทะลุ เมื่อทะลุแล้วจึงเจาะต่อไปอีก 10 ไมโครเมตร จึงจะยกเข็มฉีดยาขึ้น

ในการทดลองจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเจาะรูระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษา มี ความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด ความต่างศักย์ไฟฟ้า และชนิดของ

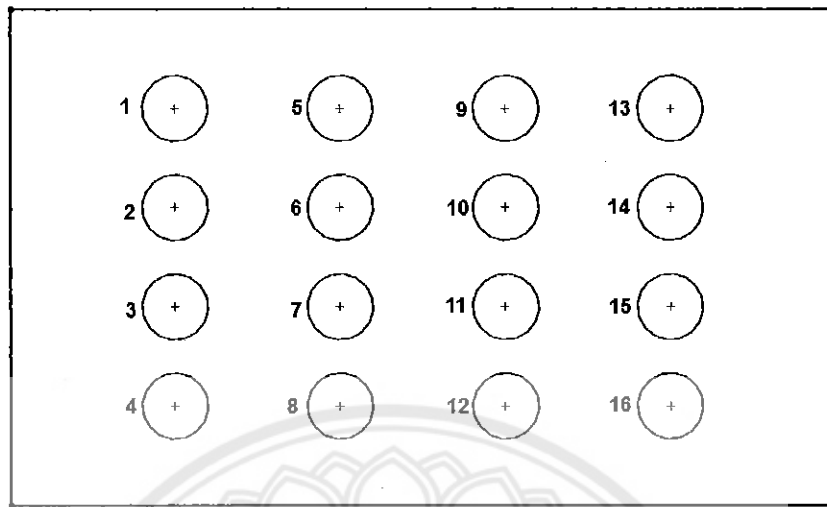
สารละลายอีเล็กโทรไลต์ ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือ แผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 0.5 แอมแปร์ อัตราการไหลของสารอีเล็กโทรไลต์ 14 มิลลิตรต่อนาที มีการทดสอบ 2 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับดังนี้

3.2.1 การทดลองรูปแบบที่ 1 แผ่นสแตนเลสกับน้ำเกลือ (NaCl)

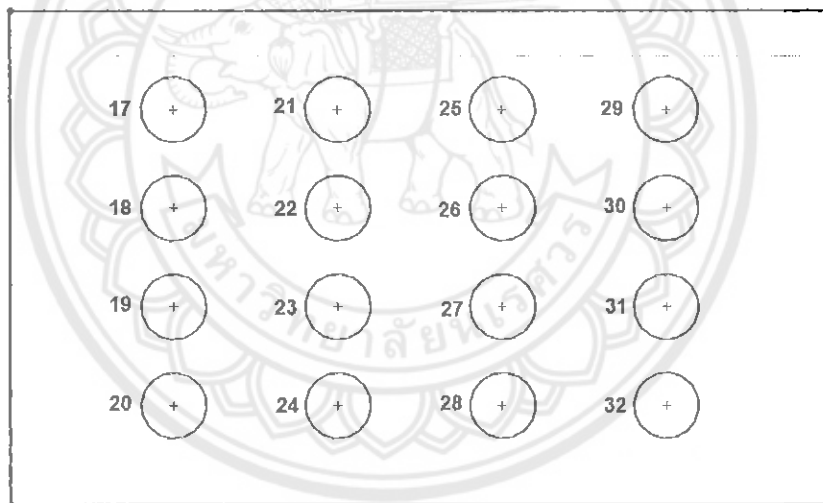
ตารางที่ 3.1 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 1

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนอีเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	4.5	20
5-8	4.5	10
9-12	6	20
13-16	6	10
17-20	7.5	20
21-24	7.5	10
25-28	9	20
28-32	9	10

จากตารางที่ 3.11 แสดงลำดับในการทดสอบการเจาะรู โดยวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นสแตนเลสความหนา 0.5 มิลลิเมตรและใช้น้ำเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นสารอีเล็กโทรไลต์ แล้วเริ่มเจาะจากบนลงล่างซ้ายไปขวาตามรูปที่ 3.11 และ 3.12 ดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-16 บนแผ่นสแตนเลส



รูปที่ 3.12 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 17-32 บนแผ่นสแตนเลส

จากรูปที่ 3.11 และ 3.12 แสดงลำดับการเจาะรูบนแผ่นสแตนเลส โดยมีระยะห่างของแต่ละแถวเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละหลักเท่ากับ 4 มิลลิเมตร แต่ละรูเจาะรายละเอียดดังนี้

- รูที่ 1-4 จะใช้ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 5-8 จะใช้ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 9-12 จะใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 13-16 จะใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที

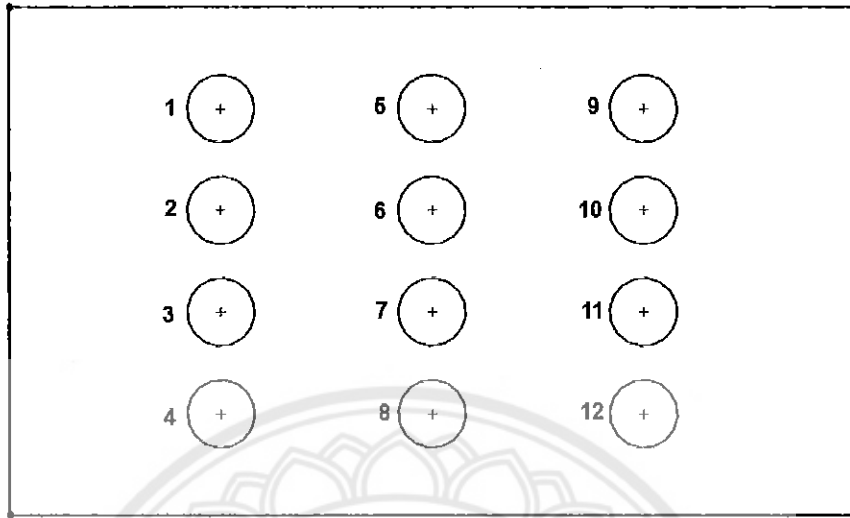
- รูที่ 17-20 จะใช้ความต่างศักย์ 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 21-24 จะใช้ความต่างศักย์ 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 25-28 จะใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 29-32 จะใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที

3.2.2 การทดลองรูปแบบที่ 2 แผ่นสแตนเลสกับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

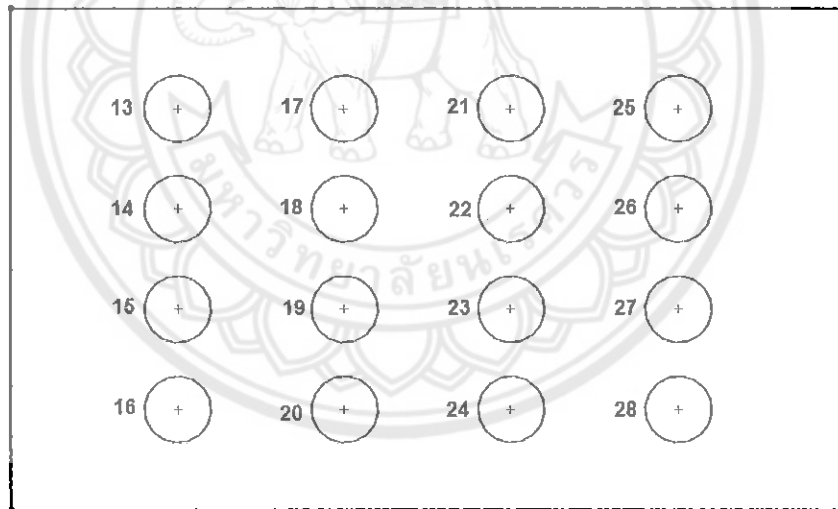
ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 2

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	6	20
5-8	7.5	20
9-12	9	20
13-16	4.5	10
17-20	6	10
21-24	7.5	10
25-28	9	10

จากตารางที่ 3.2 แสดงลำดับในการทดสอบการเจาะรู โดยวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นสแตนเลสความหนา 0.5 มิลลิเมตร และใช้กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ แล้วเริ่มเจาะจากบนลงล่างซ้ายไปขวาตามรูปที่ 3.13 และ 3.14 ดังนี้



รูปที่ 3.13 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-12 บนแผ่นสแตนเลส



รูปที่ 3.14 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 13-28 บนแผ่นสแตนเลส

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 แสดงลำดับการเจาะรูบนแผ่นสแตนเลส โดยมีระยะห่างของแต่ละแถวเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละหลักเท่ากับ 4 มิลลิเมตร แต่ละรูเจาะรายละเอียดดังนี้

- รูที่ 1-4 จะใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 5-8 จะใช้ความต่างศักย์ 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 9-12 จะใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที

- รูที่ 13-16 จะใช้ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 17-20 จะใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 21-24 จะใช้ความต่างศักย์ 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 25-28 จะใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที

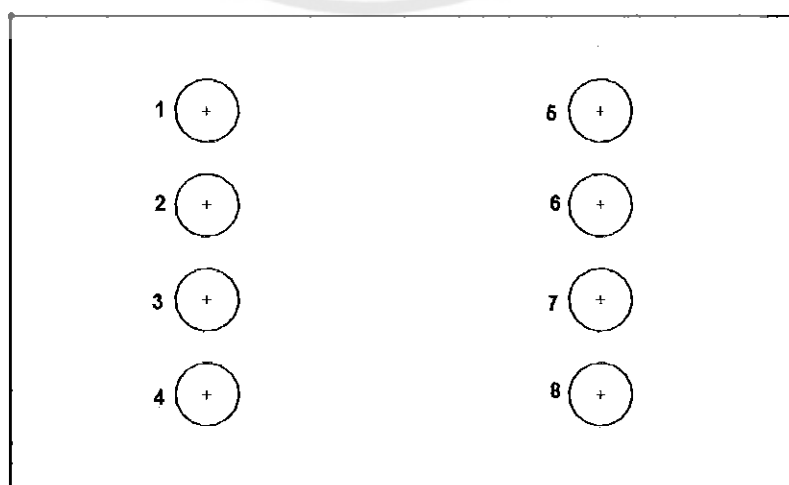
หมายเหตุ ในการทดลองที่ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ไม่สามารถเจาะจนทะลุได้ เนื่องจากปฏิกิริยาในการกัดวัสดุช้า ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กโทรด (เข็มฉีดยา) กับแผ่นโลหะ (แผ่นสแตนเลส) ส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยา

3.2.3 การทดลองรูปแบบที่ 3 แผ่นสแตนเลสกับโซเดียมไนเตรต (NaNO_3)

ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทดสอบการเจาะรูของการทดลองรูปแบบที่ 3

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	9	10
5-8	12	10

จากตารางที่ 3.3 แสดงลำดับในการทดสอบการเจาะรู โดยวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นสแตนเลสความหนา 0.5 มิลลิเมตร และใช้โซเดียมไนเตรต ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ แล้วเริ่มเจาะจากบนลงล่างซ้ายไปขวาตามรูปที่ 3.15 ดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงลำดับในการออกแบบการเจาะรูที่ 1-8 บนแผ่นสแตนเลส

จากรูปที่ 3.15 แสดงลำดับการเจาะรูบนแผ่นสแตนเลส โดยมีระยะห่างของแต่ละแถวเท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร และระยะห่างของแต่ละหลักเท่ากับ 8.8 มิลลิเมตร แต่ละรูเจาะรายละเอียดดังนี้

- รูที่ 1-4 จะใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที
- รูที่ 5-8 จะใช้ความต่างศักย์ 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที

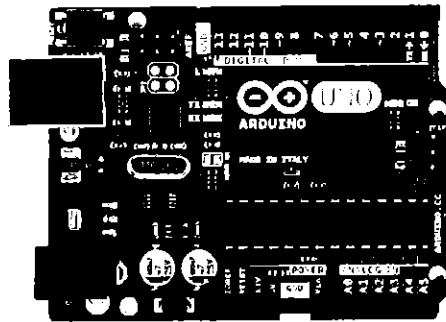
หมายเหตุ ในการทดลองที่ความต่างศักย์ 4.5, 6, 7.5 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที และการทดลองที่ความต่างศักย์ 9, 12 โวลต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ไม่สามารถเจาะจนทะลุได้ เนื่องจากปฏิกิริยาในการกัดวัสดุ ทำให้เกิดการชนกันระหว่างอิเล็กโทรด (เข็มฉีดยา) กับแผ่นโลหะ (แผ่นสแตนเลส) ส่งผลให้ไม่เกิดปฏิกิริยา



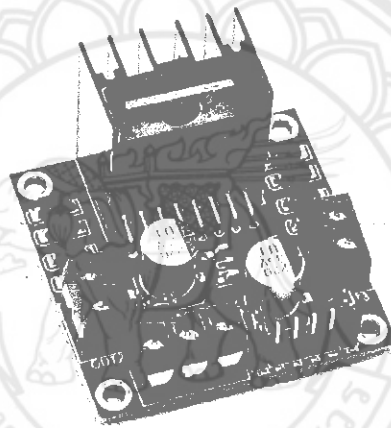
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

ตารางที่ 3.4 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น	คุณสมบัติ
ระบบควบคุม	Arduino	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป
ระบบควบคุม	L298N	สามารถขับมอเตอร์ได้ถึง 2 ตัว
ปั๊ม	peristaltic pump	ไม่มีชิ้นส่วนของปั๊มที่จะสัมผัสกับของเหลวในสายยาง
ท่อ PVC	ท่อน้ำไทย	แข็ง เหนียว
สายยาง	ท่อออกซิเจนตู้ปลา	หนา เหนียว
เข็มฉีดยา	NIPRO	ขนาด 24Gx1 (0.55x25 มิลลิเมตร)
เครื่อง UTM	รุ่น H50KS	เคลื่อนที่ลงทีละซ้่าๆได้
Stainless Steel หนา 5 มิลลิเมตร	เกรด 304	ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน
Linear Ball Bearing Block	-	สำหรับเพลลา 8 มิลลิเมตร
Lead Screw เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรยาว 300 มิลลิเมตร	THK	น๊อตพีดแบบเลื่อนมีความเที่ยงตรงสูง
เพลลาเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร	-	สำหรับการเคลื่อนที่
Step Motor	17HS54401	ทอร์กสูง
Coupling 5 มิลลิเมตร - 8 มิลลิเมตร	-	ต่อ step motor เข้ากับเพลลา
Support 8 มิลลิเมตร	-	สำหรับเพลลา 8 มิลลิเมตร
Limit switch	TEMCO	สำหรับตัดวงจร
หัวสว่าน	BOSCH	แข็งแรง ทนทาน
น๊อต	SJ	เกลียวแข็ง เหนียว
สายไฟจัมป์เปอร์	-	ต่อกับอุปกรณ์ได้แน่นยิ่งขึ้น
Power Supply	SPECTRUM	อะแดปเตอร์ 3-12 โวลต์. 1000 มิลลิแอมป์
ปีกเกอร์	SCI	ใส่สารละลายอีเล็กโทรไลต์
มัลติมิเตอร์	UT30D	มีความแม่นยำในการวัดสูง



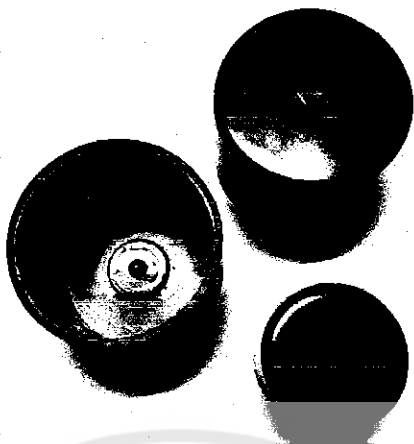
รูปที่ 3.16 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino



รูปที่ 3.17 แสดงบอร์ดขับมอเตอร์ รุ่น L298N



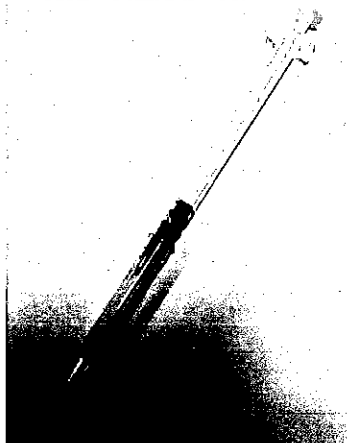
รูปที่ 3.18 แสดงปั๊มที่ใช้ในการฉีดสารอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Peristaltic pump



รูปที่ 3.19 แสดงท่อ PVC ที่ใช้ในการทำชุดลดแรงดันภายในสายยาง



รูปที่ 3.20 แสดงภาพสายยางที่ใช้ในการลำเลียงสารอิเล็กโทรไลต์



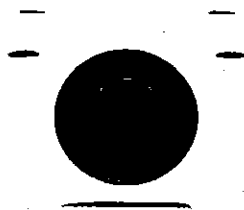
รูปที่ 3.21 แสดงภาพของเข็มฉีดยาที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.22 แสดงภาพของเครื่อง UTM รุ่น H50KS



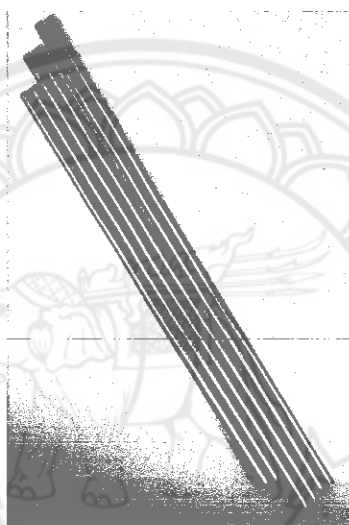
รูปที่ 3.23 แสดงภาพวัสดุที่ใช้ในการทดสอบชนิด Stainless Steel



รูปที่ 3.24 แสดงภาพ Linear Ball Bearing Block



รูปที่ 3.25 แสดงภาพ Lead Screw



รูปที่ 3.26 แสดงภาพเฟลาที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.27 แสดงภาพ Stepper Motor ที่ใช้ในการขับ XY Stage

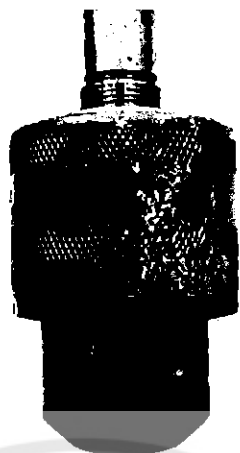


รูปที่ 3.28 แสดงรูป Coupling ขนาด 5 มิลลิเมตร – 8 มิลลิเมตร

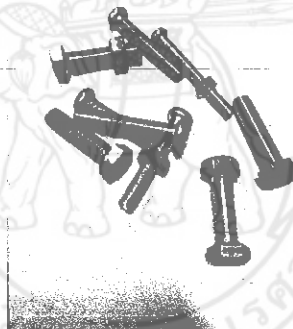


รูปที่ 3.29 แสดงภาพ Support ที่มีช่องสวมเฟลาขนาด 8 มิลลิเมตร

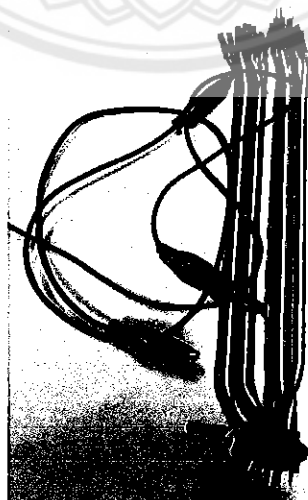
รูปที่ 3.30 แสดงภาพ Limit Switch



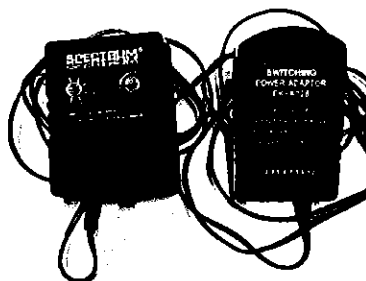
รูปที่ 3.31 แสดงภาพของหัวสว่านที่ใช้ในการจับอ็เล็กโทรด



รูปที่ 3.32 แสดงภาพของน็อตที่ใช้ในการจับยึด XY Stage



รูปที่ 3.33 แสดงภาพของสายไฟที่ใช้ต่อวงจรภายในระบบ



รูปที่ 3.34 แสดงภาพ Power Supply ที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ



รูปที่ 3.35 แสดงภาพของบีกเกอร์ที่ใช้ในการบรรจุสารอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.36 แสดงภาพของมัลติมิเตอร์ที่ใช้ตรวจวัดโวลต์ และกระแสไฟฟ้าของระบบ

3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลการทดลองที่ความต่างศักย์ต่างกัน (V) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน และอัตราในการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดต่างกันมาเปรียบเทียบกับขนาดของรูเจาะ (D) เวลาที่ใช้ (t) และระยะสิ้นสุดของกระบวนการเจาะ (S_e) มาวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะ

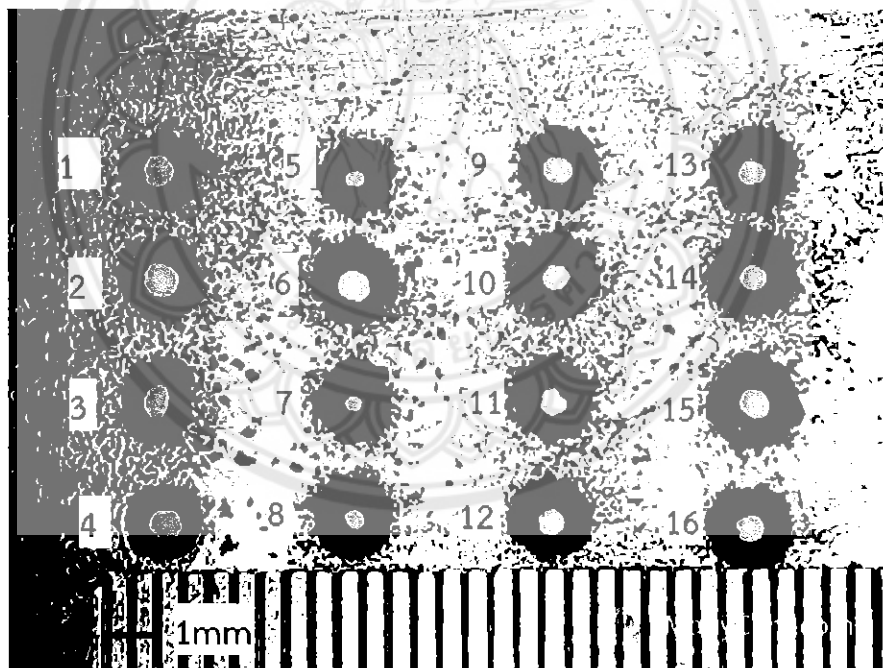


บทที่ 4

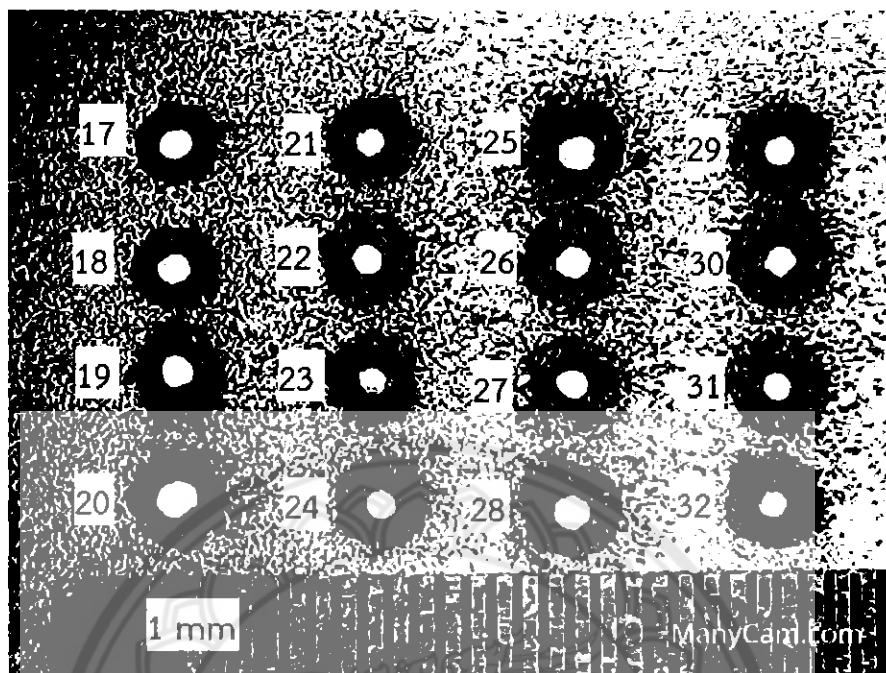
ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการ ECM จากชุดทดลองที่ได้สร้างขึ้นนั้น ประกอบด้วย การเปรียบเทียบ ความต่างศักย์ที่ใช้ในกระบวนการ อัตราการเคลื่อนที่ลงของอิเล็กโทรด ซึ่งควบคุมด้วยเครื่อง UTM และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ใช้ เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะ คือ ขนาดของรูเจาะ และความเรียบของผิวชิ้นงานที่ดีที่สุด

4.1 ผลการทดลองชุดที่ 1 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

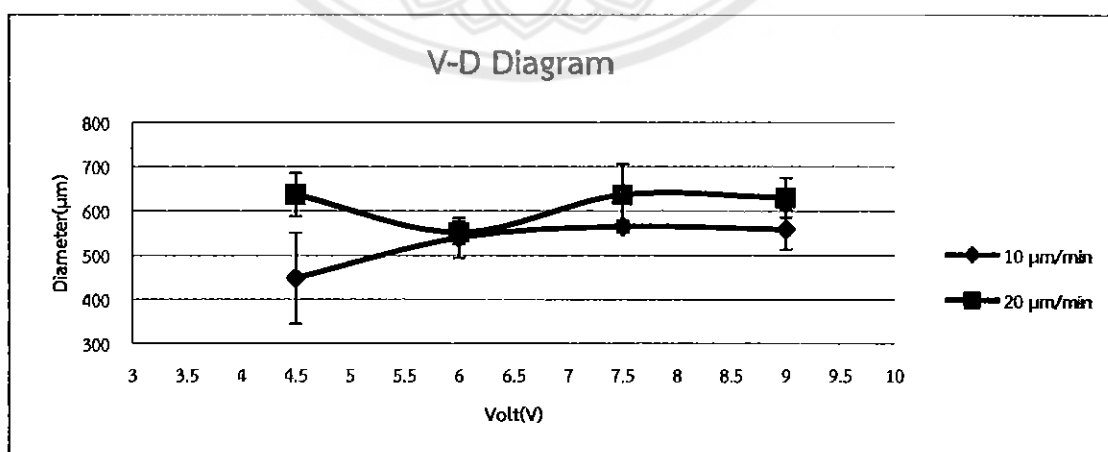


รูปที่ 4.1 แสดงรูเจาะครั้งที่ 1-16 (แผ่นที่ 1)



รูปที่ 4.2 แสดงรูเจาะครั้งที่ 17-32 (แผ่นที่ 2)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 การเจาะโดยปรับปัจจัยต่างก็จะส่งผลต่อขนาดของรูต่างกันไป แต่ที่สังเกตได้ชัดคือ รูปที่ 4.2 ผิวของชิ้นงานนั้นจะมีรอยขรุขระมากกว่า รูปที่ 4.1 เนื่องจากแผ่นที่สองนั้นเป็นการทดลองที่ใช้ความต่างศักย์สูงกว่า แสดงว่าค่าความต่างศักย์นั้นก็ส่งผลต่อความเรียบของผิวนอกชิ้นงานด้วย



กราฟที่ 4.1 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ 1-32 (NaCl)

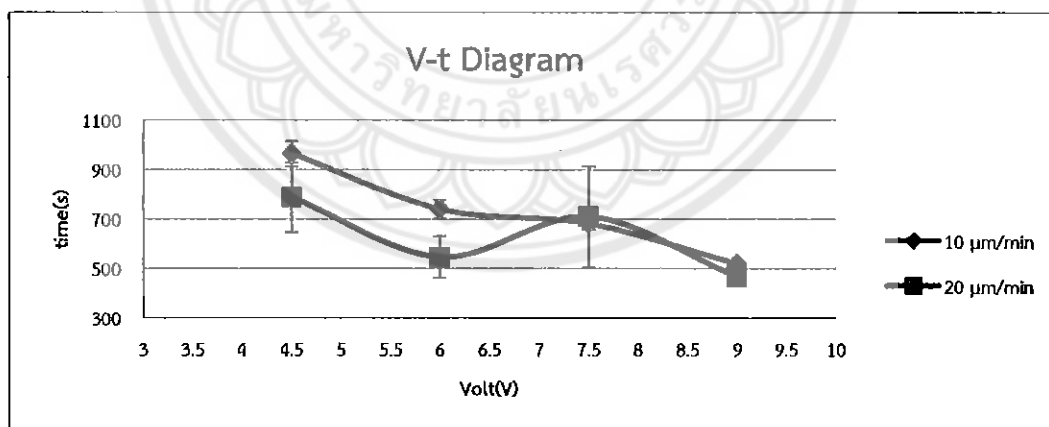
จากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่าที่ระดับ ความต่างศักย์เดียวกันนั้น การใช้อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรดที่มากกว่า (20 ไมโครเมตรต่อนาที) จะทำให้เกิดขนาดรูเจาะที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย โดยที่

20 ไมโครเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 613.625 ไมโครเมตร และที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 527.5625 ไมโครเมตร

แต่ถ้าสังเกตเพียงอัตราเร็วของอิเล็กโทรดค่าใดค่าหนึ่งนั้น การปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ไปเรื่อยๆนั้นยังไม่สามารถบอกได้ว่าจะส่งผลต่อขนาดของรู

เนื่องจากได้ทำการทดลอง 4 ครั้งในแต่ละความต่างศักย์ ในกราฟที่ 4.1 มีการแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลของแต่ละความต่างศักย์ สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ข้อมูลมีการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ที่ 7.5 โวลต์ และน้อยที่สุดอยู่ที่ 6 โวลต์ และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ข้อมูลมีการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ที่ 4.5 โวลต์ และน้อยที่สุดอยู่ที่ 7.5 โวลต์

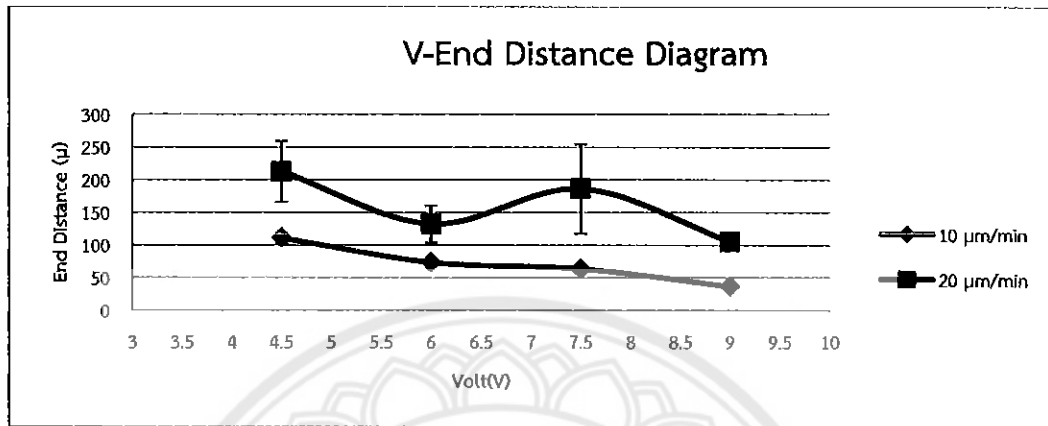
เห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟนั้นน่าจะบอกได้ว่าความต่างศักย์ที่ใช้จะส่งผลต่อขนาดรูเจาะ จะสังเกตได้ว่าที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ความต่างศักย์ 6 โวลต์ นั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูมีค่าที่น้อยกว่าที่ความต่างศักย์อื่นๆมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่เราสังเกตเห็นน้ำที่พุ่งลงมาเร็วกว่าปกติ เนื่องจากแต่ละรูเราจะหยุดกระบวนการเมื่อมองเห็นสายน้ำที่พุ่งทะลุชิ้นงานลงมาข้างล่าง รูอื่นๆที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเป็นเพราะเราไม่สังเกตเห็นสายน้ำโดยทันทีจึงทำให้รูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ



กราฟที่ 4.2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ (NaCl)

จากกราฟที่ 4.2 สังเกตได้ชัดว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆนั้น เวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะใช้เวลาในการเจาะให้ทะลุ 627 วินาทีต่อหนึ่งรู น้อยกว่าที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ซึ่งใช้เวลา

เฉลี่ย 726 วินาทีต่อหนึ่งรู การกระจายตัวของข้อมูลที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพมากกว่า เนื่องจากมีการกระจายตัวที่น้อยกว่า และมีแนวโน้มดีขึ้นเรื่อยๆเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น



กราฟที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะความลึกของอิเล็กโทรดที่ทำให้ชิ้นงานทะลุ (NaCl)

จากกราฟที่ 4.3 ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่ต่างกัน ที่อัตราเร็ว 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่าก่อนที่ชิ้นงานจะทะลุ โดยมีค่าระยะลึกเฉลี่ย 159 ไมโครเมตร ที่อัตราเร็ว 10 ไมโครเมตรต่อนาที มีค่าระยะลึกเฉลี่ย 71 ไมโครเมตร และเมื่อสังเกตในอัตราเร็วค่าใดค่าหนึ่ง การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่า การกระจายตัวของข้อมูลที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพมากกว่า เนื่องจากมีการกระจายตัวที่น้อยกว่า และมีแนวโน้มดีขึ้นเรื่อยๆเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น

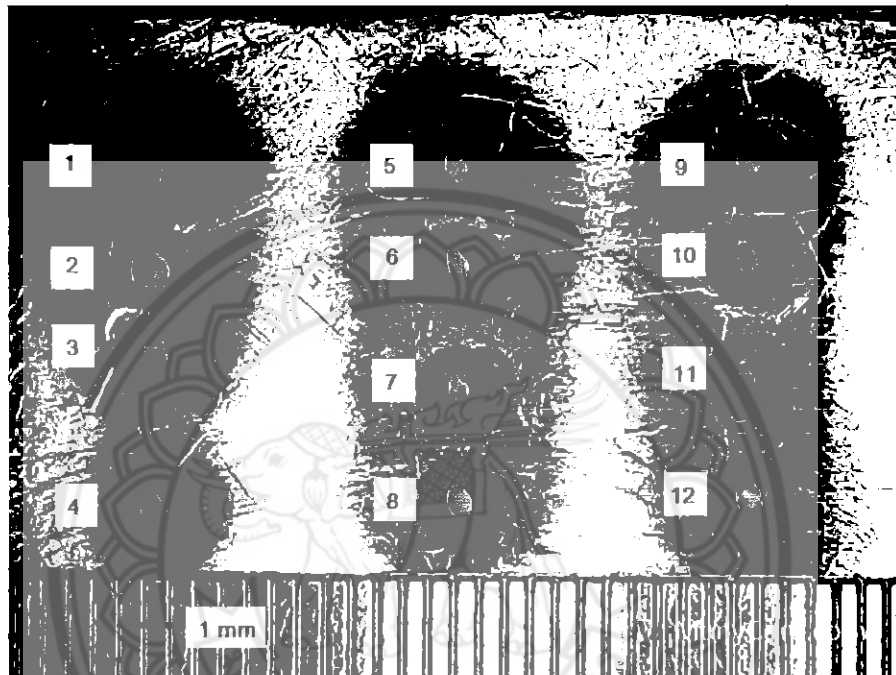
ตารางที่ 4.1 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (NaCl)

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	10 ไมโครเมตร ต่อนาที	20 ไมโครเมตร ต่อนาที
4.5	389.25	287.5
6	426.75	367.75
7.5	436.5	313.5
9	463.5	394.5

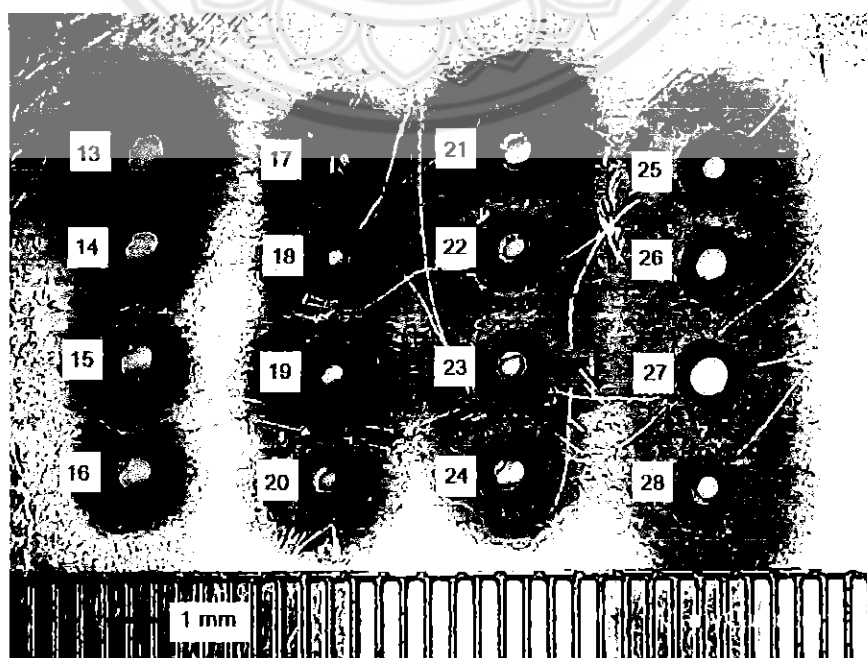
จากตารางที่ 4.1 แสดงระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานซึ่งประมาณจากความหนาของชิ้นงานเทียบกับระยะความลึกที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงในชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่ชิ้นงานทะลุ โดยการใช้ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 287.5 ไมโครเมตร

4.2 ผลการทดลองชุดที่ 2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

ที่อัตราการเคลื่อนที่ลงของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที เมื่อทดลองโดยใช้ความต่างศักย์ 4.5 โวลต์ นั้นไม่สามารถทำการเจาะชิ้นงานได้เนื่องจากเกิดการสัมผัสกันของอิเล็กโทรดกับชิ้นงานขณะที่เคลื่อนที่ลงได้เพียงเล็กน้อย จึงจะเริ่มทำการทดลองที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์

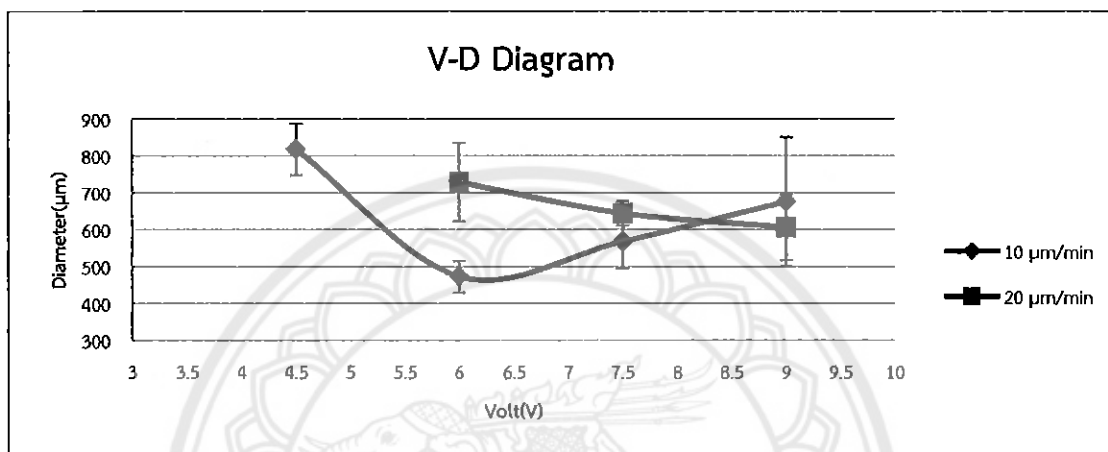


รูปที่ 4.3 แสดงรูเจาะครั้งที่ 1-12 (แผ่นที่ 3)



รูปที่ 4.4 แสดงรูเจาะครั้งที่ 13-28 (แผ่นที่ 4)

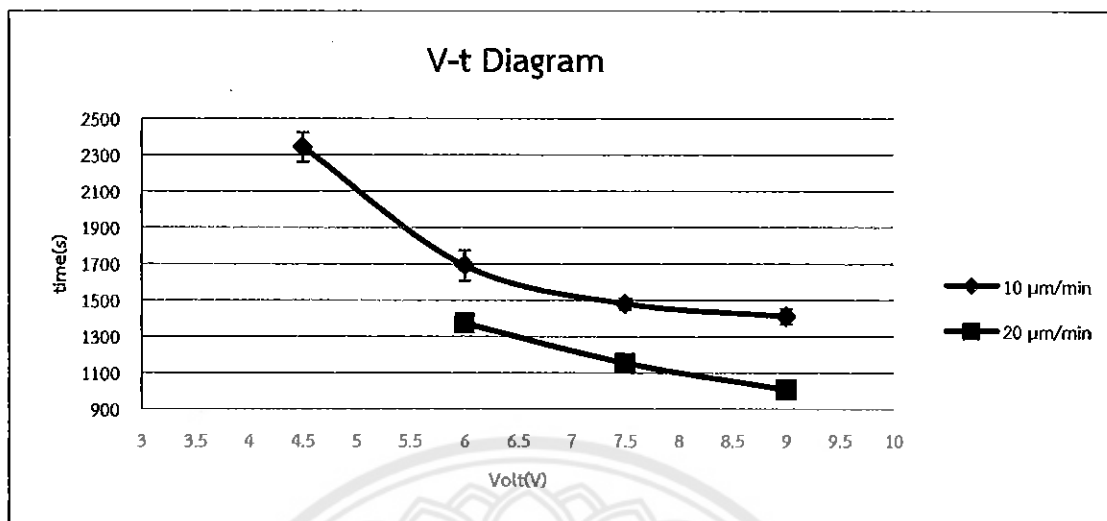
จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 การเจาะโดยปรับปัจจัยต่างก็จะส่งผลต่อขนาดของรูต่างกันไป แต่ที่สังเกตได้ชัดคือการใช้ความต่างศักย์ที่สูงกว่านั้นจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีรอยขรุขระกระจายวงกว้างมากกว่า แต่ทั้งนี้เมื่อเทียบกับการใช้โซเดียมคลอไรด์แล้วการใช้กรดซัลฟิวริกนั้นทำให้ได้ผิวที่เรียบเนียนกว่าอย่างเห็นได้ชัด



กราฟที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ (H_2SO_4)

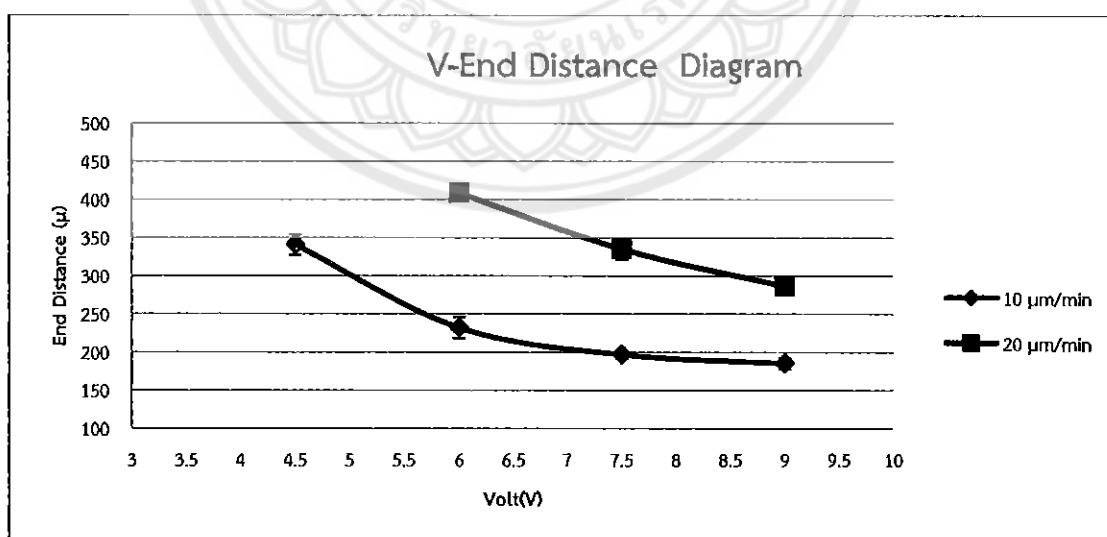
จากกราฟที่ 4.4 สังเกตได้ว่าขนาดของรูนั้นขึ้นลงไปมาเป็นค่าที่ไม่แน่นอนโดยเฉพาะเส้นสีน้ำเงินที่ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์นั้นน่าจะมีผลต่อขนาดของรู และการที่ขนาดของรูจะมากหรือน้อยนั้นน่าจะเป็นผลมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการเจาะ

เนื่องจากได้ทำการทดลอง 4 ครั้งในแต่ละความต่างศักย์ จากกราฟที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลของแต่ละความต่างศักย์ สำหรับอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ข้อมูลมีการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ที่ 6 โวลต์ , 9 โวลต์ และน้อยที่สุดอยู่ที่ 7.5 โวลต์ และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ข้อมูลมีการกระจายตัวมากที่สุดอยู่ที่ 9 โวลต์ และน้อยที่สุดอยู่ที่ 6 โวลต์ เห็นได้ว่าแนวโน้มของกราฟนั้นยังไม่สามารถบอกได้ว่าความต่างศักย์ที่ใช้จะส่งผลต่อคุณภาพของขนาดรูเจาะ



กราฟที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลา (H_2SO_4)

จากกราฟที่ 4.5 สังเกตได้ชัดว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆ นั้นเวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้นโดยที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ย 1179 วินาที และที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ย 1731 วินาที การกระจายตัวของข้อมูลทั้ง 10 และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มที่ขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น



กราฟที่ 4.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะที่ชิ้นงานทะลุ (H_2SO_4)

จากกราฟที่ 4.6 ถ้าเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่ต่างกัน อัตราเร็วที่ 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ได้เฉลี่ย 343 ไมโครเมตร ซึ่งลึกกว่าการใช้ อัตราเร็วที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที ที่ทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ได้เฉลี่ย 238 ไมโครเมตร และเมื่อ-

สังเกตในอัตราเร็วค่าใดค่าหนึ่งการใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้เข้มนีติยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่า การกระจายตัวของข้อมูลที่ 10 ไมโครเมตรต่อนาที นั้นมีคุณภาพมากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากมีการกระจายตัวที่น้อยกว่า และมีแนวโน้มดีขึ้นเรื่อยเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น

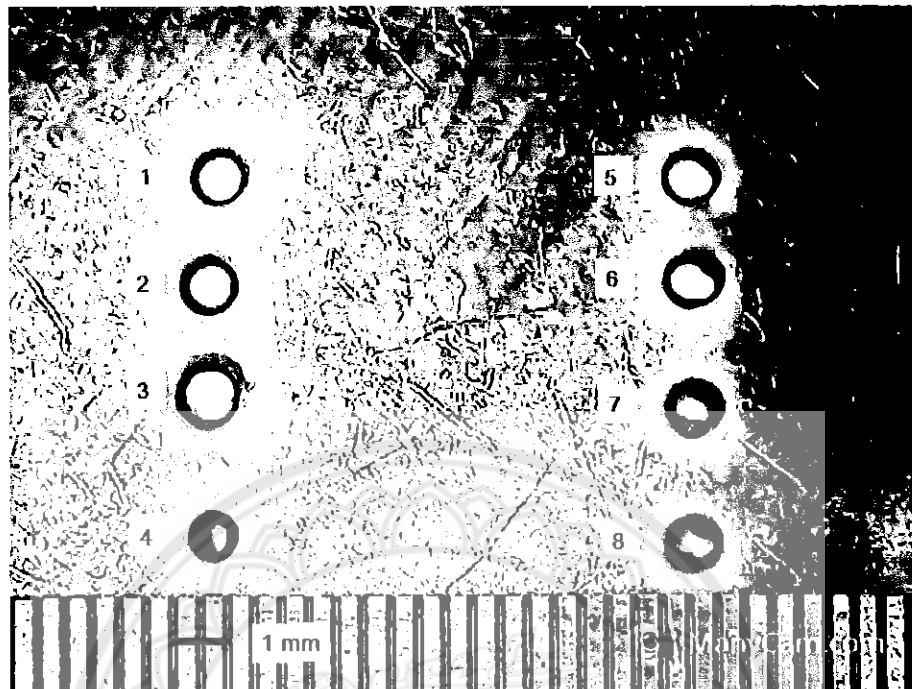
ตารางที่ 4.2 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (H_2SO_4)

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	10 ไมโครเมตรต่อนาที	20 ไมโครเมตรต่อนาที
4.5	159.5	-
6	268	91.75
7.5	303.25	165.25
9	314.75	213.75

จากตารางที่ 4.2 แสดงระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน โดยการใช้ความต่างศักย์ 6 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 91.75 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารอิเล็กโทรไลต์

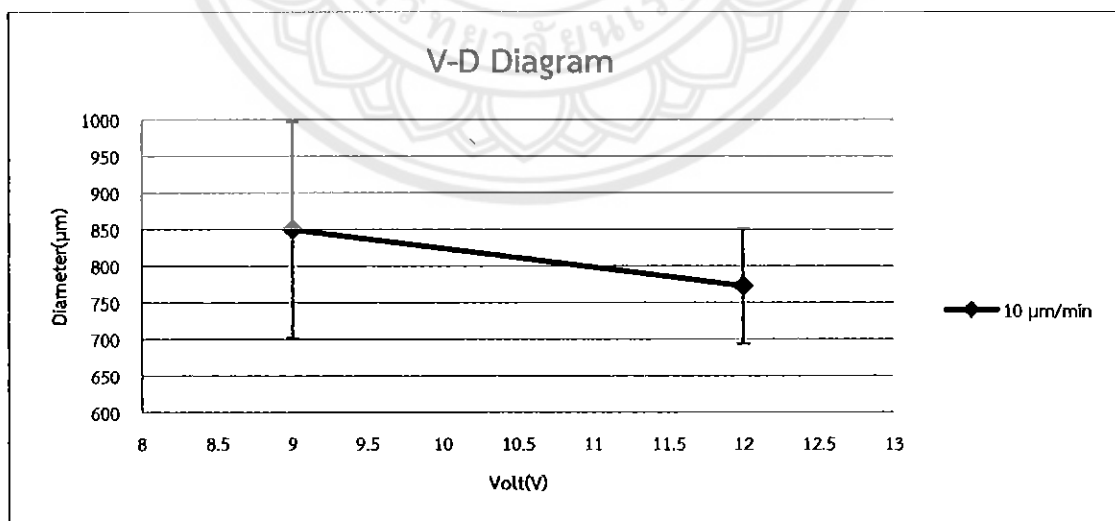
4.3 ผลการทดลองชุดที่ 3 โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$)

การทดลองในส่วนของ โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) เริ่มทำการเจาะได้ที่ 9 โวลต์ จึงทำการทดลองปรับค่าความต่างศักย์สองระดับ คือ 9 โวลต์ และ 12 โวลต์ โดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดระดับเดียว คือ 10 ไมโครเมตรต่อนาที



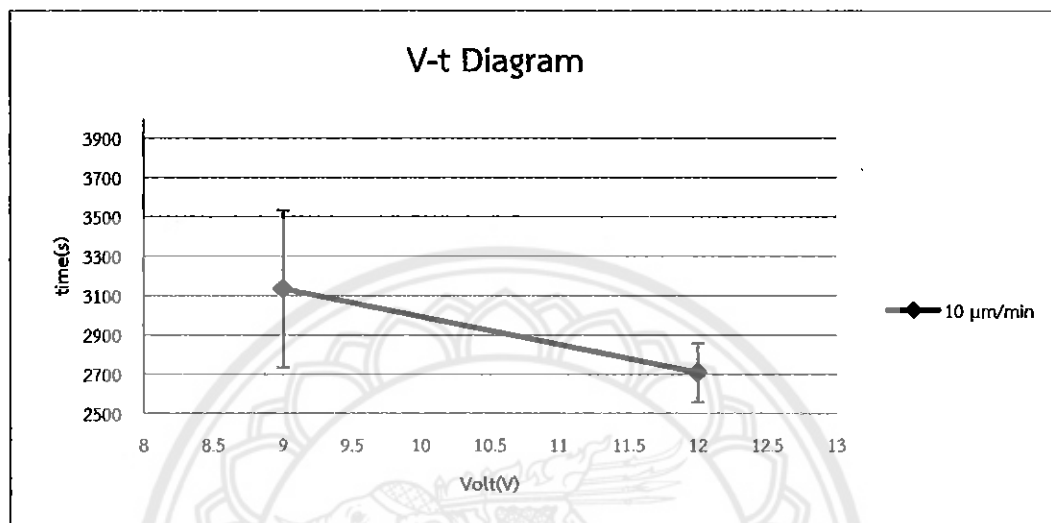
รูปที่ 4.5 แสดงภาพรูเจาะ 1-8 (แผ่นที่ 5)

จากรูปที่ 4.5 การเจาะด้วยการใช้โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) นั้นให้ผิวที่เรียบเนียนมาก สังเกตได้จากบริเวณรอบๆ ปากรูเจาะจะมีรอยการกัดกระจายออกเป็นวงน้อยมาก ต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้ ที่ทำให้เกิดรอยบริเวณปากรูเจาะเป็นวงกว้าง



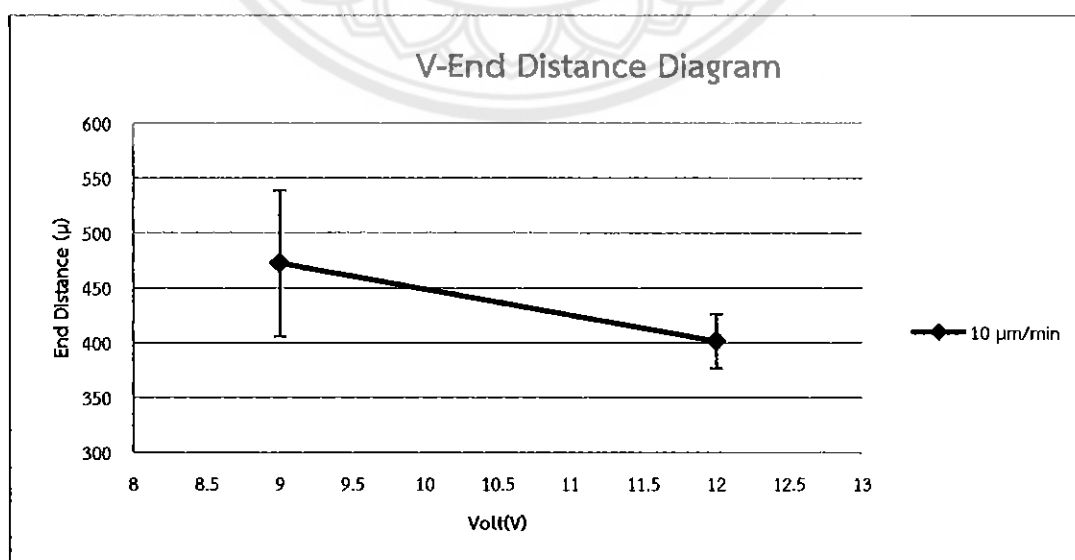
กราฟที่ 4.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และขนาดของรูเจาะ ที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 (NaNO_3)

จากกราฟที่ 4.7 ที่ 12 โวลต์ มีค่าเฉลี่ยของขนาดรูที่น้อยกว่า การกระจายตัวของข้อมูลมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้น โดยเฉลี่ยแล้วที่ 9 โวลต์ ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 849 ไมโครเมตร และที่ 12 โวลต์ ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 772 ไมโครเมตร



กราฟที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และเวลาที่ใช้ ที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที (NaNO_3)

จากกราฟที่ 4.8 สังเกตได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นนั้น เวลาที่ใช้ในการเจาะจะมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการใช้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานเจาะทะลุเร็วขึ้นโดยเฉลี่ยแล้วที่ 9 โวลต์ ใช้เวลาเฉลี่ย 3133 วินาทีและที่ 12 โวลต์ ใช้เวลาเฉลี่ย 772 วินาที



กราฟที่ 4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความต่างศักย์ และระยะความลึกที่ทำให้ชิ้นงานทะลุ ที่อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที (NaNO_3)

จากกราฟที่ 4.9 การใช้ความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าจะทำให้เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงได้ลึกกว่า แต่มีช่วงการกระจายของข้อมูลที่มาก โดยที่ 9 โวลต์ มีระยะลึกเฉลี่ย 472 ไมโครเมตร และที่ 12 โวลต์ มีระยะลึกเฉลี่ย 401 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.3 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน (NaNO₃)

ความต่างศักย์ (โวลต์)	Gap (ไมโครเมตร)	
	10 ไมโครเมตรต่อนาที	20 ไมโครเมตรต่อนาที
4.5	-	-
6	-	-
7.5	-	-
9	27.75	-
12	98.75	-

จากตารางที่ แสดงระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน โดยการใช้ความต่างศักย์ 9 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานน้อยที่สุด มีค่า 27.75 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองการทดลองก่อนหน้า

เนื่องจากชิ้นงานมีความหนา 500 ไมโครเมตร การที่เข็มฉีดยาเคลื่อนที่ลงไประยะไม่ถึง 500 ไมโครเมตร แล้วชิ้นงานทะลุก่อน แสดงว่าเกิดช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับระยะที่เกิดการกัดชิ้นงานลงไปได้จริง ฉะนั้นจากผลการทดลองทำให้ทราบว่า การจะลดช่องว่างนี้ลงจะต้องใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดที่สูงขึ้น ความต่างศักย์ต่ำลง แต่ทั้งนี้การเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรดที่มากเกินไปก็จะทำให้ปลายเข็มฉีดยาสัมผัสชิ้นงานก่อน



รูปที่ 4.6 แสดงภาพจำลองช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับระยะที่เกิดการกัดชิ้นงานลงไปได้จริง

จากรูปที่ 4.6 ชิ้นงานทะลุขณะที่เข็มเคลื่อนที่ลงมาเพียงเล็กน้อย (ซ้าย) ชิ้นงานทะลุไปพร้อมๆกับเข็ม (ขวา)

บทที่ 5

สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ในการออกแบบสร้างชุดทดลองประกอบด้วยแท่นจับยึดชิ้นงานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X และแกน Y ด้วยความละเอียด 40 ไมโครเมตร มีการใช้เครื่อง UTM สำหรับการเคลื่อนที่แนวแกน Z ที่มีความละเอียด 1 ไมโครเมตร ระบบฉีดสารอีเล็กโทรไลต์ใช้ Peristaltic Pump ควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านบอร์ดช่วยขับเคลื่อน L298N ที่มีการโปรแกรมด้วยภาษา Labview

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจาะรูระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี พบว่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปนั้นจะส่งผลต่อขนาดของรูเจาะ โดยความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น จึงส่งผลต่อระยะเวลาในการกัด และความเรียบของผิวชิ้นงานอย่างมาก ซึ่งเมื่อใช้ความต่างศักย์ที่สูง จะใช้เวลาในการเจาะให้ทะลุน้อยลง และจากการสังเกตชิ้นงานพบว่า การใช้ความต่างศักย์สูงจะทำให้ผิวของชิ้นงานขรุขระมากกว่าชิ้นงานที่ใช้ความต่างศักย์ต่ำ ในส่วนของอัตราเร็วการเคลื่อนที่ลงของอีเล็กโทรด เมื่ออัตราเร็วเพิ่มมากขึ้นควบคู่กับการใช้ความต่างศักย์ต่ำๆ จะ เป็นการลดช่องว่างระหว่างอีเล็กโทรดกับชิ้นงานลง ซึ่งการปรับค่าปัจจัยที่เหมาะสมจะทำให้คุณภาพของรูเจาะดีขึ้นได้

ในการประเมินปัจจัยด้านสารละลายที่ใช้ พบว่าการใช้โซเดียมไนเตรทในการกัดจะทำให้ผิวชิ้นงานเรียบเนียนที่สุดรองลงมาคือการใช้กรดซัลฟิวริก และโซเดียมคลอไรด์ตามลำดับ เมื่อมองในด้านขนาดรูเจาะที่ได้จะพบว่า การใช้สารละลายอีเล็กโทรไลต์ที่ต่างชนิดกันนั้นจะไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อขนาดรูเจาะ แต่อย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นขนาดรูจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเจาะ โดยถ้าใช้เวลามากก็ จะทำให้ขนาดรูมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ปัจจัยด้านรูปแบบการเคลื่อนตัวของอีเล็กโทรดในการเจาะก็มีส่วนสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเจาะรูให้ทะลุด้วยขนาดรูเจายน้อยสุดเท่าที่ทำได้ จึงหยุดการเคลื่อนที่ลงของอีเล็กโทรดเมื่อพบว่ารูเจาะทะลุแล้วจากการสังเกตว่ามีสารละลายฉีดผ่านรูลงมา ด้านล่างโดยที่แท่งอีเล็กโทรดยังไม่ได้ทะลุชิ้นงานลงมา ซึ่งทำให้ระยะเวลาความลึกที่หยุดกระบวนการไม่เท่ากันส่งผลให้ความคมขนาดรูเจาะให้คงที่ได้ยาก

เวลาที่ใช้ในการเจาะ การใช้โซเดียมคลอไรด์ที่อัตราการเคลื่อนที่อีเล็กโทรด 10 ไมโครเมตร ต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ย 600 และ 588 วินาทีต่อหนึ่งรูการใช้กรดซัลฟิวริกที่อัตราการเคลื่อนที่อีเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ย 1731.8 และ 1186.75 วินาทีต่อหนึ่งรู และการใช้โซเดียมไนเตรทที่อัตราการเคลื่อนที่อีเล็กโทรด

10 ไมโครเมตรต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ย 2920 วินาทีต่อหนึ่งรูจึงสรุปได้ว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์ในกระบวนการ ECM นั้นจะทำให้เจาะรูได้เร็วกว่า

ระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงไปได้การใช้โซเดียมคลอไรด์ที่อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงไปได้เฉลี่ยเป็น 50 และ 146 ไมโครเมตร ในส่วนของการใช้กรดซัลฟิวริกที่อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที และ 20 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงไปได้เฉลี่ยเป็น 238 และ 345 ไมโครเมตร และในส่วนของ การใช้โซเดียมไนเตรทที่อัตราการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที ระยะที่อิเล็กโทรดเคลื่อนที่ลงไปได้เฉลี่ยเป็น 463 ไมโครเมตร ดังนั้นการใช้โซเดียมไนเตรทจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับระยะที่เกิดการกัดชิ้นงาน น้อยที่สุด

จากการสังเกตชิ้นงานประกอบกับการวิเคราะห์ผลจากการทดลอง ทำให้สรุปได้ว่า ตัวแปรเด่นๆที่จะส่งผลต่อคุณภาพของรูเจาะคือ ช่องว่างระหว่างปลายเข็มกับระยะที่เกิดการกัดชิ้นงานซึ่งยิ่งลดช่องว่างดังกล่าวนี้ลงได้มากก็จะได้รูที่มีคุณภาพมาก คือ มีขนาดรูที่สม่ำเสมอ ปากหลุมไม่กว้าง และการเลือกสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็ส่งผลต่อความเรียบของผิวอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมไนเตรท ที่ความต่างศักย์ 9 โวลต์ และอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที จึงทำให้ได้รูเจาะที่มีคุณภาพมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ในการทดลองควรเปลี่ยนอิเล็กโทรด (เข็มฉีดยา) ใหม่บ่อยๆเพื่อป้องกันการอุดตันของเข็ม
- 5.2.2 ในการทดลองไม่ควรนำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ผ่านกระบวนการ ECM มาแล้วกลับมาใช้ใหม่ เพราะสารละลายจะมีความเข้มข้นมากขึ้นอาจจะทำให้ได้ผลการทดลองที่ผิดพลาดไปได้
- 5.2.3 ควรใช้เครื่องมือในการวัดขนาดของรูเจาะที่แม่นยำกว่านี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น
- 5.2.4 ระหว่างการทดลองควรใส่อุปกรณ์ป้องกัน เช่น แว่นตา เพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมี
- 5.2.5 ในการสังเกตการสัมผัสกันระหว่างเข็มฉีดยากับชิ้นงาน จะสังเกตจากการวัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายมายังเข็มฉีดยาและชิ้นงานจากมัลติมิเตอร์ โดยก่อนการทดลอง

นั้นจะทำการทดสอบการลัดวงจรของระบบก่อนแล้วสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าที่แสดง-
ออกมาจากมัลติมิเตอร์ เมื่อเริ่มทำ การทดลองแล้วถ้าเข็มฉีดยากับชิ้นงานสัมผัสกัน
ก็จะรู้ได้จากค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจากการทดสอบการลัดวงจรก่อนการทดลอง

- 5.2.6 ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการกักตัวสตุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมี จะมี
ตะกอน เกิดออกมา เมื่อตะกอนไปสัมผัสกับเข็มฉีดยาเป็นกลุ่มๆ จำนวนมากตะกอน
จะกลายเป็นสื่อ -ทางไฟฟ้า แล้วไปสัมผัสกับชิ้นงานทำให้เกิดการลัดวงจรซึ่งเป็น
สาเหตุทำให้กระบวนการกักตัวสตุระดับไมโครด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นไม่เกิดปฏิกิริยา และมี
ผลทำให้เข็มฉีดยาตันได้ ซึ่งวิธีในการแก้ปัญหาควรจะมีการฉีดยาสารอิเล็กโทรไลต์ไปยัง
ด้านบนพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อไล่ตะกอนไม่ให้ติดกับเข็ม
- 5.2.7 ในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพของรูเจาะนั้น ควรจะหุ้มฉนวนโดยรอบให้กับเข็ม
ฉีดยาแล้วเหลือส่วนของปลายเข็มฉีดยาไว้ จะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดที่ปลายเข็มฉีดยา
เท่านั้น แล้วก็จะไม่เกิดปฏิกิริยาด้านข้าง ทำให้ได้รูที่มีคุณภาพมากขึ้นโดนที่ปากรูไม่-
กว้าง และในการลดความ เข้มข้นของสารละลายจะส่งผลต่อความราบเรียบของ
ผิวชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพเพิ่มขึ้น

อ้างอิง

- [1] วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมกุล, การกัดวัสดุด้วยไฟฟ้าเคมี, technology pramation(2011)76-77
- [2] Minh Dang Nguyen n, Mustafizur Rahman, Yoke San Wong, Transitions of micro-EDM/SEDCM/micro-ECM milling in low-resistivity deionized water, International Journal of Machine Tools & Manufacture 69 (2013) 48–56
- [3] 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)
- [4] Yong Liu , Huitao Cai , Hansong Li , Fabrication of micro spherical electrode by one pulse EDM and their application in electrochemical micromachining, Journal of Manufacturing Processes 17 (2015) 162–170
- [5] Xiaolei Chen, Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Di Zhu Reduction of undercutting in electrochemical micro-machining of micro-dimple arrays by utilizing oxygen produced at the anode, Surface & Coatings Technology 277 (2015) 44–51
- [6] D. Zhu , Y.B. Zeng, Z.Y. Xu, X.Y. Zhang , Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding , CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 , (2011) , 247–250
- [7] Zhaoqi Zeng, Yukui Wang, Zhenlong Wang, Debin Shan, Xiaolong He , A study of micro-EDM and micro-ECM combined milling for 3D metallic micro-structures , Precision Engineering 36 , (2012) , 500– 509
- [8] L. Yong , H. Ruiqin, Micro , electrochemical machining for tapered holes of fuel jet nozzles , Procedia CIRP 6 (2013) 395 – 400
- [9] Xu Zhengyang, Liu Jia, Zhu Dong, Qu Ningsong, Wu Xiaolong, Chen Xuezheng, Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy Chinese , Journal of Aeronautics, (2015), 28(4): 1263–1272



ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ก.1 รูปแบบการทดลองชุดที่ 1

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	4.5	20
5-8	4.5	10
9-12	6	20
13-16	6	10
17-20	7.5	20
21-24	7.5	10
25-28	9	20
28-32	9	10

ตาราง ก.2 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-16 (แผ่นที่ 1)

โวลต์	รูที่	อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)	ทะลุ	ยก	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	เวลา (วินาที)
4.5	1	20	-142	-147	649	636.475	591
4.5	2	20	-235	-240	701		870
4.5	3	20	-247	-252	598		906
4.5	4	20	-206	-211	598		783
4.5	5	10	-100	-105	415	447.963	930
4.5	6	10	-118	-123	598		1038
4.5	7	10	-105	-110	363		960
4.5	8	10	-100	-105	415		930
6	9	20	-155	-160	571	552.037	630
6	10	20	-90	-95	519		435
6	11	20	-122	-127	571		531
6	12	20	-142	-147	546		591
6	13	10	-69	-74	494	539.273	744
6	14	10	-60	-65	519		690
6	15	10	-75	-80	598		780
6	16	10	-69	-74	546		744

ตาราง ก.3 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 17-32 (แผ่นที่ 2)

โวลต์	รูที่	อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด (ไมโครเมตร ต่อนาที)	ทะลุ	ยก	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	เวลา (วินาที)
7.5	17	20	-156	-166	571	636.475	648
7.5	18	20	-140	-150	598		600
7.5	19	20	-132	-142	649		576
7.5	20	20	-218	-288	728		1014
7.5	21	10	-62	-67	571	565.047	702
7.5	22	10	-60	-66	571		696
7.5	23	10	-55	-60	546		660
7.5	24	10	-56	-61	571		666
9	25	20	-112	-122	649	629.848	516
9	26	20	-95	-105	623		465
9	27	20	-86	-96	571		438
9	28	20	-95	-99	676		447
9	29	10	-34	-39	546	558.665	534
9	30	10	-30	-35	623		510
9	31	10	-29	-34	546		504
9	32	10	-33	-38	519		528

ตาราง ก.4 รูปแบบการทดลองชุดที่ 2

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนที่อิเล็กโทรด (ไมโครเมตรต่อนาที)
1-4	6	20
5-8	7.5	20
9-12	9	20
13-16	4.5	10
17-20	6	10
21-24	7.5	10
25-28	9	10

ตาราง ก.5 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-12 (แผ่นที่ 3) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที

โวลต์	รูที่	ทะลุ	ยก	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	เวลา (วินาที)
6	1	-400	-410	688	728	1380
6	2	-405	-415	875		1395
6	3	-385	-395	625		1335
6	4	-403	-413	725		1389
7.5	5	-319	-329	650	644	1137
7.5	6	-320	-330	613		1140
7.5	7	-315	-325	625		1125
7.5	8	-345	-355	688		1215
9	9	-288	-298	625	606	1044
9	10	-284	-294	588		1032
9	11	-261	-271	500		963
9	12	-272	-282	713		996

ตาราง ก. 6 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 13-28 (แผ่นที่ 4) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที

โวลต์	รูที่	ทะลุ	ยก	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	เวลา (วินาที)
4.5	13	-348	-358	905	818	2448
4.5	14	-329	-339	838		2334
4.5	15	-315	-325	743		2250
4.5	16	-330	-340	784		2340
6	17	-228	-238	446	473	1728
6	18	-202	-212	486		1572
6	19	-224	-234	527		1704
6	20	-234	-244	432		1764
7.5	21	-188	-198	608	568	1488
7.5	22	-181	-191	514		1446
7.5	23	-193	-203	500		1518
7.5	24	-185	-195	649		1470
9	25	-174	-184	527	676	1404
9	26	-168	-178	743		1368
9	27	-185	-195	892		1470
9	28	-174	-184	541		1404

ตาราง ก.7 รูปแบบการทดลองชุดที่ 3

การทดลองที่	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการเคลื่อนอิเล็กโทรด (มิลลิเมตรต่อนาที)
1-4	9	0.01
5-8	12	0.01

ตาราง ก.8 ผลการทดลองการเจาะรูครั้งที่ 1-8 (แผ่นที่ 5) ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 10 ไมโครเมตรต่อนาที

โวลต์	รูที่	ทะลุ	ยก	เส้นผ่านศูนย์กลาง (ไมโครเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	เวลา (วินาที)
9	1	-433	-443	833	849.358	2958
9	2	-514	-524	872		3444
9	3	-520	-530	1026		3480
9	4	-382	-392	667		2652
12	5	-427	-437	846	772.435	2922
12	6	-389	-399	833		2694
12	7	-377	-387	692		2622
12	8	-372	-382	718		2592



การคำนวณหาปริมาณของสารประกอบที่ใช้ทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์

โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

(มวลโมเลกุลของ Na = 23 , Cl = 35)

หามวลโมเลกุลของของผสมได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

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

หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 1500 ml ได้ดังนี้

$$\frac{0.1 \text{ mol}}{1 \text{ l}} = \frac{A_{\text{NaCl}} \text{ g}}{1500 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ mol}}{58 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}}$$

$$A_{\text{NaCl}} = 8.7 \text{ g}$$

เมื่อ A_{NaCl} คือ ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ หน่วยกรัม (g)

กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

(มวลโมเลกุลของ H = 1 , S = 32 , O = 16)

หามวลโมเลกุลของของผสมหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

$$MW_{\text{H}_2\text{SO}_4} = (1 \times 2) + (1 \times 32) + (4 \times 16) = 98 \text{ g}$$

หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 700 ml

โดยที่ ความเข้มข้นของ H_2SO_4 คือ 98% โดยน้ำหนักส่วนด้วยปริมาตร, ความหนาแน่น 1.83 g/ml

$$\therefore \text{ความเข้มข้นของ } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ ในขวด} = \frac{1.83 \text{ g}}{1 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ mol}}{98 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} \times \frac{98}{100} = 18.3 \text{ mol/l}$$

ต้องการ H_2SO_4 0.1 M จาก H_2SO_4 18.3 M

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$(18.3 \text{ M}) V_1 = (0.1 \text{ M})(1000 \text{ ml})$$

$$V_1 = 5.46 \text{ ml} \text{ ต่อปริมาณสารอิเล็กโทรไลต์ 1 ลิตร}$$

\therefore จะได้ปริมาณ H_2SO_4 ต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 700 ml

$$A = \frac{5.46 \times 700}{1000} = 3.822 \text{ ml}$$

เมื่อ $A_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ คือ ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ หน่วย มิลลิลิตร (ml)

โซเดียมไนเตรท (NaNO_3)

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

หามวลโมเลกุลของของผสมหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

จะได้มวลโมเลกุลของของผสมดังนี้

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

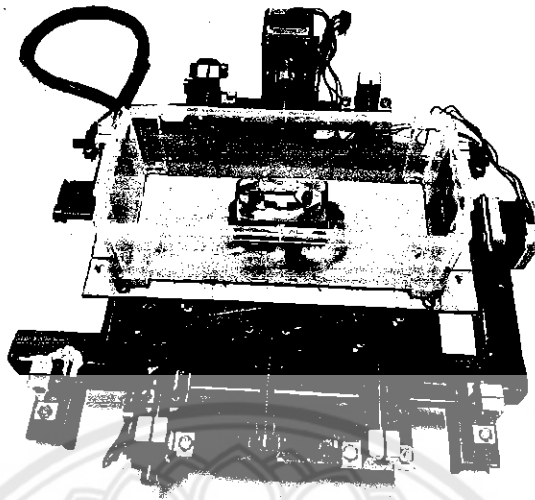
หาน้ำหนักของสารประกอบที่ใช้ในการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 1000 ml

$$\frac{0.1 \text{ mol}}{1 \text{ l}} = \frac{A \text{ g}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1 \text{ mol}}{85 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}}$$

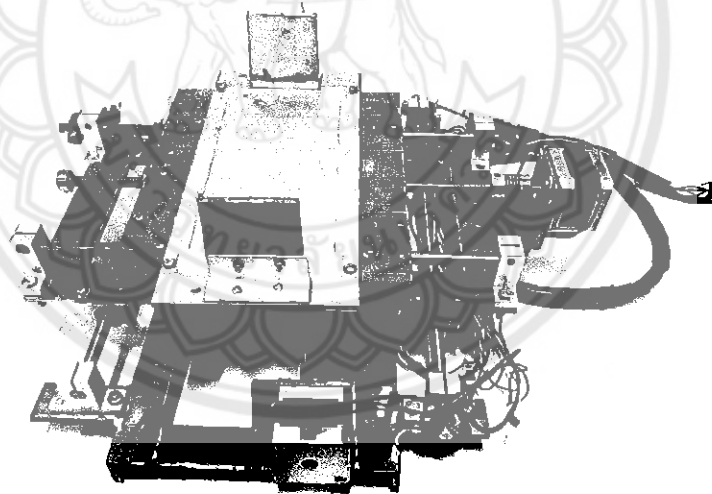
$$A = 8.5 \text{ g}$$

เมื่อ A_{NaNO_3} คือ ปริมาณโซเดียมไนเตรทที่ใช้ในการทำสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ หน่วยกรัม (g)

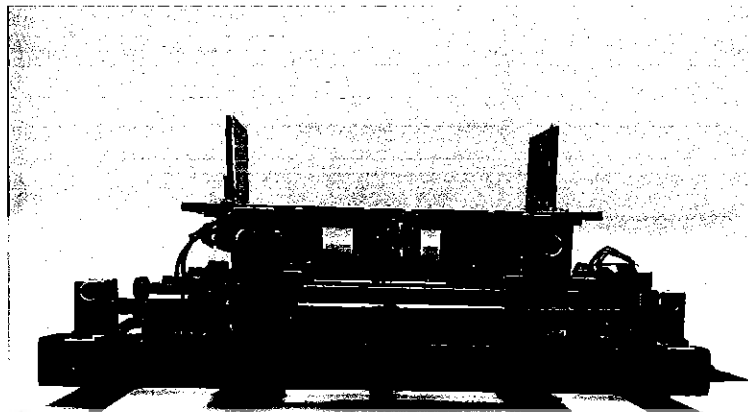




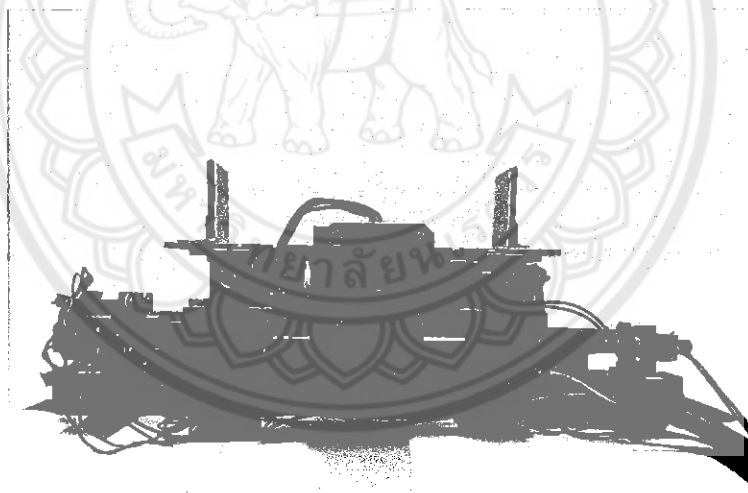
รูป ค.1 แสดงกระเบรองรับสารอิเล็กทรอนิกส์และแท่นจับจับชิ้นงานแบบพร้อมใช้งานแล้ว



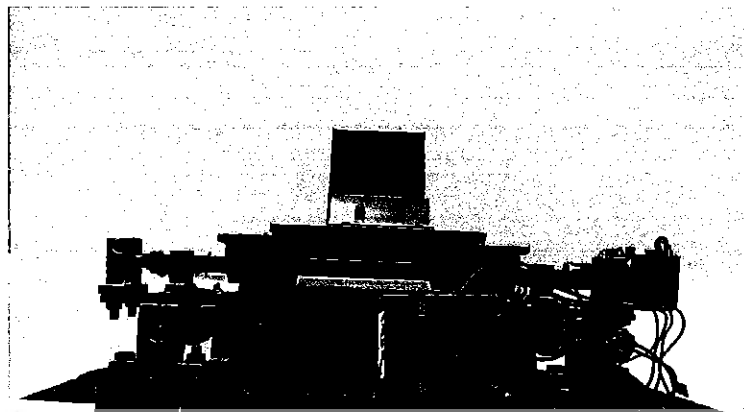
รูป ค.2 แสดงตัวถือคกระเบรองรับสารอิเล็กทรอนิกส์และแท่นจับจับชิ้นงาน



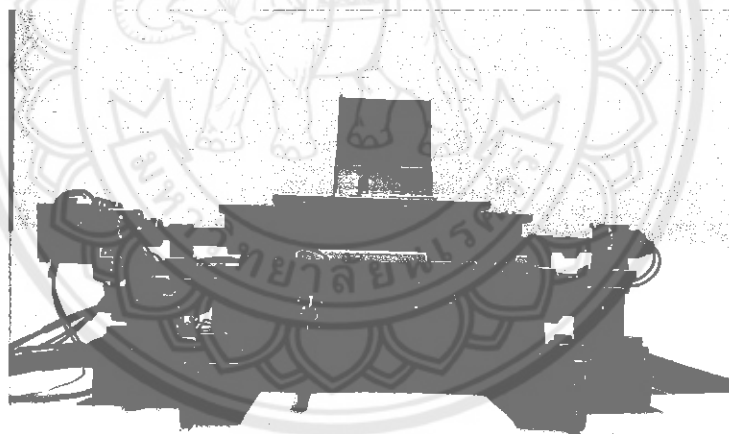
รูป ค.3 แสดง stage XY ด้านหน้า



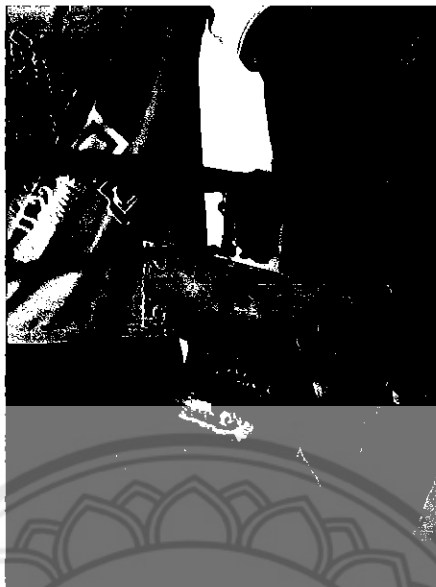
รูป ค.4 แสดง stage XY ด้านหลัง



รูป ค.5 แสดง stage XY ข้างขวา



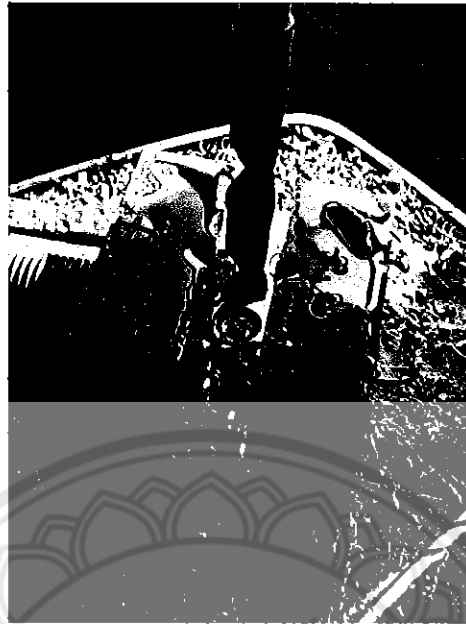
รูป ค.6 แสดง stage XY ข้างซ้าย



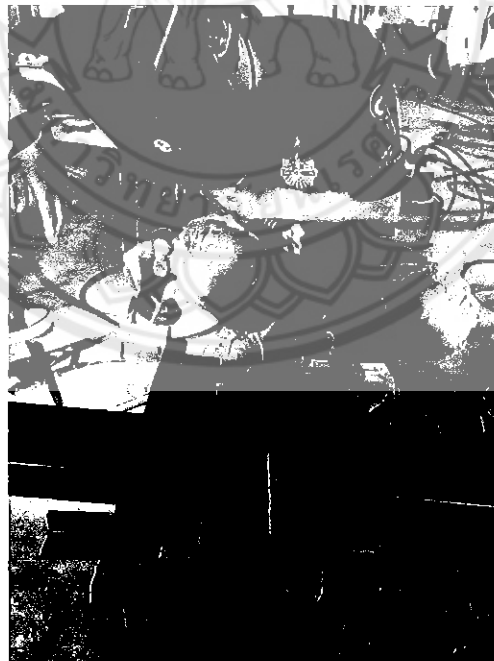
รูป ค.7 แสดงการวัดและตัดแผ่นสแตนเลส



รูป ค.8 แสดงการมาร์คตำแหน่งเพื่อเจาะรู



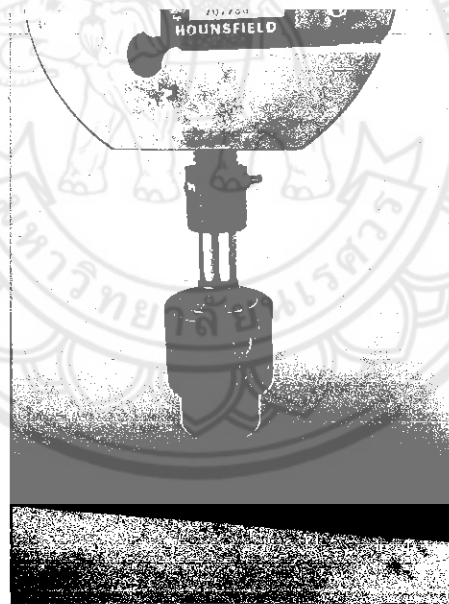
รูป ค.9 แสดงการเจาะรู



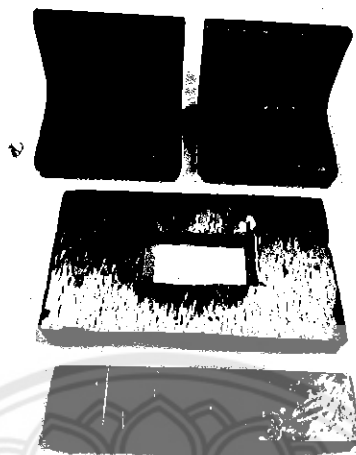
รูป ค.10 แสดงการเชื่อมฐาน stage XY



รูป ค.11 แสดงการตั้งระดับน้ำเพื่อทำการเจาะรูเบริงเข้ากับฐาน stage XY



รูป ค.12 แสดงชุดหัวเจาะเพื่อยึดกับเครื่อง UTM ที่ทำจากเครื่อง 3D Printer



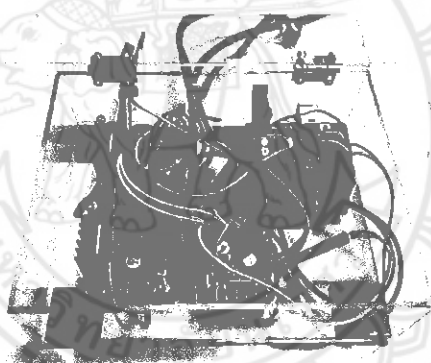
รูป ค.13 แสดงอุปกรณ์ใช้ทำแท่นจับชิ้นงาน



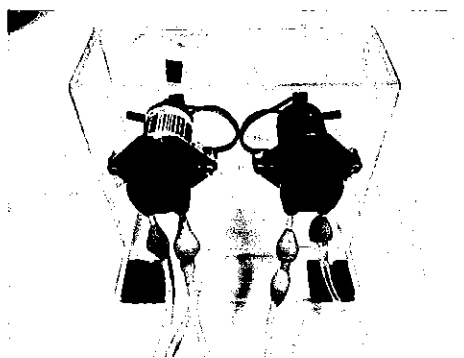
รูป ค.14 แสดงแท่นจับชิ้นงาน



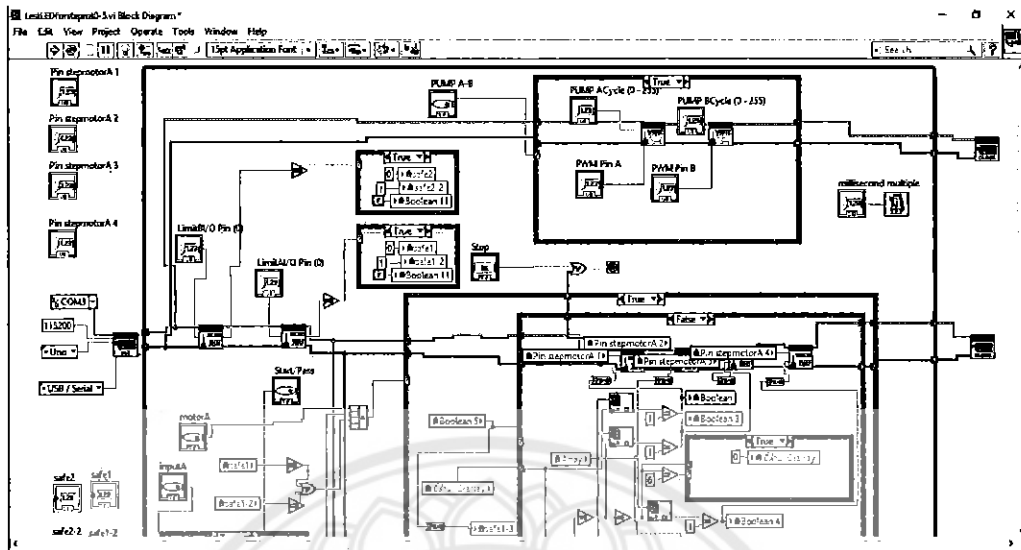
รูป ค.15 แสดงชุดลดแรงดันภายในสายยาง



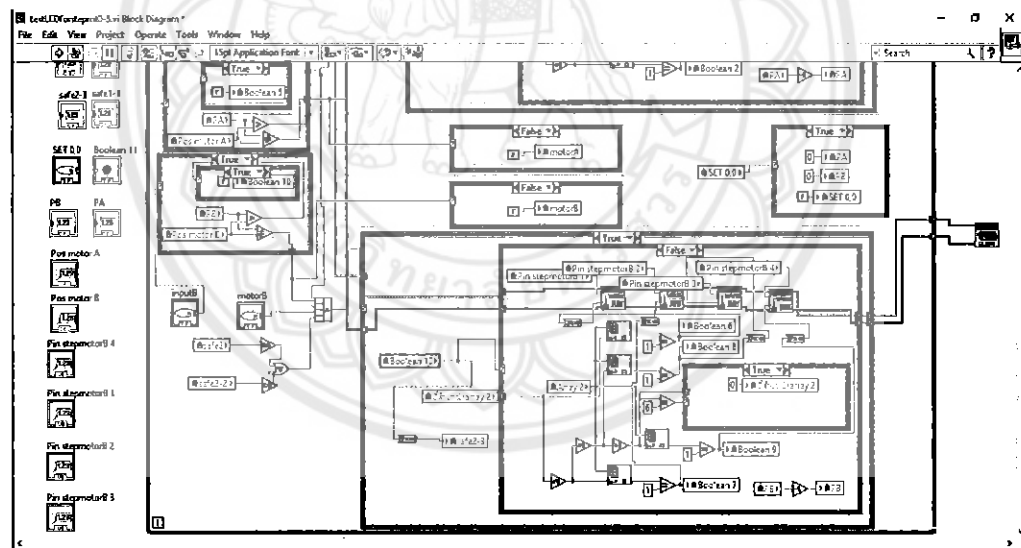
รูป ค.16 กล่องบอร์ดควบคุมการทำงานของ Stage และ Pump



รูป ค.17 แสดงป้มในการดูดสารละลายอีเล็กโทรไลต์ไปยังเข็มฉีดยา



รูป ค.18 แผนภาพโปรแกรมควบคุมชุดทดลอง 1



รูป ค.19 แผนภาพโปรแกรมควบคุมชุดทดลอง 2



ทำการทดสอบหาอัตราการไหลของ pump โดยการปรับเปลี่ยนค่า PWM ที่จ่ายให้กับ pump วัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขั้วของมอเตอร์ pump และวัดปริมาณน้ำที่ได้ในเวลา 60 วินาที

ตาราง ง.1 ผลการทดสอบ pump (หมุนตามเข็มนาฬิกา)

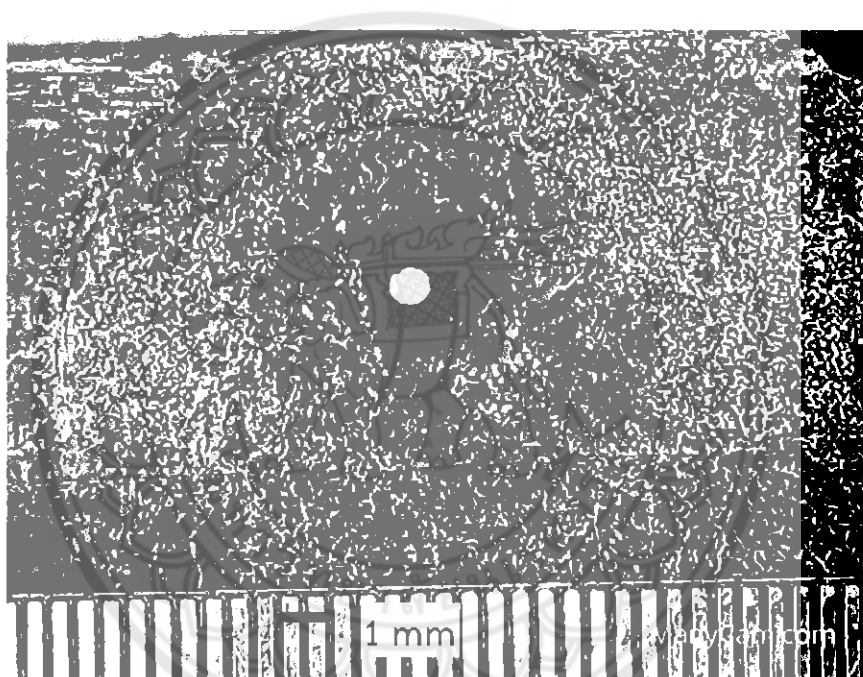
PWM	เวลา (วินาที)	ความต่างศักย์เฉลี่ย	อัตราการไหลเฉลี่ย (มิลลิลิตรต่อนาที)
255	60	-8.923	43.433
200	60	-8.547	42.133
150	60	-7.847	37.133
100	60	-6.600	28.867
80	60	-5.947	24.667

ตาราง ง.2 ผลการทดสอบ pump (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)

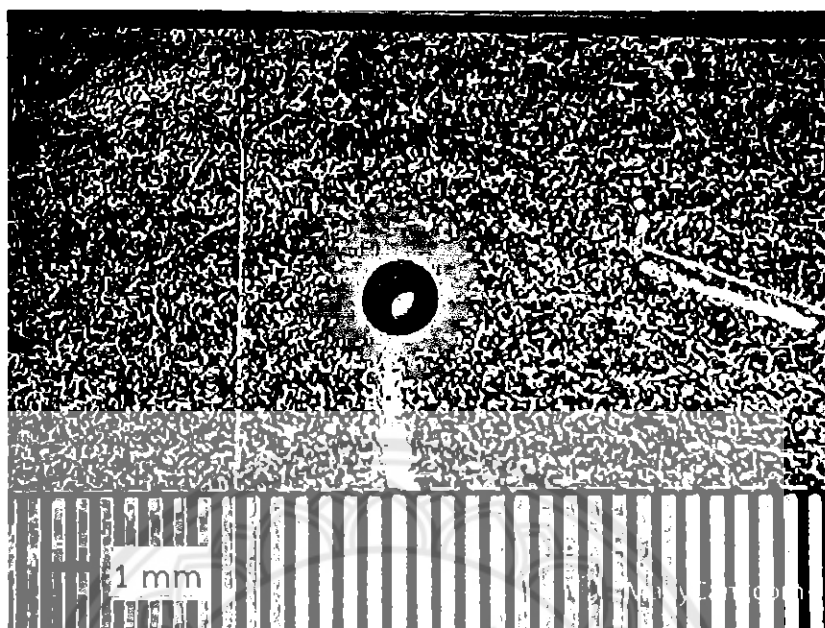
PWM	เวลา (วินาที)	ความต่างศักย์เฉลี่ย	อัตราการไหลเฉลี่ย (มิลลิลิตรต่อนาที)
255	60	8.787	41.133
200	60	8.390	38.500
150	60	7.573	33.267
100	60	6.260	24.800
80	60	5.520	19.033



การทดลองเจาะรูโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไนเตรทเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในกระบวนการ เจาะวัสดุชิ้นงาน 3 แบบที่แตกต่างกันคือ สเตนเลสหนา 4000 ไมโครเมตร ทองแดงหนา 1300 ไมโครเมตร และอลูมิเนียม 400 ไมโครเมตร ความต่างศักย์ที่ใช้คือ 9 โวลต์ อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรด 20 ไมโครเมตรต่อนาที จะหยุดกระบวนการเมื่อเริ่มสังเกตเห็นน้ำ สารละลายพุ่งลงใต้แผ่นชิ้นงาน ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ไป ระยะห่างช่องว่างระหว่าง อิเล็กโทรด กับผิวชิ้นงานกับสารอิเล็กโทรไลต์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ ของแต่ละการทดลอง



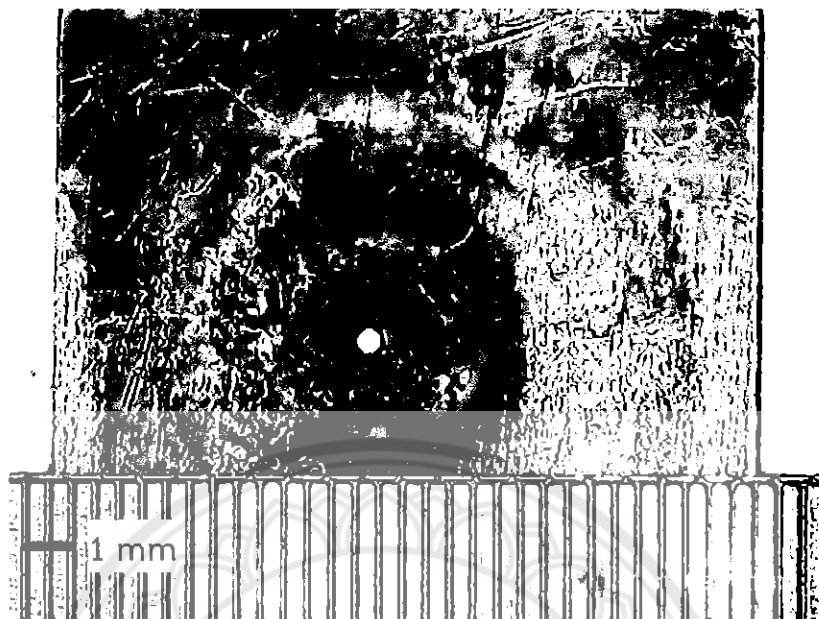
รูป จ.1 ภาพรูเจาะ แผ่นสเตนเลส 4000 ไมโครเมตร - โซเดียมคลอไรด์



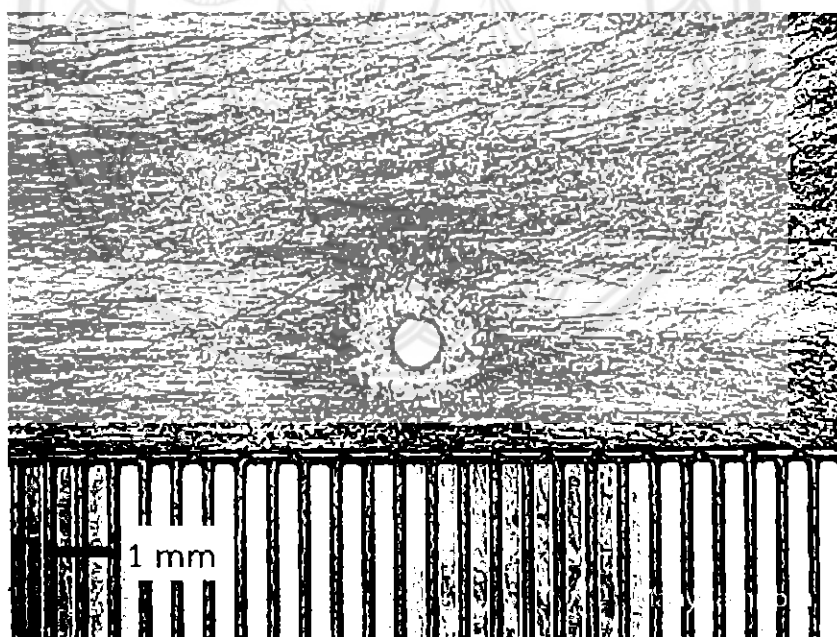
รูป จ.2 ภาพจุลทรรศน์ แผ่นสแตนเลส 4000 ไมโครเมตร – โซเดียมไนเตรท



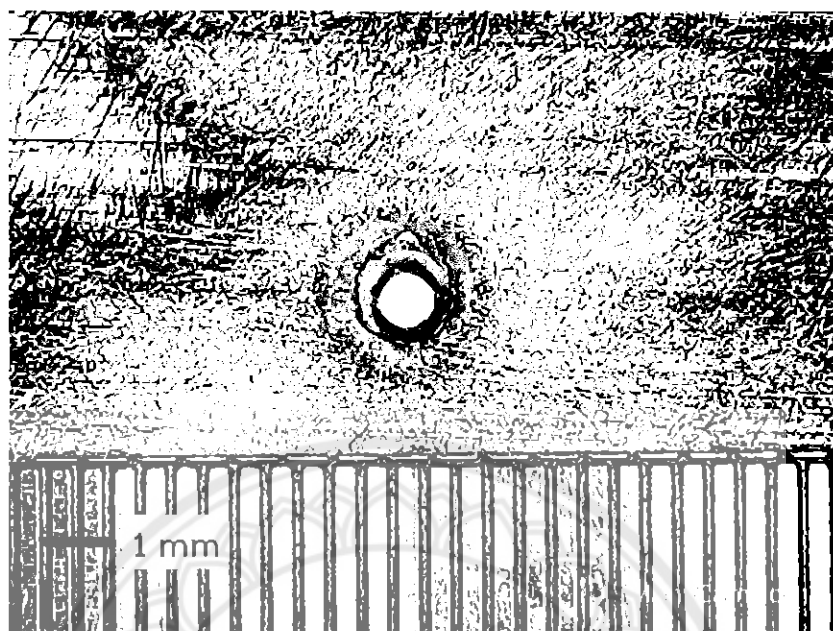
รูป จ.3 ภาพจุลทรรศน์ แผ่นทองแดง 1300 ไมโครเมตร – โซเดียมคลอไรด์



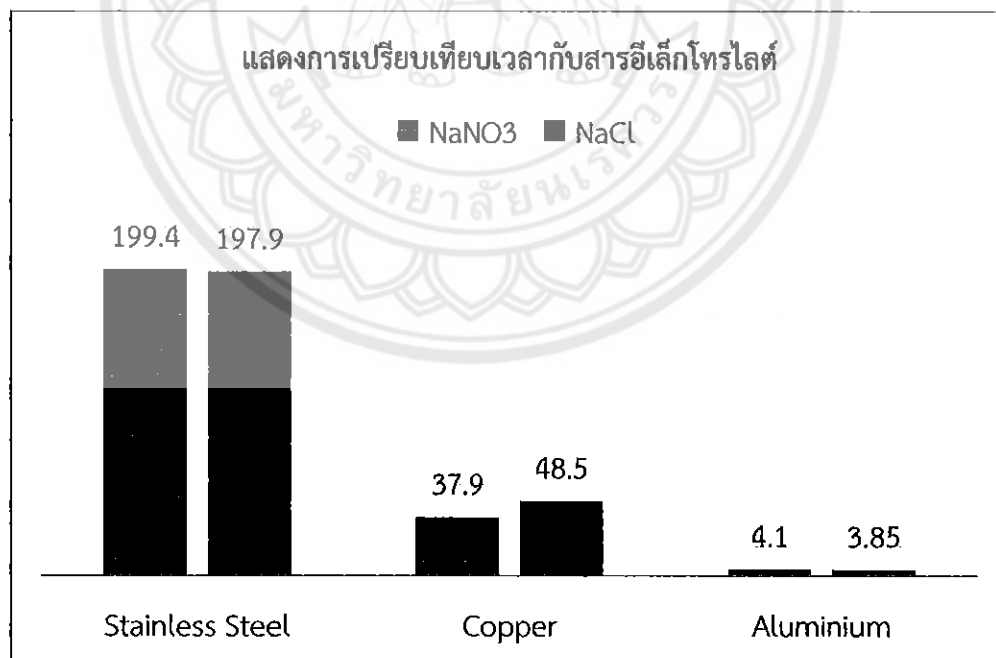
รูป จ.4 ภาพจุลทรรศน์ แผ่นทองแดง 1300 ไมโครเมตร - โซเดียมไนเตรต



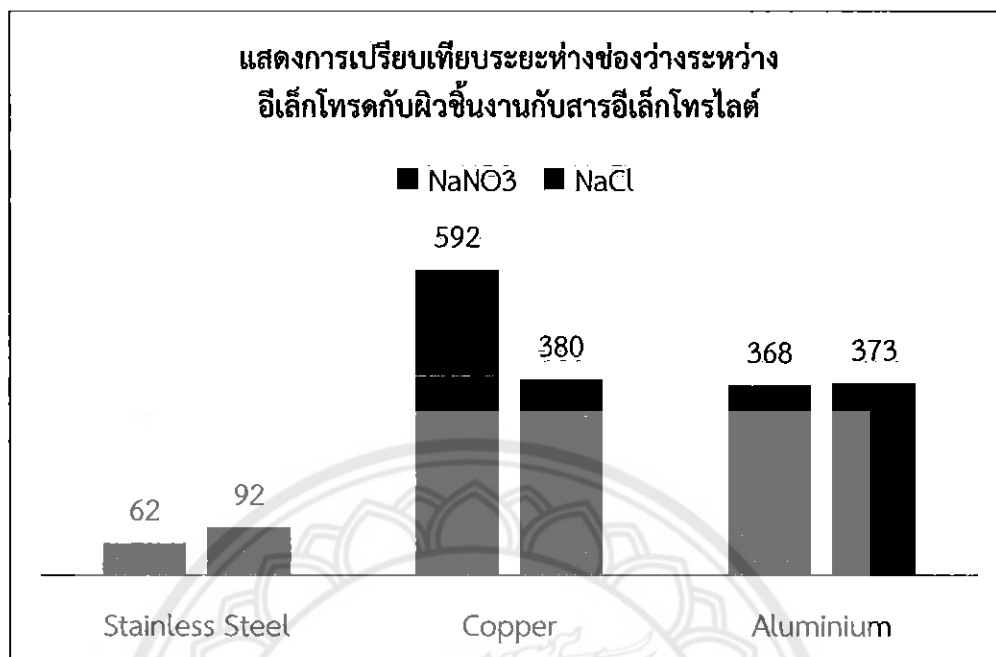
รูป จ.5 ภาพจุลทรรศน์แผ่นอลูมิเนียม 400 ไมโครเมตร - โซเดียมคลอไรด์



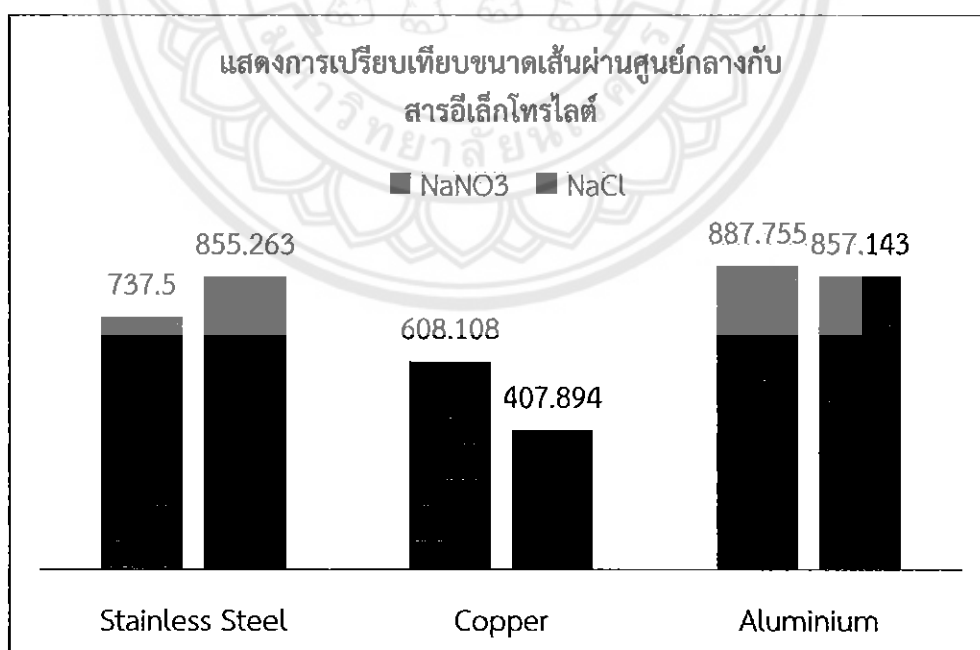
รูป จ.6 ภาพจุลทรรศน์แผ่นอลูมิเนียม 400 ไมโครเมตร - โซเดียมไนเตรท



รูป จ.7 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในกระบวนการของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์



รูป จ.8 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์



รูป จ.9 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์

จากผลการทดลอง วัสดุทั้งสามชนิดที่ได้ทำการทดลองเพิ่มนั้นถือว่าสามารถทำการเจาะได้ทั้งหมด แต่คุณภาพของรูเจาะนั้นก็แตกต่างกันไป ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดก็แตกต่างกันจึงอาจไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ว่าวัสดุชนิดใดจะให้คุณภาพของรูเจาะที่ดีกว่ากัน แต่จากการสังเกตชิ้นงานแล้ววัสดุสแตนเลส หนา 4000 ไมโครเมตรนั้นถือว่าได้คุณภาพผิว และรูที่ดี ดังแสดงในรูป จ.2 ซึ่งใช้โซเดียมไนเตรทเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในส่วนของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ จากรูป จ.7 อลูมิเนียมจะใช้เวลาน้อยที่สุดอาจจะเป็นเพราะมีความหนาไม่มาก วัสดุทองแดงก็ถือว่าทำการเจาะได้เร็ว เนื่องจากมีความหนาถึง 1400 ไมโครเมตร จากรูป จ.8 ระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของรูเจาะ จากรูปเห็นได้ว่าวัสดุสแตนเลสนั้นจะทำให้เกิดช่องว่างดังกล่าวนี้น้อยที่สุด ในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู จากรูป จ.9 จะเห็นได้ว่าวัสดุทองแดงมีขนาดรูเล็กกว่าวัสดุชนิดอื่น เป็นเพราะทองแดงเกิดระยะห่างช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานมากที่สุด ส่งผลทำให้ชิ้นงานทะลุเร็วเกินไป แสดงให้เห็นว่า ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงาน นั้นก็จะส่งผลต่อขนาดของรูเจาะด้วยเช่นกัน



ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ - สกุล : นาย ภาณุเดช ดั่งวงทำ
 วัน เดือน ปี เกิด : 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2536
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 144 หมู่ที่ 4 ตำบล หนองไขว่ อำเภอ หล่มสัก จังหวัด เพชรบูรณ์ 67110

ประวัติการศึกษา

2558 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร

2554 : มัธยมศึกษา โรงเรียน ผาเมืองวิทยาคม

ชื่อ - สกุล : นาย จักรพงศ์ จับแสงจันทร์
 วัน เดือน ปี เกิด : 4 กันยายน พ.ศ. 2536
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 128 หมู่ที่ 5 ตำบล หนองกู่ลา อำเภอ บางระกำ จังหวัด พิษณุโลก 65140

ประวัติการศึกษา

2558 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร

2554 : มัธยมศึกษา โรงเรียน ประชาสงเคราะห์วิทยา

ชื่อ - สกุล : นาย พฤตินัย มูลณี
 วัน เดือน ปี เกิด : 28 ตุลาคม พ.ศ. 2537
 ที่อยู่ปัจจุบัน : 68 หมู่ที่ 16 ตำบล ปากช่อง อำเภอ หล่มสัก จังหวัด เพชรบูรณ์ 67110

ประวัติการศึกษา

2558 : วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยนเรศวร

2554 : มัธยมศึกษา โรงเรียน หล่มสักวิทยาคม