

การปรับปรุงไมโครแอกซ์ไอเตอร์เชิงความร้อน : การปรับความหยาบผิวและการควบคุมตำแหน่ง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF THERMAL MICROACTUATOR :
SURFACE ROUGHNESS MODIFICATION AND POSITIONING CONTROL

Mr. Veerapong Lobtum



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน : การปรับ
	ความหนาผิวและการควบคุมตำแหน่ง
โดย	นายวีรพงศ์ ลบตุ้ม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีรัฐระวานิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันต์ รัตนสุมาวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศัคนานต์ สรุงบุญมี)

วีรพงศ์ ลับตุ้ม : การปรับปรุงไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน : การปรับความหยาบผิวและการควบคุมตำแหน่ง (IMPROVEMENT OF THERMAL MICROACTUATOR : SURFACE ROUGHNESS MODIFICATION AND POSITIONING CONTROL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิม, 109 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงความหยาบผิวของไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนด้วยเทคนิคการชุบไฟฟ้าเคมีโดยการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง และพัฒนาวิธีการควบคุมระยะเคลื่อนที่แบบป้อนกลับโดยอาศัยค่าความต้านทานของแอกชูเอเตอร์เอง ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางวัสดุได้แก่ ความหยาบผิว โครงสร้างผลึก และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของกระบวนการในการสร้างชิ้นงาน ที่ความถี่ของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง 4 ค่าคือ 10, 50, 200 และ 500 Hz เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรง ในการวัดความหยาบผิวใช้พารามิเตอร์คือ ความหยาบผิวเฉลี่ย ความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย และค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด 5 จุด ผลการทดสอบแสดงว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 และ 200 Hz มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ประมาณ 20% ความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของชิ้นงานของการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz มีค่าต่ำกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 35% สำหรับความหยาบผิวค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด 5 จุดพบว่า การใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz สามารถลดความหยาบให้ต่ำกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 70% นอกจากนี้โครงสร้างผลึกของทั้งสองวิธีการจะให้โครงสร้างผลึกแบบ FCC (Face-Centered Cubic) มีดัชนีมิลเลอร์ที่ (111) และค่าคงที่แลชทิกเท่ากับ 3.524 อังสตรอม ในส่วนของประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในกระบวนการสร้างที่ใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงในทุกกรณีมีค่าประมาณ 95-96% ในขณะที่การใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าประมาณ 80% สำหรับการพัฒนาเทคนิคการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์พบว่า ค่าความต้านทานของโครงสร้างที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิจะมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในแบบเชิงเส้นตรง ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง $20 \text{ m}\Omega$ และมีระยะเคลื่อนที่ในช่วง $60 \mu\text{m}$ ในการศึกษาได้นำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ควบคุมการทำงาน เมื่อทดสอบโดยการสั่งให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เคลื่อนที่ไป 15 และ 25 μm พบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 15 วินาทีทั้งสองกรณีและความผิดพลาดของตำแหน่งไม่เกิน 5 μm สำหรับการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคำสั่งพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับจะให้ตำแหน่งที่แม่นยำกว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า และการตอบสนองต่อการถูกรบกวนพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับจะรักษาระยะการเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามคำสั่งได้โดยใช้เวลาประมาณ 10 วินาทีในการทำงาน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770302021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTROTHERMAL MICROACTUATOR,ELECTRODEPOSITION,SURFACE ROUGHNESS,FEEDBACK CONTROL

VEERAPONG LOBTUM: IMPROVEMENT OF THERMAL MICROACTUATOR : SURFACE ROUGHNESS MODIFICATION AND POSITIONING CONTROL. ADVISOR: ASST. PROF.ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., 109 pp.

This study aims to improve a surface roughness of a thermal microactuator using a pulse electrodeposition technique and develop a feedback control methodology using a resistance of the microactuator itself. For the first part, three parameters including surface roughness, crystalline structure and current efficiency were examined. Four frequencies such as 10, 50, 200 and 500 Hz of the pulse electrodeposition were tested and compared the results with that of DC current. For the surface roughness, three roughness parameters namely average roughness (R_a), root-mean-square roughness (R_q) and ten-point mean roughness (R_z) were reported. The average roughness of 10 and 200 Hz pulse electrodeposition were comparable, and decreased from that of DC electrodeposition about 20%. The root-mean-square roughness of 200 Hz pulse electrodeposition was decreased from that of DC current about 35%. For ten-point mean roughness, it was decreased about 70%. In addition, a crystalline structure of both techniques was FCC (Face-Centered Cubic) and a lattice constant of crystalline preference orientation (111) was 3.524 Angstrom. For the current efficiency, the pulse electrodeposition at all tested frequencies were estimated to be 95-96%. Meanwhile, that of DC electrodeposition was only 80%. For the second part, it was found that the change of resistance due to a temperature rising had a linear relationship with the displacement of the microactuators. In the range of 20-m Ω variation, the tip of the microactuators could be moved about 60 μm . To control a displacement of the tip to 15 and 25 μm , the steady displacement was reached at 15 s from the beginning, and the error was less than 5 μm . In a time-variation test, a feedback control had better motion-precision than that of feed-forward control. In addition, the disturbance had less effect to the system with the feedback control, and the system could resume to the desired displacement within 10 s.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ประสบความสำเร็จจากความช่วยเหลือและการสนับสนุนในทุกด้านจาก ท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน ท่านได้เสียสละหลายอย่างทั้ง ความรู้ คำปรึกษา เงินทุน ให้งานวิจัยนี้สามารถฝ่าทางตันและเดินไปข้างหน้าต่อไปได้ ขอกราบขอบคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างมากที่ได้มอบโอกาส ให้ผู้วิจัยได้เข้ามาทำงานวิจัยนี้และผลักดันให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จการศึกษาระดับมหาบัณฑิตได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช ท่านได้มีคำแนะนำและมีการสังเกตในตัวงานเพื่อสามารถให้แก่ใช้จุดบกพร่องต่างๆ ขอขอบคุณ วาทีร้อยตรี ธนพร เสาวรัตน์ชัย ในการช่วยเหลือในการหาจัดเครื่องมือมาใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์ทดสอบเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์ทดสอบทางวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การทำวิจัยในห้องปฏิบัติการเครื่องกลไฟฟ้า จุลภาคและนาโนเทคโนโลยีแห่งนี้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาระดับมหาบัณฑิต ผู้วิจัยได้รับความรู้ ความสุข และ แนวคิดต่างๆมากมาย สุดท้ายแล้วทางผู้วิจัยขอขอบคุณ นาย ชรินทร์ ลอบตุ้ม และ นาง วรณี ลอบตุ้ม ในการเลี้ยงดูและสนับสนุนในทุกด้าน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญทำให้ผู้วิจัยสามารถประสบความสำเร็จตามที่ ตั้งใจไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	3
2.1 รูปแบบและการทำงานของไมโครแอกซ์ฮิวเตอร์เชิงความร้อน.....	3
2.2 การสร้างไมโครแอกซ์ฮิวเตอร์.....	4
2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการชุบโลหะ.....	4
2.3.1 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของขั้วไฟฟ้า [10].....	5
2.3.2 ความสัมพันธ์อัตราการเกิดปฏิกิริยากับกระแสไฟฟ้า [11]	6
2.3.3 ความหนาของชิ้นงานจากการชุบโลหะ [12].....	7
2.3.4 การถ่ายโอนมวลสาร [11].....	8
2.3.5 กฎของฟิสิกซ์ [11].....	9
2.3.6 ความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการชุบโลหะโดยผลจากไฟฟ้ากระแสตรง	9
2.3.7 ความสม่ำเสมอผิวที่เกิดจากการชุบไฟฟ้า (Leveling) [13]	10
2.3.8 กระแสไฟฟ้าแบบช่วง (Pulse Current) [8].....	12
2.3.9 โพรไฟล์ความเข้มข้นในกระบวนการชุบโลหะโดยผลจากกระแสไฟฟ้าแบบช่วง[14] ...	13
2.3.10 งานวิจัยเกี่ยวกับการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงต่อคุณสมบัติของวัสดุ.....	15

2.4 การควบคุมและการป้องกันภัย.....	16
2.5 สรุป	21
บทที่ 3 การสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน	23
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	23
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตชิ้นงาน.....	23
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน.....	23
3.1.3 สารเคมีที่ใช้งานในการผลิตชิ้นงาน.....	23
3.2 การสร้างผลิตชิ้นงาน	24
3.3 กระบวนการชุบชิ้นงานด้วยไฟฟ้าเคมี	25
บทที่ 4 คุณสมบัติของชิ้นงาน	28
4.1 ความหนาของผิวของชิ้นงาน	28
4.2 โครงสร้างผลึกของชิ้นงาน	31
4.3 ประสิทธิภาพของกระแส (Current Efficiency)	34
4.4 สรุป	35
บทที่ 5 การหาคุณลักษณะและการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	37
5.1 รูปแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับการทำงาน	37
5.1.4 วงจรมอสเฟสสำหรับการขับกระแสไฟฟ้า	40
5.1.5 การวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมไมโครแอกซ์เวเตอร์	41
5.1.6 การวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร	42
5.1.7 การวัดค่าความต้านทาน	44
5.1.8 การรับสัญญาณและส่งสัญญาณเพื่อทำงาน.....	44
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของไมโครแอกซ์เวเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่.....	45
5.2.1 การวัดระยะการเคลื่อนที่.....	45

5.2.2 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของความต้านทานและระยะการเคลื่อนที่	46
5.2.3 ผลของการหาคุณลักษณะ.....	46
5.3 การควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	50
5.3.1 หลักการควบคุมและอัลกอริทึมการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	50
5.3.2 การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการควบคุม.....	51
5.3.3 การทดสอบการตอบสนองต่อคำสั่งแบบขั้นบันได	56
5.3.4 การตอบสนองต่อการถูกรบกวน.....	61
5.4 สรุป	64
บทที่ 6 สรุปภาพรวมงานวิจัย.....	66
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก.....	73
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	81
ภาคผนวก ง.....	83
ภาคผนวก จ.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	109

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของสารละลายยูนิกเกลินา.....	24
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ.....	27
ตารางที่ 3.3 ค่าเวลาที่ใช้สำหรับการซุบ ของ Pulse แต่ละตัว.....	27
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลค่าความหยาบผิวโดยแยกตามพารามิเตอร์.....	31
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณน้ำหนักที่ต้องการของไมโครแอสซัวเอเตอร์.....	34
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพกระแสที่ได้จากการซุบโลหะ.....	35



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ (ก) รูปแบบ (ข) แผนภาพการเคลื่อนที่ [9].....	3
รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานโดยวิธี LIGA.....	4
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 2.4 (ก) อิเล็กตรอนที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำให้เกิดกระแสฟาราเดอิก (ข) อิเล็กตรอนที่ไปเก็บที่ผิวไม่เกิดปฏิกิริยาทำให้ดึงไอออนของโลหะเข้ามา	6
รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะความเข้มข้นที่เกิดขึ้นที่ผิว ณ เวลาต่างๆ จากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ	10
รูปที่ 2.6 ระยะการแพร่ที่แตกต่างกันทำให้อัตราการชุบของแต่ละจุดไม่เท่ากัน	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะกระแสไฟฟ้าแบบช่วง	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะโปรไฟล์ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่เกิดขึ้นที่ผิว ณ เวลาต่างๆ (ก) เวลา t_1, t_2, t_3 (ข) เวลา t_4 (ค) เวลา t_5 (ง) เวลา t_6, t_7, t_8 จากรูปที่ 2.7.....	14
รูปที่ 2.9 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน จากการชุบโดยใช้กระแสแบบช่วง โดย $t_{ON} = 10 \mu s$ และ $t_{OFF} = 90 \mu s$ (ก) $i_p = 100 A/dm^2$ (ข) $i_p = 200 A/dm^2$ (ค) $i_p = 300 A/dm^2$ (ง) $i_{DC} = 20 A/dm^2$ [17]	15
รูปที่ 2.10 ความหนาพื้นผิวจากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง (ก) ลักษณะผิวชิ้นงาน (ข) ความหนาพื้นผิวชิ้นงานกับความถี่ [18].....	16
รูปที่ 2.11 ลักษณะไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ z-shaped [20].....	17
รูปที่ 2.12 การควบคุมไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ (ก) บล็อกไดอะแกรมการควบคุม (ข) ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปกับระยะเคลื่อนที่ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปกับกระแสไฟฟ้า [20]	17
รูปที่ 2.13 หลักการทำงาน (ก) ค่าความต้านทานทั้งสองเท่ากัน (ข) อุณหภูมิของตัวต้านทานไม่เท่ากันซึ่งทำให้ความต้านทานทั้งสองไม่เท่ากันด้วย [19].....	19

รูปที่ 2.14 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการทำงานของการควบคุมแบบเปิด (ข) ผลการตอบสนองเชิงเวลาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ผ่านการควบคุมแบบเปิด (ค) ความสัมพันธ์ของตำแหน่งอ้างอิงกับระยะที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์เคลื่อนที่ (ง) ความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่กับค่าจากเซ็นเซอร์ [19]..... 20

รูปที่ 2.15 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของการทำงานของการควบคุมแบบปิด (ข) ผลการตอบสนองเชิงเวลาของไมโครแอกซ์เวเตอร์จากการควบคุมแบบปิด [19] 21

รูปที่ 3.1 (ก) ขนาดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ (ข) แผ่นลวดลายสำหรับฉายแสง (ค) แผ่นลวดลายที่แปะบน substrate (ง) ลักษณะชิ้นงานไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนหลังจากกัดฟิล์มออก .. 26

รูปที่ 3.2 การตั้งค่าการทดลองการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง 27

รูปที่ 4.1 ภาพลักษณะความหยาบผิวที่ Ra เท่ากันในมุมมอง 3 มิติ [20]..... 29

รูปที่ 4.2 ภาพแสดงนิยามของ R_z 29

รูปที่ 4.3 ความหยาบผิว (ก) ความหยาบผิวเฉลี่ย, R_a (ข) ความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย, R_q (ค) ค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด, R_z 30

รูปที่ 4.4 ผล XRD (ก) ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz..... 32

รูปที่ 4.5 (ก) ผล XRD ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz (ข) ลักษณะของโครงสร้างผลึกและดรรชนีมิลเลอร์ของชิ้นงาน 33

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของ Current Efficiency จากการชุบโลหะ 35

รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน 37

รูปที่ 5.2 การต่อวงจรที่ใช้สำหรับการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์ 38

รูปที่ 5.3 (ก) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ การควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์ (ข) อุปกรณ์ไฟฟ้า (ค) การติดตั้งมอสเฟส 39

รูปที่ 5.4 ภาพแสดงไมโครแอกซ์เวเตอร์ซึ่งอยู่ภายในกล่องเพื่อป้องกันจากสภาพแวดล้อมภายนอก..... 40

รูปที่ 5.5 (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟส ชนิด N-Channel Enhancement (ข) การติดตั้ง Mosfet แบบ Low Side Driver 41

รูปที่ 5.6 ลักษณะวงจรแบ่งแรงดัน	42
รูปที่ 5.7 (ก) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดย กระแสไฟฟ้าแปรผันกับสัญญาณศักย์ไฟฟ้า (ข) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดย กระแสไฟฟ้าแปรผันกับสัญญาณสัญญาณศักย์ไฟฟ้า (ค) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดยใช้สัญญาณความแตกต่างในการวัดกระแส	43
รูปที่ 5.8 ภาพแสดงตัวแทนไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ เป็นโพลความต้านทาน	44
รูปที่ 5.9 (ก) โมดูล Analog to Digital Converter ads1115 (ข) โมดูล Digital to Analog Converter MCP472.....	45
รูปที่ 5.10 การวางไมโครแอกซ์ฮอเตอร์บนกล่องจุลทรรศน์	45
รูปที่ 5.11 ภาพแสดงการวัดระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์.....	46
รูปที่ 5.12 (ก) พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์เชิงความร้อนในขณะสภาวะปกติ (ข) ไมโครแอกซ์ฮอเตอร์เชิงความร้อนเมื่อมีการกระตุ้น [21].....	48
รูปที่ 5.13 การตอบสนองทางเวลา (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ระยะการเคลื่อนที่	48
รูปที่ 5.14 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่	49
รูปที่ 5.15 ภาพแสดงความต้านทานที่เปลี่ยนไปกับระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์	49
รูปที่ 5.16 หลักการควบคุมไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ในงานวิจัยนี้.....	50
รูปที่ 5.17 ผังงานการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมไมโครแอกซ์ฮอเตอร์	51
รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองทางเวลาต่อคำสั่ง 15 μm	52
รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองทางเวลา (ก) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 15 μm (ข) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 15 μm	53
รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนองค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 15 μm ..	54
รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนองทางเวลาต่อคำสั่ง 25 μm	54
รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองทางเวลา(ก) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 25 μm (ข) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 25 μm	55
รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนองทางเวลาของค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 25 μm	56

รูปที่ 5.24 ภาพแสดงคำสั่งของแต่ละช่วงเวลาของไมโครแอสซิงโครนัส.....	57
รูปที่ 5.25 การเคลื่อนที่ของไมโครแอสซิงโครนัสของ (ก) การควบคุมด้วยการป้อนกลับ (ข) การควบคุมด้วยวิธีป้อนไปข้างหน้า	58
รูปที่ 5.26 กระแสไฟฟ้าจาก (ก) วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (ข) วิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	59
รูปที่ 5.27 ความต้านทานที่เกิดขึ้น (ก) จากการควบคุมแบบป้อนกลับ (ข) จากการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	60
รูปที่ 5.28 ลักษณะการติดตั้งไมโครแอสซิงโครนัสในการทดลองการตอบสนองต่อการถูกรบกวน...	62
รูปที่ 5.29 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนของระยะการเคลื่อนที่ของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	62
รูปที่ 5.30 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนของการควบคุมแบบป้อนกลับ (ก) ระยะการเคลื่อนที่ (ข) ความต้านทาน	63
รูปที่ 5.31 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนกระแสไฟฟ้าต่อของการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	64

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงมากขึ้นเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์มากขึ้น ดังเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคจึงมีบทบาทสำคัญทั้งในการผลิตอุปกรณ์และวัสดุขนาดเล็ก เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภทได้แก่ ไมโครเซ็นเซอร์ ตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์วัดแรงและความดันขนาดเล็ก (Force and pressure micro-sensors) เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งและความเร็วขนาดเล็ก (Position and speed micro-sensors) และ ไมโครแอกชูเอเตอร์ ตัวอย่างเช่น วาล์วขนาดเล็ก (Micro-valves) ปั๊มขนาดเล็ก (Micro-pump) มอเตอร์แม่เหล็กขนาดเล็ก (Electromagnetic micro-motor) [1] เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สนใจในส่วนของไมโครแอกชูเอเตอร์ ไมโครแอกชูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานรูปแบบต่างๆให้เป็นพลังงานทางกล ซึ่งพลังงานที่นำมาใช้มีอยู่ 4 ประเภทได้แก่ ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic) แม่เหล็ก (Magnetic) ความร้อน (Thermal) เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนสามารถให้แรงได้ระยะการเคลื่อนที่ และความละเอียดในการเคลื่อนที่ค่อนข้างดี [2] นอกจากนี้ยังใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยและมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงทำให้การผลิตที่ง่ายเช่นกัน [3] โดยในการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนได้นำกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามาใช้ดำเนินการ เพราะสามารถควบคุมกระบวนการได้ง่ายและเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูก [4] ในปัจจุบันมีหลายสาขาที่นำไมโครแอกชูเอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การประกอบชิ้นส่วนขนาดเล็กในกระบวนการผลิต [5] ใช้ในการผ่าตัดระดับไมโครเมตร [6] เป็นต้น ซึ่งไมโครแอกชูเอเตอร์ต้องมีความสมบัติทางกลที่เหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายในกระบวนการผลิต และ ต้องมีความละเอียดอ่อนในการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจในการปรับปรุงความเรียบผิวซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลสำคัญอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อการใช้งานไมโครแอกชูเอเตอร์ เนื่องจากถ้าไมโครแอกชูเอเตอร์มีผิวที่หยาบมาก อาจทำให้วัตถุเป้าหมาย เช่น กระจกเลนส์ขนาดเล็กที่ใช้ในเครื่องโปรเจ็คเตอร์ หรือวัตถุที่ต้องการคุณสมบัติในการสะท้อนแสง ซึ่งจะทำให้วัตถุดังกล่าวเกิดรอยและมีความเสียหายได้ ในการปรับปรุงความเรียบผิวจากกระบวนการชุบโลหะ ได้มีวิธีการปรับปรุงผิว 2 วิธีการได้แก่ การใส่สารเติมแต่งและการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง (Pulse) ซึ่งวิธีการใส่สารเติมแต่งเมื่อใช้ไปนานๆ จะทำให้ความเข้มข้นของสารเติมแต่งจะลดลงเนื่องจากถูกใช้งาน ซึ่งเป็นผลทำให้ผลของสารเติมแต่งน้อยลงไปด้วย ส่วน

วิธีการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง ซึ่งสามารถควบคุมกระบวนการได้ง่ายกว่าโดยการปรับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า[7] นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง จะสามารถทำให้ลักษณะผิวที่ผ่านกระบวนการชุบมีสภาพที่ดีขึ้น [8]

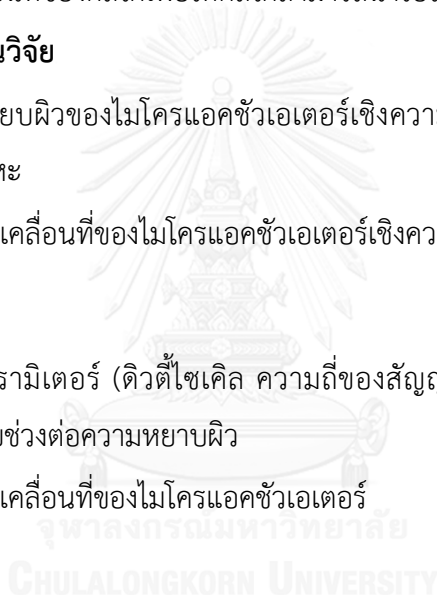
นอกจากนี้ยังงานวิจัยนี้ยังสนใจในส่วนของ การควบคุมการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ซึ่งเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากการนำไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ไปใช้งานในด้านต่างๆ ดังตัวอย่างข้างต้น ย่อมต้องการความแน่นอนในการทำงานดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมการทำงานของกลไกให้ดำเนินการเคลื่อนที่ไปสู่เป้าหมาย ในงานวิจัยนี้จึงสนใจการปรับปรุงความเรียบผิวจากการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยวิธีการชุบโลหะ ซึ่งใช้ลักษณะการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบช่วง และ ทำการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของกลไกเพื่อให้กลไกสามารถนำไปใช้งานได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- ปรับปรุงความเรียบผิวของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงในการชุบโลหะ
- ควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์เชิงความร้อนแบบป้อนกลับ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- หาผลของค่าพารามิเตอร์ (ดิวตี้ไซเคิล ความถี่ของสัญญาณ ค่ากระแสสูงสุด) จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงต่อความหยาบผิว
- ควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์

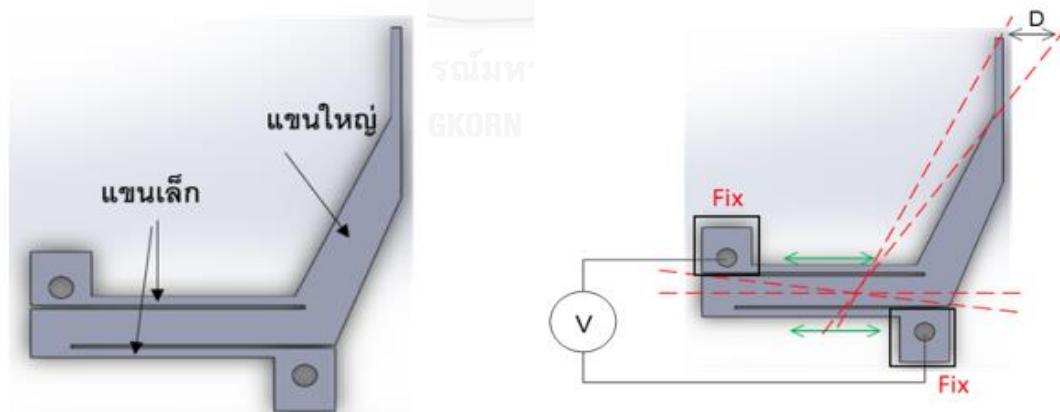


บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

เนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีที่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอันประกอบไปด้วย รูปแบบหลักการของไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน การควบคุมการเคลื่อนที่ การสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกลโดยวิธี LIGA ทฤษฎีการชุบโลหะเบื้องต้น รวมถึงความสม่ำเสมอของผิวในกระบวนการชุบโลหะทั้งแบบการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสแบบช่วง

2.1 รูปแบบและการทำงานของไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน

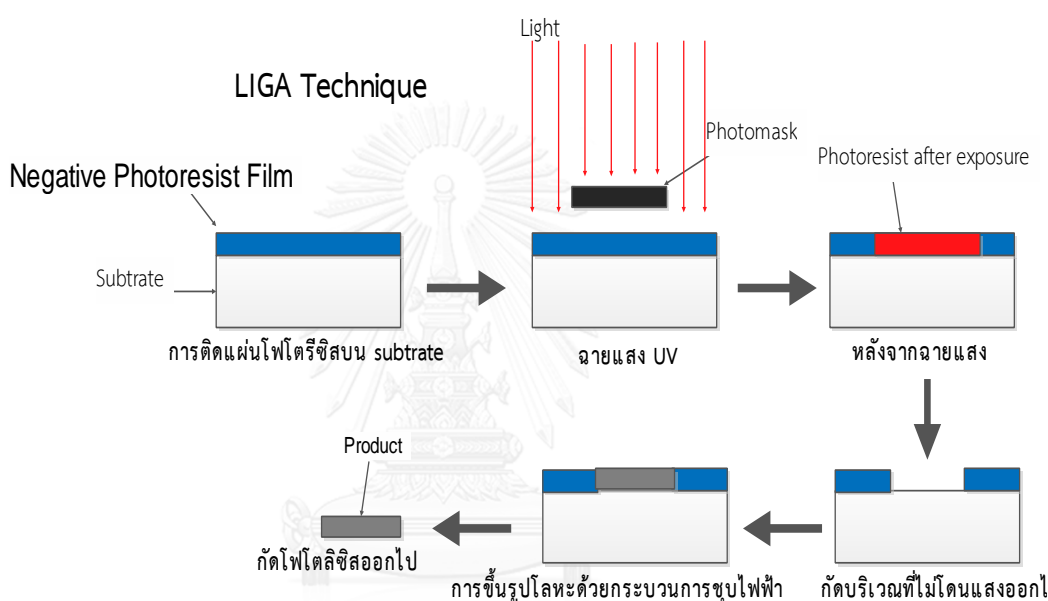
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกรูปแบบไมโครแอกซ์เอเตอร์ของ อิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ์[9] ซึ่งได้ออกแบบและสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนโดยใช้นิกเกิลเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับการผลิตรูปแบบไมโครแอกซ์เอเตอร์ประกอบด้วยแขนใหญ่และแขนเล็กดังรูปที่ 2.1ก หลักการทำงานของไมโครแอกซ์เอเตอร์โดยการจ่ายกระแสเข้าไปที่บริเวณแขนเล็กทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 2.1ข โดยจะเกิดความร้อนที่แขนเล็กทั้งสองฝั่งจากการขยายตัวทางความร้อนทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์เกิดการขยับตัว ซึ่งจากการทดลองจ่ายกระแสให้กลไกแล้วพบว่า ที่ระยะห่างระหว่างแขนเล็กกับแขนใหญ่ที่สามารถทำให้เกิดระยะการกระดกมากที่สุดคือระยะ 200 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.1 ไมโครแอกซ์เอเตอร์ (ก) รูปแบบ (ข) แผนภาพการเคลื่อนที่ [9]

2.2 การสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์

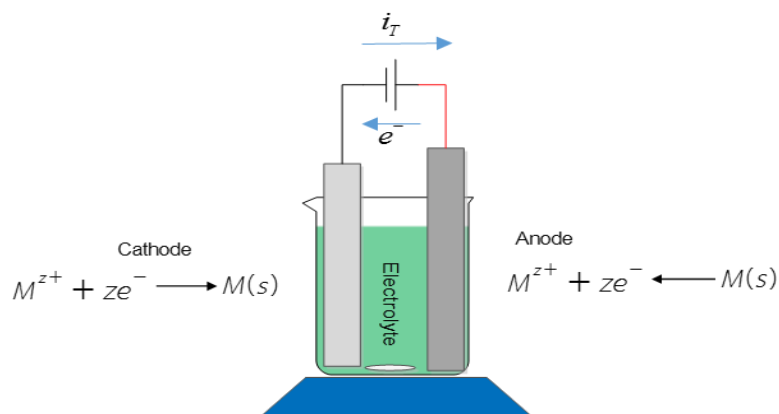
ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธี LIGA ซึ่งเป็นวิธีการผลิตไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สามารถผลิตชิ้นงานได้ละเอียดและความง่ายต่อการสร้าง ในการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย การติดแผ่นลวดลาย (Mask) บนฟิล์มโฟโตลิซิส (Photoresist) การฉายแสง UV การกัดโฟโตลิซิสส่วนที่ไม่โดนแสงออกด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการชุบไฟฟ้าเคมี การกัดโฟโตลิซิสออกเพื่อนำชิ้นงานออกมาโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กระบวนการดังกล่าวแสดงโดยรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตชิ้นงานโดยวิธี LIGA

2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานโดยการชุบโลหะ

ในกระบวนการชุบไฟฟ้าประกอบไปด้วย สารละลาย (Electrolyte) และขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วโดยขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเรียกว่า “แคโทด (Cathode)” ส่วนขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเรียกว่า “แอโนด (Anode)” ในการชุบโลหะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้โดยใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่สารละลายเพื่อให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายรับอิเล็กตรอนและเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวเรียกว่าปฏิกิริยา “รีดักชัน (Reduction)” ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดในส่วนของขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่า “ออกซิเดชัน (Oxidation)” ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.3.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของขั้วไฟฟ้า [10]

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อดำเนินการชุบโลหะ ทิศทางของอิเล็กตรอนจะตรงข้ามกับทิศทางของกระแสโดยอิเล็กตรอนจะวิ่งไปที่ขั้วแคโทดส่วนที่ขั้วแอโนดจะสูญเสียอิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.4ก เนื่องจากการชุบโลหะเป็นกระบวนการที่เกิดการแปลงสภาพจาก ไอออนของโลหะกลายเป็นของแข็ง และ ปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด ดังปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจึงได้รับความสนใจเป็นหลัก จากรูปที่ 2.4 เป็นภาพขยายขั้วไฟฟ้าแคโทด ในขณะที่จ่ายกระแสเข้าไปทำให้อิเล็กตรอนวิ่งตรงข้ามกับกระแสไปที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

- ปรากฏการณ์ฟาราเดอิก (Faradaic Process) : ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าสามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้าและมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในปรากฏการณ์นี้เมื่อข้ามรอยต่อไปได้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าชนิดหนึ่งเรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (i_F) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถดูได้ดังรูปที่ 2.4ก
- ปรากฏการณ์นอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic Process) : ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนถูกพาไปที่ผิวของขั้วไฟฟ้าและถูกดูดซับไว้ที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าแต่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งอิเล็กตรอนที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4ข ซึ่งในระหว่างที่อิเล็กตรอนจัดเรียงตัวจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า และเมื่อเรียงตัวจนกระทั่งได้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมเพียงพอก็จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ฟาราเดอิกได้ ระหว่างเกิดการเรียงตัวอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์นี้จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าอีกชนิด ซึ่งเรียกว่า กระแสประจุ (i_C)

จากตรงนี้จะเห็นว่า กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปให้ระบบ (i_T) จะมีค่าเท่ากับกระแสฟาราเดอิก รวมกับกระแสประจุตั้งสมการ (2.1)

$$i_T = i_c + i_F \quad 2.1$$

2.3.2 ความสัมพันธ์อัตราการเกิดปฏิกิริยากับกระแสไฟฟ้า [11]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งกฎของฟาราเดย์ได้พบว่ามีปริมาณประจุไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ (2.2) ปริมาณกระแสไฟฟ้าคือการเปลี่ยนแปลงของปริมาณประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลา เขียนเป็นดังสมการที่ (2.3)

$$q = zFN \quad 2.2$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad 2.3$$

N คือ ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นมีหน่วยเป็น โมล (mol)

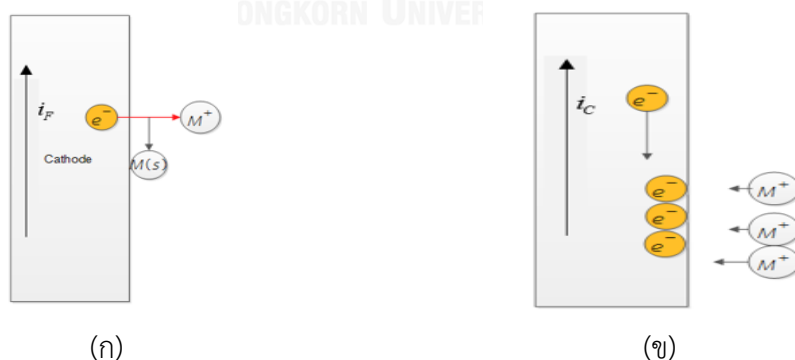
z คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 C/mol)

Q คือ ปริมาณประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น คูลอมป์ (C)

I คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที (s)



รูปที่ 2.4 (ก) อิเล็กตรอนที่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำให้เกิดกระแสฟาราเดอิก (ข) อิเล็กตรอนที่ไปเก็บที่ผิวไม่เกิดปฏิกิริยาทำให้ดึงไอออนของโลหะเข้ามา

จาก (2.2) นำไปแทนค่าใน (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบเป็นดังสมการ (2.4) สมการนี้แสดงให้เห็นว่ายิ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่าไรอัตราการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นเท่า ในขณะเดียวกันปริมาณอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดย

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{zF} \quad 2.4$$

สมการที่ (2.4) วัดค่าได้ยากเนื่องจากเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่จุดเดียว ดังนั้นนิยมวัดเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อพื้นที่ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.5) โดยจะคิดเป็นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นแทนโดยการนำพื้นที่ไปหารสมการที่ (2.4) จะได้

$$\frac{1}{A} \frac{dN}{dt} = \frac{i}{zFA} \quad 2.5$$

$$J = \frac{j}{zF}$$

J คือ ปริมาณฟลักซ์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมี มีหน่วยเป็น mol/s.cm^2

j คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ A / cm^2

2.3.3 ความหนาของชั้นงานจากการชุบโลหะ [12]

เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าไปทั่วผิวไฟฟ้าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นทำให้อิออนที่อยู่ในสถานะสารละลายกลายเป็นของแข็ง ดังปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจึงเป็นสัดส่วนกับปริมาณกระแสที่ป้อนเข้าไปกับระยะเวลาที่ดำเนินการชุบโลหะเมื่อดำเนินการไปนานขึ้นจะทำให้ชั้นงานมีความหนามากขึ้น กลไกที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ซึ่งเป็นกฎที่ใช้ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ดำเนินการกับระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการดังนี้

- น้ำหนักของอิออนที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย
- น้ำหนักของอิออนชนิดใดๆ ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะเป็นสัดส่วนเดียวกันกับน้ำหนักสมมูลของสาร

จากกฎข้อที่หนึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในกระบวนการชุบโลหะได้ เช่น ถ้าต้องการความหนาของชั้นงาน สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำเป็นระยะเวลาที่มาก หรือ การใช้กระแสที่สูงเป็นระยะเวลาที่น้อยและจากกฎข้อที่สองพบว่าโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายที่ต่างกัน

ทำให้ปริมาณไฟฟ้าที่แยกสลายตัวของโลหะชนิดใด ๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งจากตรงนี้สามารถคำนวณหาปริมาณโลหะโดยคิดเป็นน้ำหนักไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยใช้กฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (2.6) นอกจากนี้เมื่อทำการหามวลที่เกิดขึ้นสามารถนำไปคำนวณหาความหนาที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2.7)

$$m = \frac{i \cdot t \cdot M}{zF} \quad 2.6$$

จาก สมการความหนาแน่น $m = \rho V = \rho Ah$

$$\therefore h = \frac{i \cdot t \cdot M}{zF \rho A} \quad 2.7$$

โดย

m คือ มวลของอ็อกไซด์ที่เกิดขึ้น (g)

i คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ (A)

M คือ มวลอะตอมของโลหะ (g / mol)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96485 C)

h คือ ความหนาของชั้นงาน (cm)

ρ คือ ความหนาแน่นของโลหะ (g / cm³)

A คือ พื้นที่ของชั้นงาน (cm²)

2.3.4 การถ่ายโอนมวลสาร [11]

ในกระบวนการชุบโลหะนอกจากปฏิกิริยาจะเกิดที่ผิว แต่ออกไซด์ของโลหะจะเคลื่อนที่มาจากผิวเองไม่ได้ ดังออกไซด์เคลื่อนที่จากระยะที่อยู่ห่างจากผิวไปที่ขั้วไฟฟ้า การที่ออกไซด์สามารถเคลื่อนที่มาจากผิวได้จะอยู่ภายใต้หลักการการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

- **ไมเกรชั่น (Migration)** เป็นการเคลื่อนที่ของออกไซด์อิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยออกไซด์จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่เป็นลบและออกไซด์จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวก ซึ่งสามารถตัดผลของการ migration ได้โดยการเติมออกไซด์ของธาตุที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกับออกไซด์ที่ต้องการใช้งานประมาณ 50-100 เท่า
- **การนำพาออกไซด์ (Convection)** การที่ออกไซด์ในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อันเป็นผลจาก ความดัน อุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลาย และจากกลไกภายนอกเช่น การคน หรือเขย่าสารละลาย
- **การแพร่ (Diffusion)** เป็นการเคลื่อนที่ของออกไซด์จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ความเข้มข้นต่ำจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราเร็วการแพร่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่ต่างกันตามกฎของฟิกซ์

2.3.5 กฎของฟิคซ์ [11]

อัตราการแพร่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคซ์ (Fick's Law) ซึ่งกฎดังกล่าวมี 2 ข้อและมีนิยามดังนี้

- พลิกซ์ของมวลสารที่แพร่ไปเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างความเข้มข้น สามารถเขียนเป็นรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (2.8)
- กฎข้อที่สองได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปตามเวลากับอัตราการแพร่ ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ (2.9)

$$J = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad 2.8$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad 2.9$$

J คือ ปริมาณพลิกซ์ของมวลสาร $mol / s.cm^{-2}$

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ cm^2 / s

C คือ ความเข้มข้นของมวลสาร mol / cm^3

x คือ ระยะของบริเวณที่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น cm

2.3.6 ความเข้มข้นของสารละลายในกระบวนการชุบโลหะโดยผลจากไฟฟ้ากระแสตรง

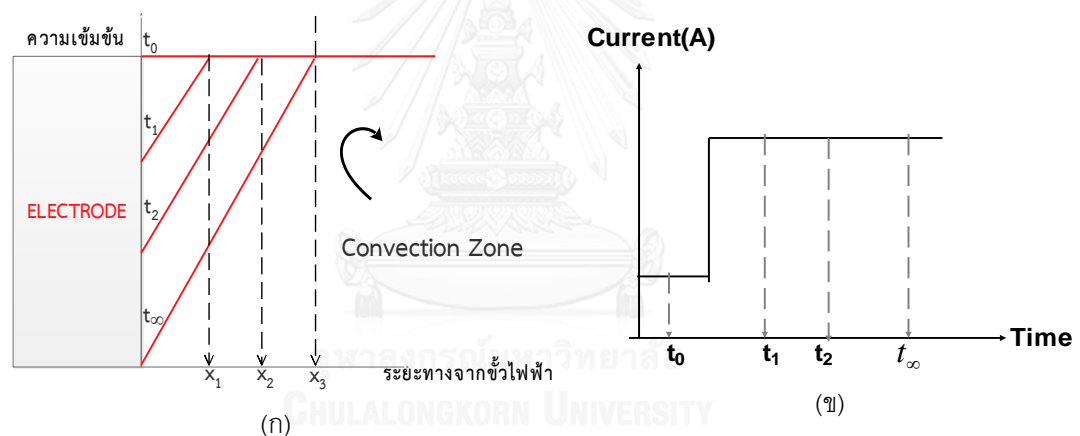
จากหัวข้อก่อนหน้าได้อธิบายถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ดำเนินการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งได้แบ่งปรากฏการณ์เป็นสองประเภทได้แก่ ปรากฏการณ์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าซึ่งอธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นบ้างที่ผิวของขั้วไฟฟ้าในการดำเนินการ และอีกประเภทได้แก่ การถ่ายโอนมวลสารซึ่งอธิบายถึงไอออนของโลหะเคลื่อนที่ไปที่ผิวของขั้วไฟฟ้าได้อย่างไร

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ ในขั้นตอนนี้จะทำการดูกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนกับระยะทางจากผิวขั้วไฟฟ้า เรียกกราฟความสัมพันธ์นี้ว่า “โปรไฟล์ความเข้มข้น (Concentration Profile)” และ จะทำการวิเคราะห์แนวโน้มที่ เวลาผ่านไปหลังจากจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปโปรไฟล์ความเข้มข้นจะเป็นอย่างไร

จากรูปที่ 2.5ข เป็นลักษณะไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าไปเพื่อดำเนินกระบวนการ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าชนิดนี้เข้าไปจะทำให้โปรไฟล์ความเข้มข้นจะเปลี่ยนแปลง ซึ่งโปรไฟล์ความเข้มข้นผลจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นดังรูปที่ 2.5ก

- ที่เวลา t_0 ยังไม่มีกระแสไฟฟ้าเข้าระบบ ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

- หลังจาก ที่เวลา t_1 มีกระแสไฟฟ้าแล้วซึ่งกระแสไฟฟ้าทำให้ที่ขั้วไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้ทำให้อิออนเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวลดลงซึ่งจะทำให้เกิด ความแตกต่างความเข้มข้นเป็นระยะ x_1 ซึ่งจะทำให้เกิดอัตราการแพร่ตาม กฎของฟิกซ์ข้อที่ 1 ซึ่งสมการดังกล่าวได้บอกถึงอัตราเร็วที่อิออนแพร่ผ่านพื้นที่บริเวณ
- เมื่อเวลาในการจ่ายกระแสเป็นเวลา t_2 ทำให้ ความแตกต่างความเข้มข้นเป็นระยะ x_2 ที่ เวลาดังกล่าวอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวมากกว่าอัตราการแพร่เข้าไปบริเวณผิวมาก หมายความว่าความเข้มข้นที่บริเวณผิวจะลดลงไปอีก
- เมื่อจ่ายกระแสเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของอิออนที่บริเวณผิวน้อยกว่า จำนวนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ดังอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่อิออนเข้าไปที่ผิว ระยะของการแพร่ที่มากที่สุดระยะคือ x_2 เนื่องจากบริเวณที่ถัดจากนี้จะเป็นบริเวณที่อิออนมีการถ่ายโอนมวลสารด้วยการนำพาเข้ามา



รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะความเข้มข้นที่เกิดขึ้นที่ผิว ณ เวลาต่างๆ จากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ลักษณะของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการ

2.3.7 ความสม่ำเสมอผิวที่เกิดจากการชุบไฟฟ้า (Leveling) [13]

ในการชุบโลหะโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อดำเนินการชุบโลหะไประยะเวลาหนึ่งแล้ว ความเข้มข้นที่ผิวมีปริมาณน้อยกว่าจำนวนที่ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ดังอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะถูกควบคุมด้วยการแพร่แทน โดยที่สภาวะดังกล่าวมีโปรไฟล์ความเข้มข้นจะมีระยะการแพร่มากที่สุด ดังรูปที่ 2.5ก ที่เวลา t_∞ จากรูปที่ 2.6 บอกถึงระยะการแพร่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผิวของขั้วไฟฟ้า ณ สภาวะดังกล่าว สามารถอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา ด้วยอัตราการแพร่โดยใช้กฎของฟิกซ์ข้อที่หนึ่ง ดังสมการ (2.8) ซึ่งจากสมการนี้สามารถประมาณค่าเป็นเส้นตรง จะได้สมการ (2.10) และหาก

กำหนดให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเท่ากับอัตราการแพร่ ดังเมื่อนำสมการ (2.5) ที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวมาแทนค่าในสมการ (2.10) จะได้สมการ (2.11) ซึ่งสมการนี้ให้กระแสไฟฟ้าแทนจำนวนอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าได้แปรผกผันกับระยะที่เกิดการแพร่ ซึ่งบริเวณกระแสไฟฟ้ามากจะเกิดปฏิกิริยาเคมีน้อยกว่าบริเวณที่มีน้อย

$$J = D \frac{C_s - C_0}{\delta} \quad 2.10$$

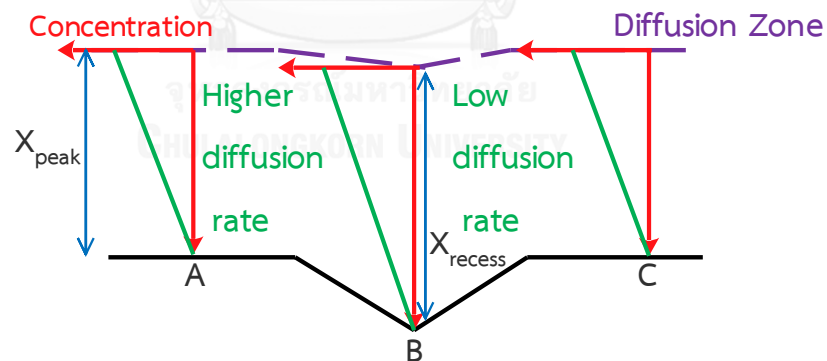
$$\frac{i}{zFA} = D \frac{C_s - C_0}{\delta}$$

$$\therefore i = zFAD \frac{C_s - C_0}{\delta} \quad 2.11$$

δ คือ ระยะที่เกิดการแพร่ (cm) โดย

$$\delta = X_{\text{peak}} \text{ ที่จุด A และ C}$$

$$\delta = X_{\text{recess}} \text{ ที่จุด B}$$



รูปที่ 2.6 ระยะการแพร่ที่แตกต่างกันทำให้อัตราการชุบของแต่ละจุดไม่เท่ากัน

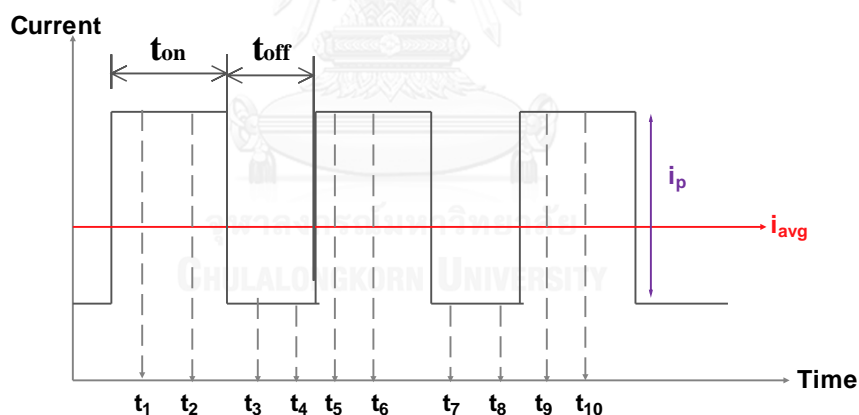
ดังจากรูปที่ 2.6 เมื่อนำสมการ (2.11) มาพิจารณาแล้วพบว่าที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่พื้นผิวเป็นหลุมลึกลงไปมีระยะที่เกิดการแพร่ (X_{recess}) ซึ่งมากกว่าจุด A และจุด C (X_{peak}) คือที่จุด B จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่าที่จุด A และ จุด C หมายความว่าที่เวลานานขึ้นความหนาของชั้นงาน ณ ตำแหน่ง A และ C จะมีค่าเท่ากัน และมีความหนามากกว่าที่จุด B ผลคือความหนาของการชุบไม่

สม่ำเสมอและเป็นสาเหตุทำให้ผิวที่ได้จากการชุบหยาบ วิธีการไม่ให้เกิดสภาวะดังรูปที่ 2.6 ต้องไม่ให้ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าหมดไป

2.3.8 กระแสไฟฟ้าแบบช่วง (Pulse Current) [8]

ในการชุบไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อดำเนินการจ่ายกระแสเป็นเวลานานขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นอยู่กับการแพร่ ซึ่งระยะที่เกิดการแพร่ ณ แต่ละจุดบนผิวของขั้วไฟฟ้าไม่เท่ากัน เนื่องจากความหยาบของผิวขั้วไฟฟ้า ทำให้แต่ละจุดมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่เท่ากันทำให้ผิวของชิ้นงานที่ได้จากการชุบมีความหยาบด้วย ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดคือการลดระยะเวลาการจ่ายกระแสและทำให้อัตราในการชุบโลหะเท่าเดิม ซึ่งกระแสไฟฟ้าแบบช่วงมีคุณสมบัติดังที่กล่าวไว้ นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงยังทำให้เกิดการนิเวศลิเอชั่นเพิ่มขึ้นโดยมีปริมาณของเกรนในพื้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ได้เกรนที่ละเอียดขึ้นเช่นกัน

กระแสไฟฟ้าแบบช่วง มีลักษณะกระแสดังรูปที่ 2.7 โดยประกอบด้วยตัวแปรการกระแสสูงสุด (i_p) และมีช่วงเวลาที่สลับไปมาระหว่างมีกระแสกับไม่มีกระแส ซึ่งแต่ละช่วงเวลามีกระแสไฟฟ้าเรียกว่าเวลาเปิด (t_{ON}) ส่วนช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสเรียกว่าเวลาปิด (t_{OFF})



รูปที่ 2.7 ลักษณะกระแสไฟฟ้าแบบช่วง

โดยตัวแปรอิสระของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง ทั้ง 3 ตัวสามารถคิดเป็นอัตราส่วนทางเวลาเรียกว่า “คิวตี้ไซเคิล (*Duty*)” และ สามารถหาความถี่จากของกระแสไฟฟ้าแบบช่วงได้จากสมการ(2.12) และ (2.13) ตามลำดับนอกจากนี้ยังหากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (i_{AVG}) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่บ่งบอกถึงอัตราการชุบโลหะจากสมการที่ (2.14)

$$Duty = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad 2.12$$

$$f = \frac{1}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad 2.13$$

$$i_{AVG} = i_p \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \quad 2.14$$

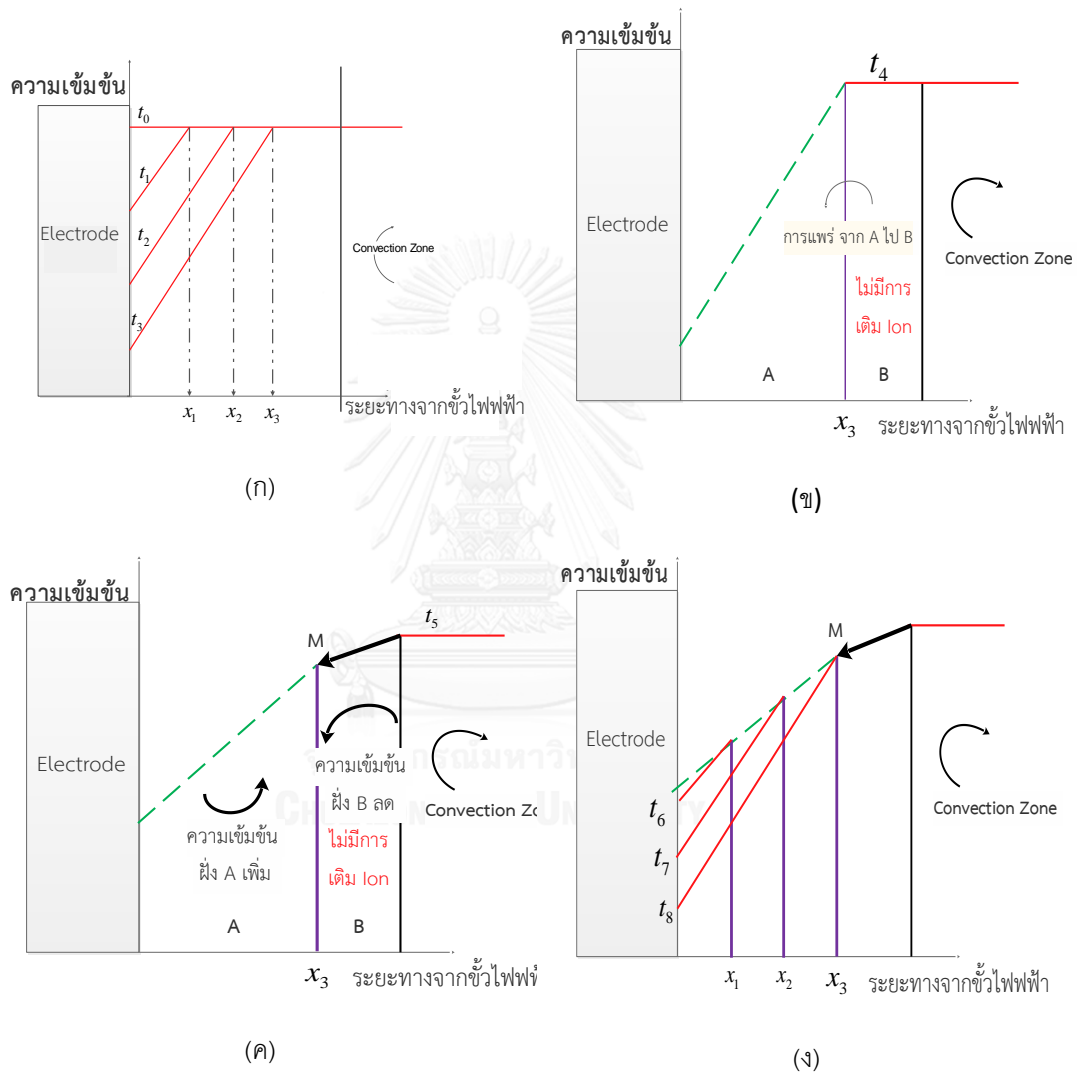
- f คือ ความถี่ของ pulse (Hz)
- $Duty$ คือ ค่าตัวชี้เซลล์ ของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง (%)
- i_p คือ กระแสสูงสุดของ Pulse (A)
- i_{AVG} คือ กระแสเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง (A)
- t_{ON} คือ เวลาที่ไม่มีกระแสไฟฟ้า(s)
- t_{OFF} คือ เวลาที่มีกระแสไฟฟ้า (s)

2.3.9 โพรไฟล์ความเข้มข้นในกระบวนการชุบโลหะโดยผลจากกระแสไฟฟ้าแบบช่วง[14]

สำหรับการดูโพรไฟล์ความเข้มข้นโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง จะพิจารณาผลจากการใช้กระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 2.7 มาวิเคราะห์ ณ ช่วงเวลาต่างๆได้โพรไฟล์ความเข้มข้นดังนี้

- ที่เวลา t_1, t_2, t_3 เป็นเวลาที่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้ามาทำให้ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นทำให้ความเข้มข้นของอออนที่บริเวณผิวลดลงส่งผลให้เกิดการแพร่ เป็นระยะ x_1, x_2, x_3 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.8ก
- ช่วงเวลา t_4 เป็นช่วงเวลาที่ไม่มีกระแสทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดการคืนความเข้มข้นของอออนจากกระบวนการแพร่จากบริเวณ B ไปยังบริเวณ A ซึ่งจะเห็นได้ดังรูปที่ 2.8ข
- ที่เวลา t_5 ความเข้มข้นบริเวณ B จะลดลงไปด้วยเนื่องจากทั้งบริเวณ A และ B ต่างเป็นบริเวณที่การนำพาไม่สามารถพาอออนจากสารละลายเข้ามาได้ ในช่วงเวลานี้จะมีการแพร่จากบริเวณ B ไปยังบริเวณ A จะทำให้ความเข้มข้นในบริเวณ A เพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.8ค
- หลังจากสิ้นสุดเวลาที่ไม่มีกระแส ที่เวลา t_6, t_7, t_8 จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเคมีอีกครั้งซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นจะไม่เท่าเดิม ด้วยเหตุนี้จะทำให้มีความแตกต่างความเข้มข้น 2 ช่วงหรืออีกนัยหนึ่งคือมีระยะการแพร่เป็น 2 ช่วงเช่นกัน โดยระยะที่เกิดการแพร่จะเป็นวงรอบแบบช่วงเวลาที่ t_1, t_2, t_3 ที่ซึ่งจะทำให้ระยะที่เกิดการแพร่เป็น x_1, x_2, x_3 ตามลำดับ เช่นเดิมแสดงได้ดังรูปที่ 2.8ง

จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นที่ผิวจากการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงจะไม่ถูกควบคุมโดยการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้ายังมีความเข้มข้นสูงกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและเมื่อกระแสรอบต่อไปผ่านมาลักษณะโปรไฟล์ความเข้มข้นจากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง จะเกิดขึ้นเป็นวงรอบแบบนี้เช่นกัน



รูปที่ 2.8 ลักษณะโปรไฟล์ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่เกิดขึ้นที่ผิว ณ เวลาต่างๆ (ก) เวลา t_1, t_2, t_3 (ข) เวลา t_4 (ค) เวลา t_5 (ง) เวลา t_6, t_7, t_8 จากรูปที่ 2.7

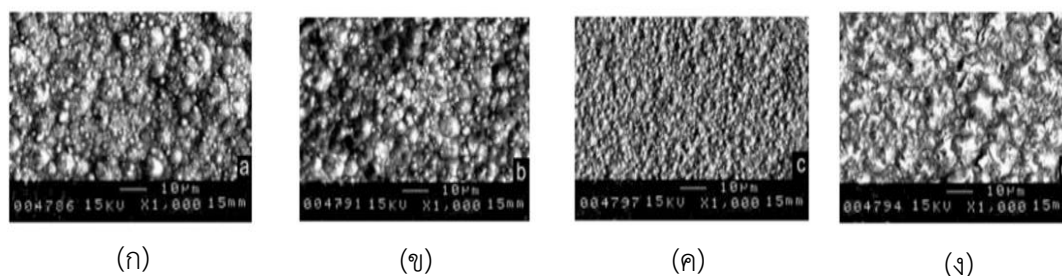
2.3.10 งานวิจัยเกี่ยวกับการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงต่อคุณสมบัติของวัสดุ

การชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง มีตัวแปรอยู่หลายชนิดซึ่งสามารถทำให้กระบวนการถูกควบคุมได้ดีขึ้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของงานวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง ซึ่งมีทั้งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกล

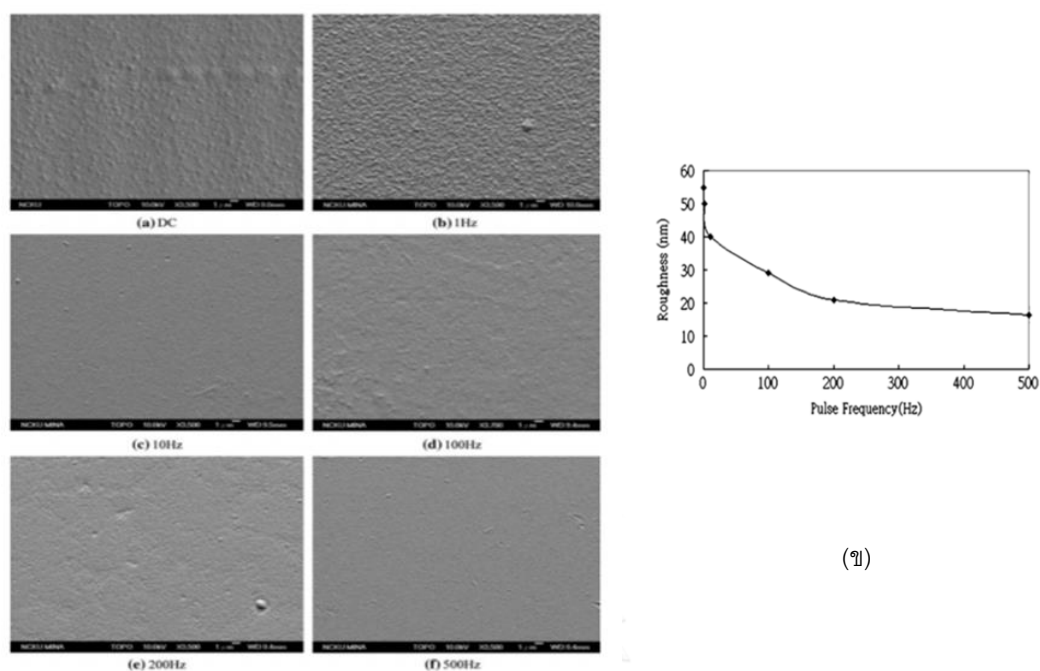
N.S Qu และคณะ [15] ได้ทำการทดลองชุบนิกเกิลโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง ซึ่งเป็นการทดลองเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางจุลภาคกับกระแสแบบ DC โดยตัวแปรที่ใช้คือระยะเวลาที่เกิดกระแส 10 μs และระยะเวลาที่ไม่เกิดกระแส 90 μs จากทำการปรับความหนาแน่นกระแสสูงสุดตั้งแต่ 20-400 A/dm^2 ส่วนกระแสแบบ DC จะปรับตั้งแต่ 2-40 A/dm^2 และทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางจุลภาคด้วย SEM, TEM และ XRD ซึ่งจากการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 100 และ 200 A/dm^2 มีลักษณะพื้นผิวคล้ายกับผลการชุบจากกระแส DC ที่ 20 A/dm^2 ดังรูปที่ 2.9

E. A. Pavlatou และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการชุบนิกเกิลโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง โดยใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟตมาใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าตัวแปรสำหรับการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วง ความหนาแน่นกระแสสูงสุดสำหรับการชุบนิกเกิล ได้แก่ 0.1-100 A/dm^2 ในส่วนของค่าความถี่ไซเคิล ได้เลือกค่าที่ 10, 30, 50, 70, 90 % ความถี่ 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 Hz ซึ่งพบว่าที่ความถี่ต่ำและความถี่ที่สูง จะได้เกรนของนิกเกิลที่ละเอียดอีกนัยคือผิวที่ได้จะเรียบด้วย

C. K. Chung และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลของความถี่จากการชุบโลหะนิกเกิลโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง โดยสารละลายที่เลือกใช้เป็นสารละลายชนิดนิกเกิลซัลเฟตโดยการศึกษาผลของความถี่จะเลือกใช้ค่ากระแสสูงสุด 3 A/dm^2 ความถี่ไซเคิลที่ 50% และความถี่ที่นำมาใช้ได้แก่ 0, 1, 10, 100, 200, 500 Hz ซึ่งจะศึกษาผลโดยใช้ SEM ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.10ก และ มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวกับความถี่เป็นดังรูปที่ 2.10ข จากผลการทดลองสรุปได้ว่าผิวของนิกเกิลจะเรียบมากในช่วงความถี่ 200-500 Hz



รูปที่ 2.9 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน จากการชุบโดยใช้กระแสแบบช่วง โดย $t_{ON} = 10 \mu\text{s}$ และ $t_{OFF} = 90 \mu\text{s}$ (ก) $i_p = 100 \text{ A}/\text{dm}^2$ (ข) $i_p = 200 \text{ A}/\text{dm}^2$ (ค) $i_p = 300 \text{ A}/\text{dm}^2$ (ง) $i_{DC} = 20 \text{ A}/\text{dm}^2$ [17]



(ก)

รูปที่ 2.10 ความหยาบพื้นผิวจากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง (ก) ลักษณะผิวชิ้นงาน (ข) ความหยาบผิวชิ้นงานกับความถี่ [18]

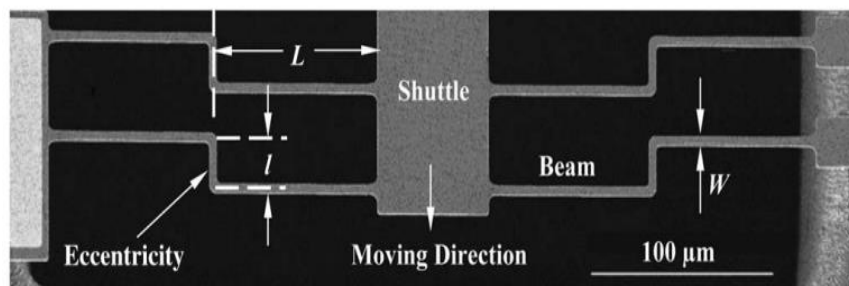
2.4 การควบคุมและการป้องกันสัญญาณ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาหลายวิธีการที่ใช้ในการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์ ซึ่งการควบคุมจะประกอบไปด้วยการป้องกันสัญญาณและการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาในส่วนของ การควบคุมและการป้องกันสัญญาณ

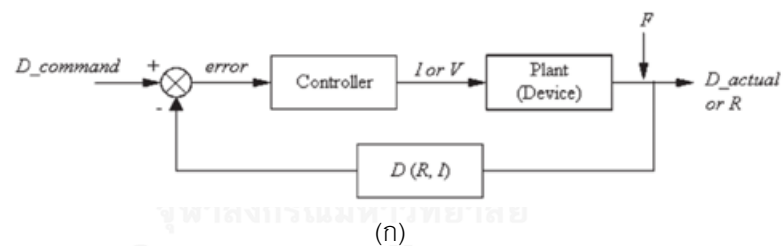
Jing Ouyang และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนมีรูปแบบ Z-shaped ดังรูปที่ 2.11 งานวิจัยนี้ได้ใช้การป้องกันสัญญาณด้วยตัวไมโครแอกชูเอเตอร์เองซึ่งสัญญาณที่ใช้ในการป้องกันคือสัญญาณความต้านทาน นอกจากนี้ในงานวิจัยได้กล่าวว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นมีความต้านทานอยู่ 2 ประเภทได้แก่ความต้านทานจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความต้านทานจากปรากฏการณ์ piezoresistivity ซึ่งพบว่าผลของอุณหภูมิมีผลมากกว่าจากปรากฏการณ์ piezoresistivity

ในการออกแบบการควบคุมจะใช้หลักการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับระยะในการเคลื่อนที่ ซึ่งในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะทำได้โดยการป้องกันกระแสไฟฟ้าไปที่ไมโครแอกชูเอเตอร์แล้วตรวจสอบระยะโดยใช้ SEM ในภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องผลของความสัมพัทธ์จะมีค่า

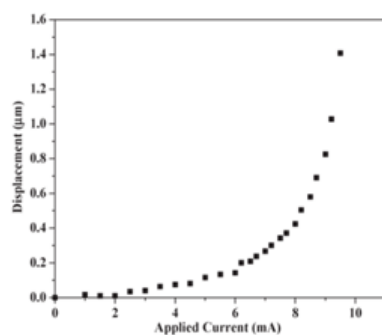
เป็นดังรูปที่ 2.12ข ในส่วนของการป้อนกลับสัญญาณได้ใช้หลักการค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป เนื่องจากผลของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถทราบได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปผลที่ได้ดังรูปที่ 2.12ค หลังจากได้ใช้กลยุทธ์การควบคุมโดยใช้การป้อนกลับสัญญาณด้วยค่าความต้านทานโดยสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.12ก จากรูปดังกล่าวหลักการที่ใช้ในการควบคุมคือตัวควบคุมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อที่ทำให้ระยะการเคลื่อนที่ไปถึงโดยจะคิดผลของการรบกวนด้วย ซึ่งผลจากการควบคุมตำแหน่งไมโครแอกซ์เอเตอร์พบว่าความแม่นยำของตำแหน่งไมโครแอกซ์เอเตอร์ความคาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10%



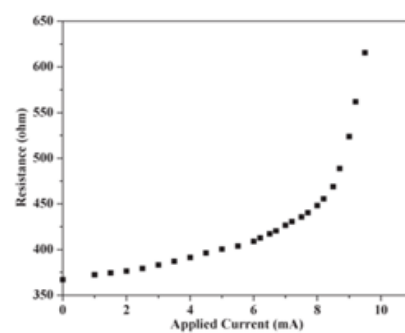
รูปที่ 2.11 ลักษณะไมโครแอกซ์เอเตอร์ z-shaped [20]



(ก)



(ข)



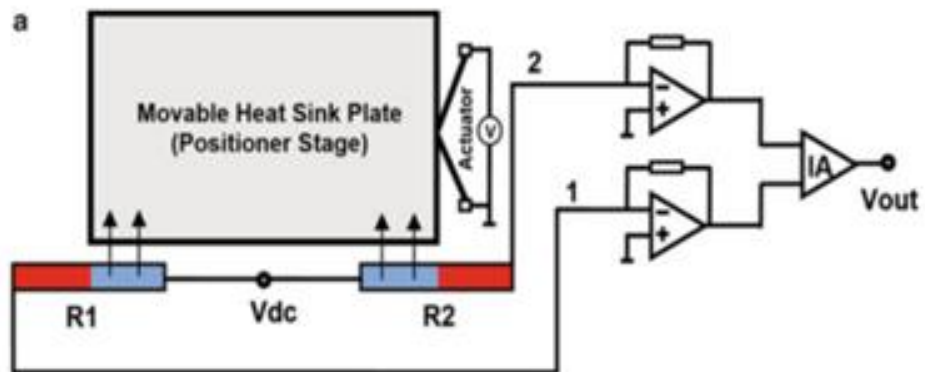
(ค)

รูปที่ 2.12 การควบคุมไมโครแอกซ์เอเตอร์ (ก) บล็อกไดอะแกรมการควบคุม (ข) ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปกับระยะเคลื่อนที่ (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนไปกับกระแสไฟฟ้า [20]

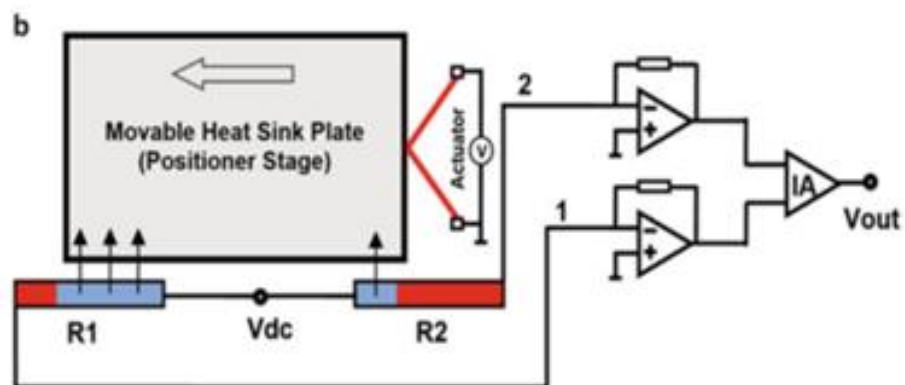
Y.Zhu และคณะ[19] ได้ศึกษาการควบคุมและการป้อนกลับสัญญาณไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์เชิงความร้อนลักษณะ V-shaped โดยวิธีการป้อนกลับสัญญาณโดยใช้ตัวต้านทาน 2 ตัว และวัตถุระบุตำแหน่ง (Positioner Stage) ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า การติดตั้งให้ขอบของวัตถุระบุตำแหน่งทั้งสองฝั่งต้องอยู่ที่ระยะครึ่งหนึ่งของ ตัวต้านทานทั้ง 2 ตัว ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะเริ่มต้นวัตถุระบุตำแหน่งจะอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงในลักษณะดังรูปที่ 2.13ก หลักการทำงานของการระบุตำแหน่งแบบนี้คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ตัวต้านทานทั้ง 2 ตัวเกิดอุณหภูมิขึ้นค่าหนึ่งและเมื่อไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์ทำงานจะทำให้ตัวระบุตำแหน่งเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมซึ่งจากเหตุนี้จะทำให้อุณหภูมิของตัวต้านทานแต่ละตัวมีค่าไม่เท่ากันเป็นทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานแต่ละตัวไม่เท่ากันเช่นกัน ดังรูปที่ 2.13ข

ในส่วนของการควบคุมไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์ได้ศึกษาการควบคุม โดยมีรูปแบบ การควบคุมแบบเปิด (Open-Loop Control) และ การควบคุมแบบปิด (Close-Loop Control) ซึ่งการควบคุมแบบเปิดจะมีบล็อกไดอะแกรมการควบคุมดังรูปที่ 2.14ก มีหลักการทำงานเมื่อส่งสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงจะนำสัญญาณไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางสถิติระหว่างสัญญาณในการทำงาน กับระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณในการทำงาน ให้กับไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์จาก ทำการวัดตำแหน่งด้วยเซนเซอร์ (Sensor Output) ซึ่งมีค่าสัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากนั้นไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางสถิติซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าจากเซนเซอร์กับระยะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.14ค เพื่อประมาณค่าระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์อีกที ในการทดสอบการควบคุมแบบเปิดได้ส่งสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงเป็นขั้นบันไดตั้งแต่ 2.5 ไมโครเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร โดยจะเพิ่มค่าสัญญาณทีละ 2.5 ไมโครเมตร ทุกเวลา 0.05 วินาที เป็นเวลารวมทั้งหมด 0.2 วินาที จากการทดสอบนี้พบว่า การควบคุมแบบเปิดมี ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว(steady-state error) มากที่สุดอยู่ที่ 9.6% ดังรูปที่ 2.14ข

การควบคุมแบบปิดจะมีบล็อกไดอะแกรมการควบคุมดังรูปที่ 2.15ก ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับการควบคุมแบบเปิด เพียงแต่เพิ่มในส่วนของ PI-controller และมีการป้อนกลับสัญญาณเพื่อลดค่าความผิดพลาด และ เพิ่มความเร็วในการทำงานของไมโครแอกซ์ฮอเรียเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้เลือกค่า $K_p = 1.3$ และ $K_i = 700$ และได้ทดสอบด้วยเงื่อนไขเดียวกับการควบคุมแบบเปิด พบว่าระบบทำงานได้เร็วขึ้น และมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวมากที่สุดอยู่ที่ 1% ดังรูปที่ 2.15ข ในขณะที่การควบคุมแบบเปิดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยจะอยู่ที่ 1,180 นาโนเมตร

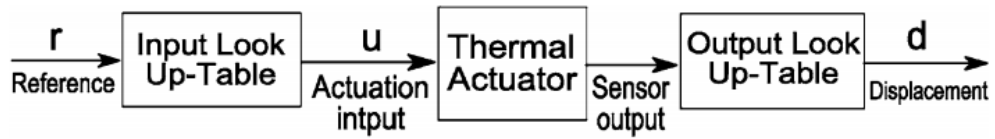


(ก)

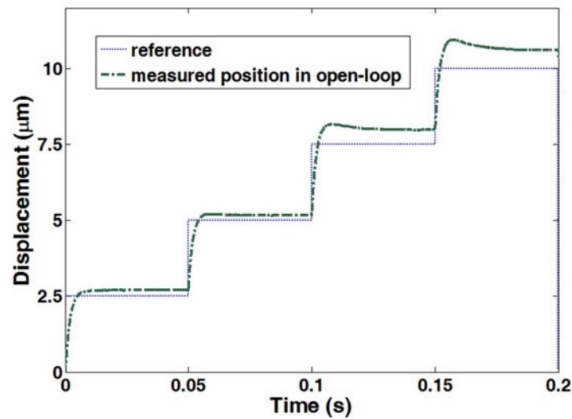


(ข)

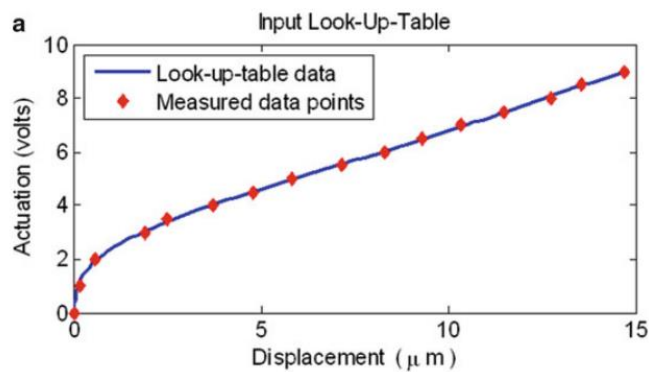
รูปที่ 2.13 หลักการทำงาน (ก) ค่าความต้านทานทั้งสองเท่ากัน (ข) อณูหภูมิของตัวต้านทานไม่เท่ากันซึ่งทำให้ความต้านทานทั้งสองไม่เท่ากันด้วย [19]



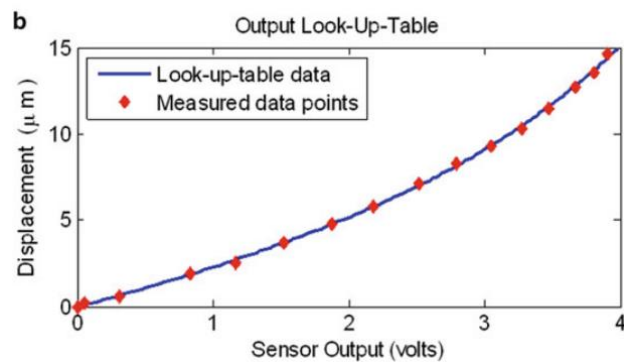
(ก)



(ข)

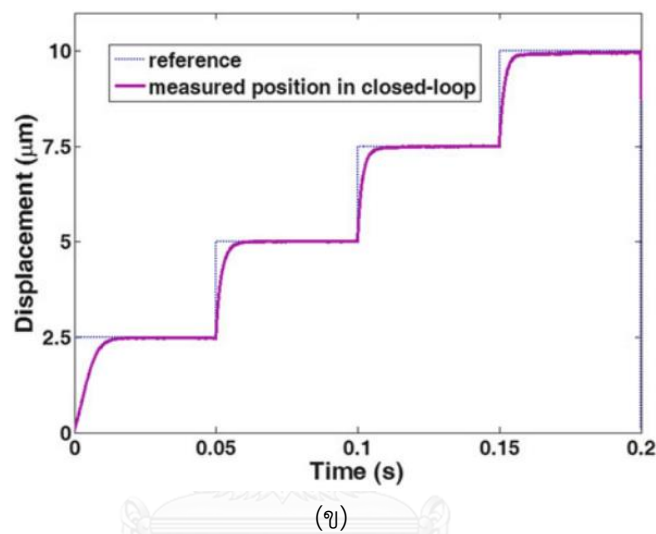
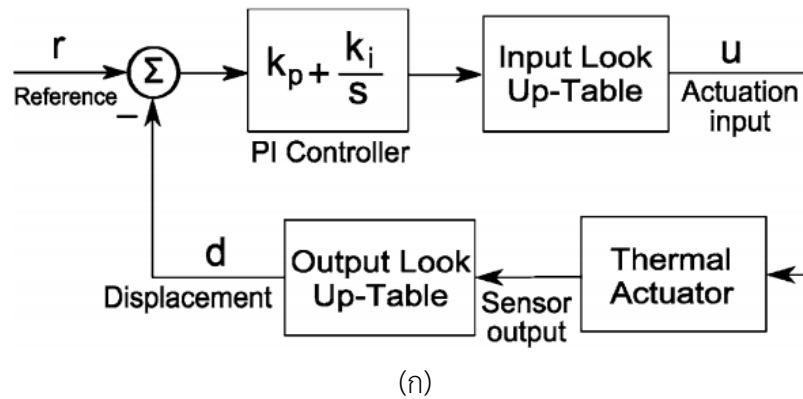


(ค)



(ง)

รูปที่ 2.14 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ การควบคุมแบบเปิด (ข) ผลการตอบสนองเชิงเวลาของไมโครแอกชูเอเตอร์ผ่านการควบคุมแบบเปิด (ค) ความสัมพันธ์ของตำแหน่งอ้างอิงกับระยะที่ไมโครแอกชูเอเตอร์เคลื่อนที่ (ง) ความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่กับค่าจากเซ็นเซอร์ [19]



รูปที่ 2.15 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการควบคุมแบบปิด (ข) ผลการตอบสนองเชิงเวลาของไมโครแอกชูเอเตอร์จากการควบคุมแบบปิด [19]

2.5 สรุป

ไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน เป็นไมโครแอกชูเอเตอร์ซึ่งทำงานได้โดยการจ่ายความร้อนแล้วทำให้โครงสร้างเกิดการขยายตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนซึ่งได้นำรูปแบบที่สร้างโดย อิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ มาใช้งานซึ่งไมโครแอกชูเอเตอร์ดังกล่าวได้เลือกใช้ นิกเกิล เป็นวัสดุ เนื่องจาก เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและนำไฟฟ้าได้ดี ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการสร้างชิ้นงานแบบ LIGA ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูกพร้อมทั้งได้ผลลัพธ์แม่นยำ ในกระบวนการดังกล่าวมีขั้นตอน การขึ้นรูปโลหะด้วยกระบวนการชุบไฟฟ้าเคมี เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการขึ้นรูปร่างของชิ้นงาน

ในบทนี้ได้สรุปพื้นฐานในกระบวนการชุบไฟฟ้าเคมีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของขั้วแคโทด การคำนวณความหนาของชิ้นงาน ในการชุบไฟฟ้า ลักษณะการถ่ายโอนมวลสารที่

เกิดขึ้นในการซุบไฟฟ้า ได้นำทฤษฎีของฟิสิกส์มาอธิบายสาเหตุของพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นในการซุบไฟฟ้าเคมี ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในการซุบไฟฟ้า เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าหมดไปและถ้าบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้างดงกล่าวเกิดไม่เท่ากันจะส่งผลให้ระยะเวลาแพร่ไม่เท่ากันซึ่งบริเวณที่มีระยะเวลาแพร่น้อยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เร็วกว่าบริเวณที่มีระยะเวลาแพร่ที่มากซึ่งทำให้แต่ละจุดเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่เท่ากันทำให้ ผิวไม่มีความสม่ำเสมอกัน อย่างไรก็ตามมีการศึกษาที่พบว่า การจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยมในการซุบไฟฟ้าเคมีสามารถคืนความเข้มข้นที่บริเวณผิวได้ ซึ่งจะสามารถรักษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในเท่ากันทุกจุดของผิวได้ ในส่วนของการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้ทำการศึกษาลักษณะของวิธีการป้องกันสัญญาณและลักษณะการควบคุม ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปเนื่องจากผลของอุณหภูมิมากกว่าปรากฏการณ์ Piezoresistive ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณป้องกันจากระยะเวลาเคลื่อนที่กับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปได้ นอกจากนี้พบว่าการควบคุมแบบปิดทำให้ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่ต่ำ

บทที่ 3 การสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการสร้างชิ้นงานไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยจะกล่าวถึง วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานซึ่งชนิดวัสดุที่ใช้ในการสร้างใช้เป็นนิกเกิลเนื่องจากสามารถทนทานต่อสภาวะต่างๆ ได้ดีมีความสามารถในการยืดหดและราคาถูกรวมทั้งทำการผลิตชิ้นงานโดยใช้วิธี LIGA ซึ่งประกอบไปด้วย การเตรียมแผ่นสแตนเลส การเคลือบฟิล์ม การฉายแสง และ การชุบโลหะ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตชิ้นงาน

- แผ่นสแตนเลสความหนา 2 mm ขนาด 4 cm x 10 cm
- กระดาษทรายเบอร์ 150,600,800 และ 1200
- แผ่นฟิล์มฉายแสง
- แผ่นลวดลายไมโครแอกซ์เวเตอร์สำหรับฉายแสง
- แท่งนิกเกิล 99%
- กระดาษลิตมัสสำหรับวัด PH
- บีกเกอร์ 400 ml
- แม่เหล็กสำหรับกวนสาร

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน

- เตาทำความร้อน
- ออสซิลโลสโคป
- เครื่องเคลือบ
- พาวเวอร์แอมพลิฟายเออร์
- เทอร์โมคัปเปิล
- เครื่องกำเนิดสัญญาณ
- หลอดยวี่สำหรับฉายแสง

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานในการผลิตชิ้นงาน

- สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 4 g/l
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 g/l
- สารละลายนิกเกิลเงาซึ่งมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของสารละลายนิกเกิล

ชนิดสาร	ปริมาณ (g/l)
Nickel Sulfate (g/l)	270
Nickel Chloride (g/l)	75
Boric Acid (g/l)	50

3.2 การสร้างผลิตภัณฑ์

- **การเตรียมแผ่นแผ่นสแตนเลส** : ทำการขัดผิวแผ่นสแตนเลส ด้วยกระดาษทราย พร้อมทั้งเปิดน้ำเบาๆ ทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายตามลำดับเบอร์ 150,600,800 และ 1200 โดยขัดผิวให้เป็นแนวทางเดียวกันจนกระทั่งแผ่นสแตนเลสเงา จากล้างด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง
- **การเคลือบแผ่นฟิล์มฉายแสงบนผิวชิ้นงาน** : แผ่นฟิล์มฉายแสงมีสองด้านคือด้านที่เงาและด้านที่ไม่เงา นำด้านที่ไม่เงามาติดกับแผ่นสแตนเลสในการติดฟิล์มฉายแสงโดยไม่ให้เกิดฟองอากาศ จากนั้นนำไปเข้าเครื่องรีดซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100 องศา เป็นจำนวน 4 รอบ โดยหลังจากรีดฟิล์มเสร็จแล้ว 1 รอบจะต้องพักสแตนเลสเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อให้แผ่นฟิล์มฉายแสงเกาะตัวอยู่กับแผ่นสแตนเลสได้แน่นขึ้น หลังจากลอกพลาสติกที่ติดอยู่ที่ด้านเงาของฟิล์มฉายแสงแล้วนำแผ่นลวดลายไมโครแอคซัวเอตรในรูปแบบที่ 3.1x ซึ่งมีขนาดของแอคซัวเอเตอร์แต่ละตัวดังรูปที่ 3.1k ไปแปะที่แผ่นสแตนเลส โดยตำแหน่งที่แปะต้องอยู่ตรงกลางมากที่สุดเพื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากระจายตัวได้สม่ำเสมอ
- **การฉายแสงและกัดส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงออกไป** : นำแผ่นสแตนเลสหลังจากเคลือบแผ่นฟิล์มฉายแสงไปวางในกล่องสำหรับเตรียมฉายแสงซึ่งภายในกล่องประกอบไปด้วยหลอดยูวี 10 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ทำการวางแผ่นสแตนเลส ให้ไปแนวทางเดียวกับหลอดไฟเพื่อให้แสงฉายได้ทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส นำวัตถุมาทับเพื่อให้แผ่นสแตนเลสแนบสนิทกับกระจกของกล่องยูวีจากเปิดสวิตช์เพื่อฉายแสงทำการฉายแสงเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ฟิล์มฉายแสงในส่วนที่โดนแสงแข็งกว่าส่วนที่ไม่โดนแสง ทั้งนี้เพื่อให้เวลาที่ทำการกัดพิมพ์จะทำให้ขอบของพิมพ์ไม่เสียหาย หลังจากที่ได้ฉายแสงเสร็จแล้วทำการลอกแผ่นลวดลายออกไปจะได้อแผ่นสแตนเลสนำไปแช่สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 10 นาที จนกระทั่งไม่มีคราบฟิล์ม

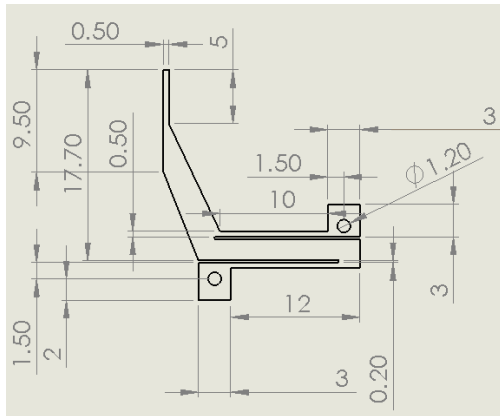
อยู่บริเวณพิมพ์แล้วจะได้แผ่นสแตนเลสซึ่งเป็นแม่พิมพ์สำหรับนำไปใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน จากนั้นมาล้างน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง

- **การปิดบริเวณที่ไม่ใช่ลวดลายและฟิล์ม** : นำเทปใสมาปิดบริเวณที่ไม่มีฟิล์มเกาะ และบริเวณที่ไม่ใช่ลวดลายทั้งด้านข้างและด้านหลังของแผ่นสแตนเลสเพื่อให้พื้นที่ในการชุบขึ้นรูปอยู่แค่บริเวณลวดลายจากการฉายแสง

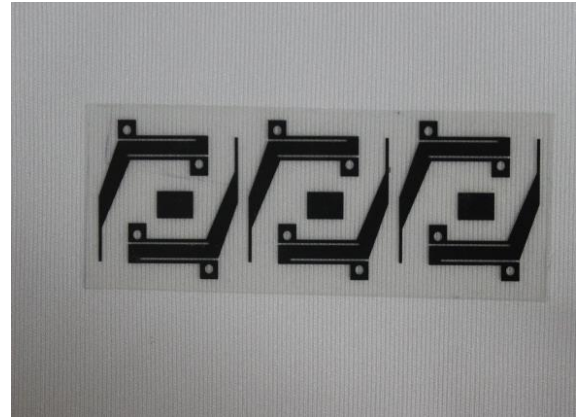
3.3 กระบวนการชุบขึ้นรูปชิ้นงานด้วยไฟฟ้าเคมี

หลังจากทำการเตรียมแผ่นสแตนเลสเรียบร้อยแล้ว ซึ่งอยู่ในรูปแบบแม่พิมพ์ดังรูปที่ 3.1 มาชุบขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยในการทดลองจะแบ่งเป็นการทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงและไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการชุบไฟฟ้าจะให้ขั้วไฟฟ้าแคโทด เป็นแผ่นสแตนเลสที่มีลวดลาย ส่วนขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเป็นแท่งนิกเกิล

- **การชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงและไฟฟ้ากระแสตรง** : ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณ , พาวเวอร์แอมพลิฟายเออร์ เพื่อปรับให้เป็นวงจรคงที่กระแส และ oscilloscope สำหรับการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากตัวต้านทานวัดกระแส (shunt resistor) ซึ่งการทดลองสามารถตั้งค่าการทดลองได้ดังรูปที่ 3.2 ในการทดลองกระแสไฟฟ้าแบบช่วง จะตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง และจะปรับความถี่ที่ 10 50 200 และ 500 Hz และไฟฟ้ากระแสตรง ดังตารางที่ 3.2
- **การคำนวณระยะเวลาในการชุบ** : ระยะเวลาในการชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง จะใช้ตัวแปรกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยมาคำนวณโดยใช้กฎฟาราเดย์ความหนาของชิ้นงาน สมการที่ (2.7) ซึ่งค่าพารามิเตอร์อื่นๆนอกจากค่าพารามิเตอร์ของกระแสไฟฟ้าแบบช่วงจะเป็นดังตารางที่ 3.3
- **การกัดชิ้นงานออกจากแผ่นสแตนเลส** : หลังจากทำการชุบจะทำการนำชิ้นงานออกจากแผ่นสแตนเลสโดยนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อกำจัดฟิล์มออก ระยะเวลาในการแช่ใช้ระยะเวลาประมาณครึ่งชั่วโมงเพื่อให้ชิ้นงานสามารถหลุดออกมาได้ง่าย ซึ่งจะได้ชิ้นงานออกมาเป็นลักษณะดังรูปที่ 3.1ง



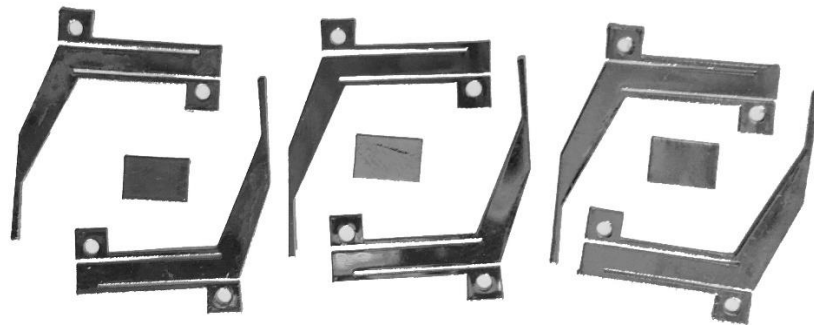
(ก)



(ข)

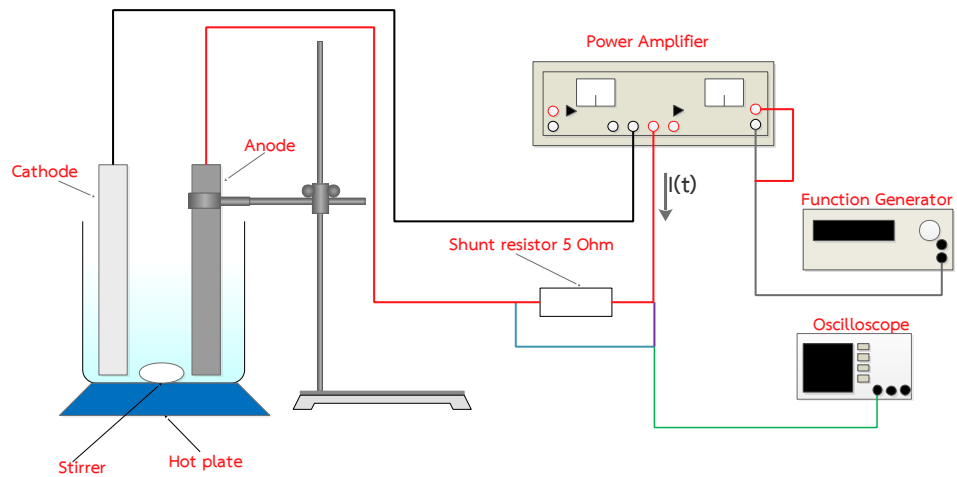


(ค)



(ง)

รูปที่ 3.1 (ก) ขนาดของไมโครแอกชูเอเตอร์ (ข) แผ่นลวดลายสำหรับฉายแสง (ค) แผ่นลวดลายที่แปะบน substrate (ง) ลักษณะชิ้นงานไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนหลังจากกัดฟิล์มออก



รูปที่ 3.2 การตั้งค่าการทดลองการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์สำหรับการชุบกระแสไฟฟ้า		จุดประสงค์
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (A/dm^2)	67.5	ช่วงกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง DC ซึ่งทำให้ผิวมีสภาพดี
ดิวตี้ไซเคิล	50	เพื่อหาแนวโน้มค่า Duty Cycle ที่ทำให้ผิวหยาบน้อยที่สุด [17]
ความถี่ของของกระแสไฟฟ้าแบบช่วง (Hz)	10,50,200,500,DC	เพื่อหาแนวโน้มค่าความถี่ที่ทำให้ผิวหยาบน้อยที่สุด[17]

ตารางที่ 3.3 ค่าเวลาที่ใช้สำหรับการชุบ ของ Pulse แต่ละตัว

พื้นที่ในการชุบ	0.059183	dm^2
ความหนา	100	μm
จำนวนอิเล็กตรอน(nickel)	2	
ความหนาแน่น (nickel)	8908	g/dm^3
ค่าคงที่ของฟาราเดย์	96485	C
ระยะเวลาในการชุบ	2 ชั่วโมง 24 นาที	

บทที่ 4 คุณสมบัติ निकเกิล

4.1 ความหยาบผิวของชิ้นงาน

การทดสอบความหยาบผิวทำการวัดชิ้นงานที่สร้างจากการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าทั้ง 3 กรณีได้แก่ ชิ้นงานที่ผลิตจากการชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz กับ 50 Hz และ ชิ้นงานที่ผลิตจากการชุบไฟฟ้ากระแสตรง โดยเป็นกรณีละ 6 ชิ้นซึ่งวิธีการวัดความหยาบผิวได้ทำการใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสยี่ห้อ Alicona รุ่น Infinitefocus SL ซึ่งเป็นการใช้แสงขาวมาช่วยวัดความหยาบผิวและมีความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 20 nm จากเมื่อทำการถ่ายภาพของแต่ละพื้นที่แล้ว ทำการลากเส้นเพื่อหา พารามิเตอร์ของความหยาบผิว 7 เส้น ให้ทั่วบริเวณของพื้นที่ซึ่งในการลากจะเลี้ยวบริเวณหลุมลึก อันเนื่องมาจากการปรับแสงเข้าไม่ถึงทำให้บริเวณดังกล่าวเพี้ยนไป พารามิเตอร์ในการวัดความหยาบผิวที่นำมาใช้พิจารณาในการผลการทดลองมี 3 พารามิเตอร์ซึ่งมีนิยามดังนี้

- ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a): เป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad 4.1$$

- ค่าความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (R_q): เป็นค่าความหยาบผิวโดยดูลักษณะความแปรปรวนของความหยาบผิว ซึ่งพารามิเตอร์ตัวนี้สามารถบอกลักษณะโปรไฟล์ความหยาบผิวได้ดีกว่า R_a ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1ก จะเห็นได้ว่า ทั้งสามรูปมีค่า R_a แต่สิ่งที่แตกต่างกัน เช่นในรูปด้าน ซ้ายจะเห็นได้ว่า มีบริเวณที่ขรุขระน้อยเยาะกว่าบริเวณที่ขรุขระมากส่งผลให้ค่า R_q เท่ากัน ขณะเดียวกันเมื่อดูรูปด้านขวาพบว่าความหยาบผิวมีลักษณะเหมือนกันตลอดช่วงซึ่งจะส่งผลทำให้ R_q เท่ากันด้วยนอกจากนี้จากรูปที่ 4.1ข จะเห็นได้ว่า R_a เท่ากัน แต่ลักษณะผิวต่างกันโดยภาพข้างบนผิวจะเป็นลักษณะโค้งนูน และ ภาพด้านล่างเป็นแอ่งเว้าลงไป ดังนั้นพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ดูอีกตัวคือ R_z ในการคำนวณสามารถคำนวณได้โดย

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z(x)^2 dx} \quad 4.2$$

- ค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด (R_z): ค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่สูงที่สุด 5 จุด และ จุดที่ต่ำที่สุด 5 จุด ซึ่งรูปที่ 4.2 จะแสดงนิยามแต่ละจุด

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (z_{pi} + z_{vj}) \quad 4.3$$

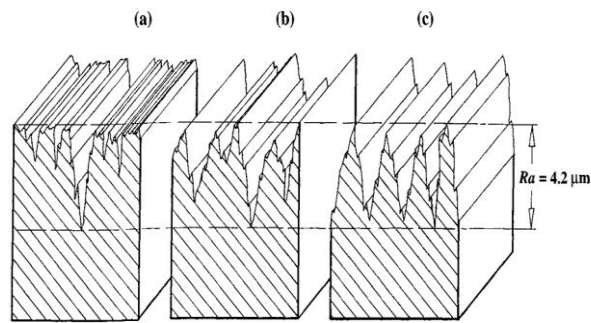
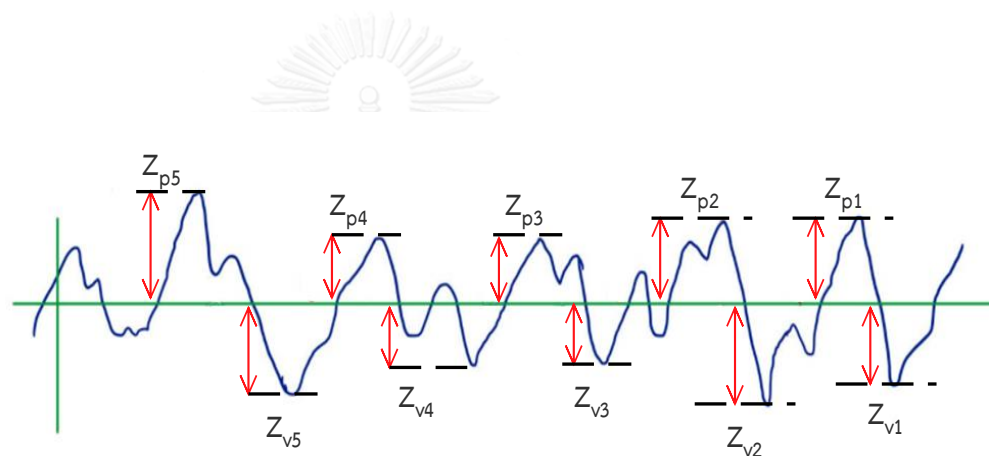


Figure 227. Differing profiles producing identical R_a values.

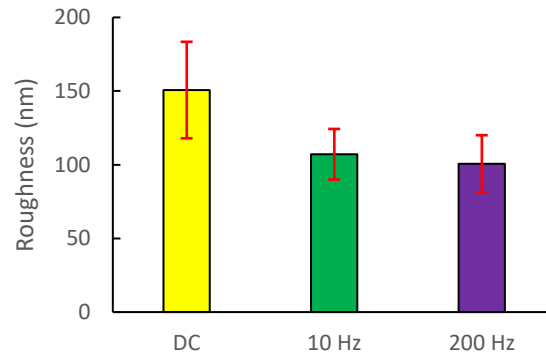
รูปที่ 4.1 ภาพลักษณะความหยาบผิวที่ R_a เท่ากันในมุมมอง 3 มิติ [20]



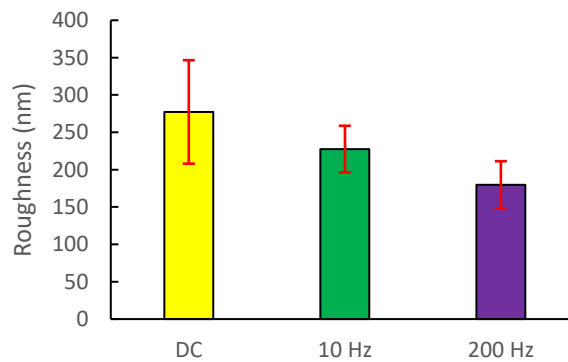
รูปที่ 4.2 ภาพแสดงนิยามของ R_z

จากรูปที่ 4.3ก พบว่า การชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ 10 Hz และ 200 Hz มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ใกล้เคียงกัน ซึ่งความหยาบน้อยกว่าการชุบไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ประมาณ 20% ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (Root-mean-square, R_q) จากรูปที่ 4.3ข พบว่า ชั้นที่ได้สร้างจากกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่มีความถี่ 200 Hz มีค่าที่ดีกว่าความถี่ 10 Hz ซึ่งพบว่า ชั้นงานที่สร้างจากความถี่ 200 Hz มีความหยาบผิวที่ดีกว่า 10 Hz อยู่ประมาณ 20 % และดีกว่าการชุบไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ 35% และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด (R_z) จากรูปที่ 4.3ค ซึ่งนิยามของพารามิเตอร์นี้คือค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่ลึกที่สุดกับจุดที่ตื้นที่สุด พบว่า การชุบไฟฟ้ากระแสแบบคลื่นรูปสี่เหลี่ยม ที่ความถี่ 200 Hz มี

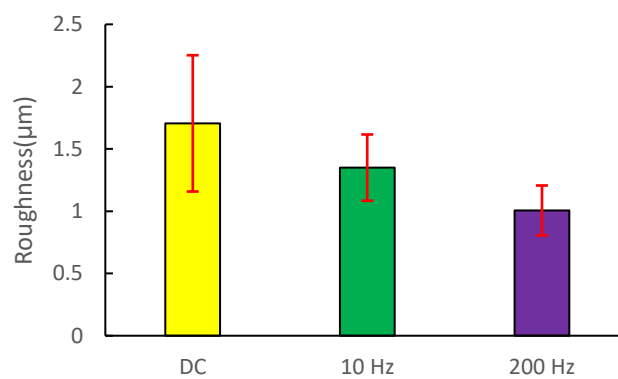
ความสูงเฉลี่ยที่ลดจากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ 70% และลดจาก 10 Hz อยู่ 35% ซึ่งในตารางที่ 4.1 ได้สรุปค่าพารามิเตอร์ความหยาบผิวแบบต่าง ๆ จากการชุบโลหะในแต่ละกรณีไว้



(ก)



(ข)



(ค)

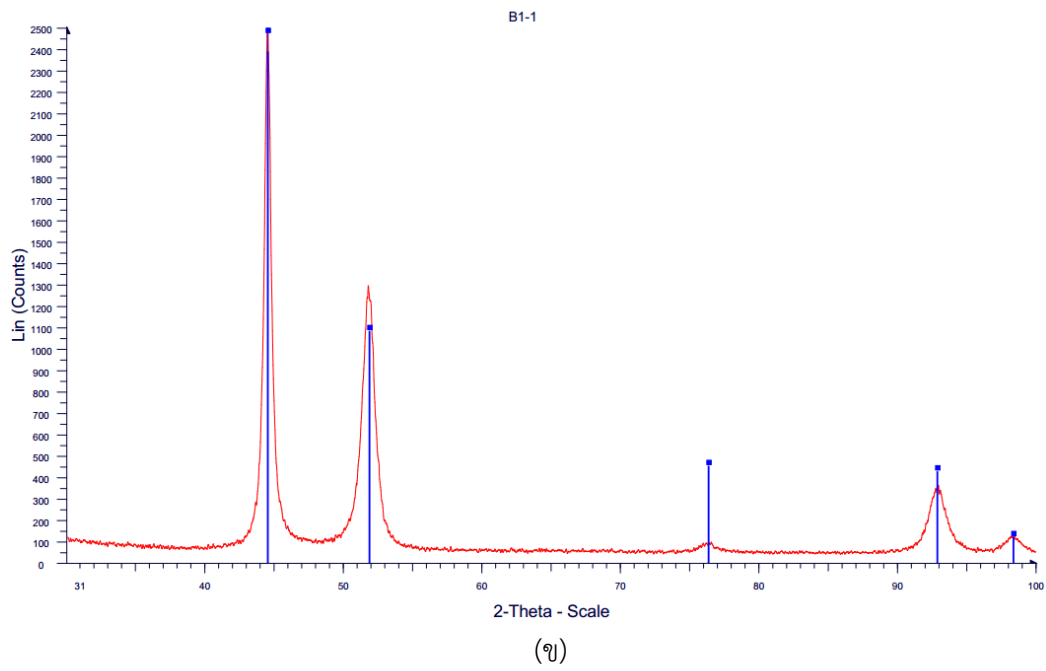
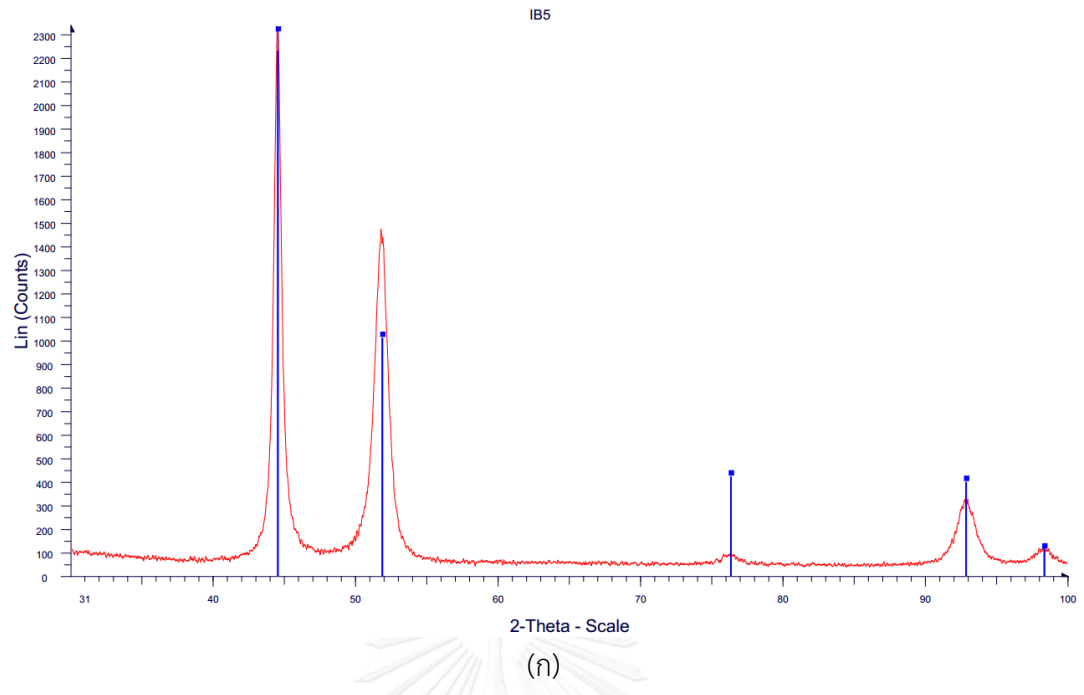
รูปที่ 4.3 ความหยาบผิว (ก) ความหยาบผิวเฉลี่ย, R_a (ข) ความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย, R_q (ค) ค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด, R_z

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลค่าความหยาบผิวโดยแยกตามพารามิเตอร์

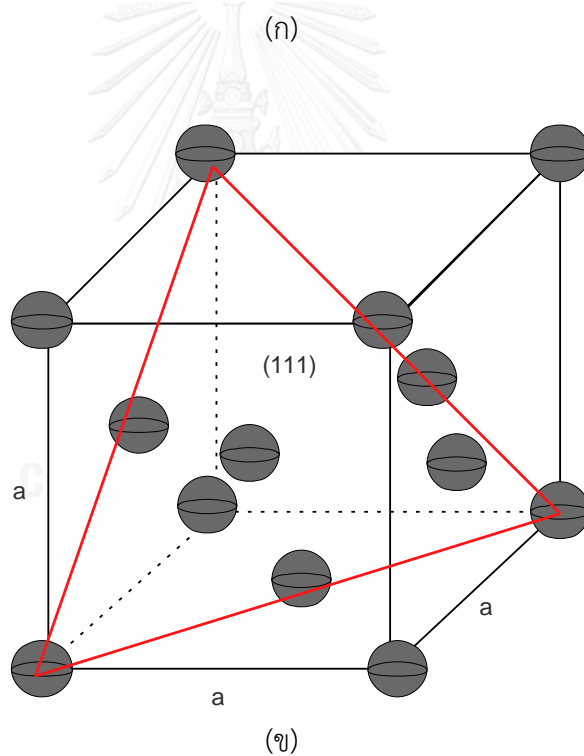
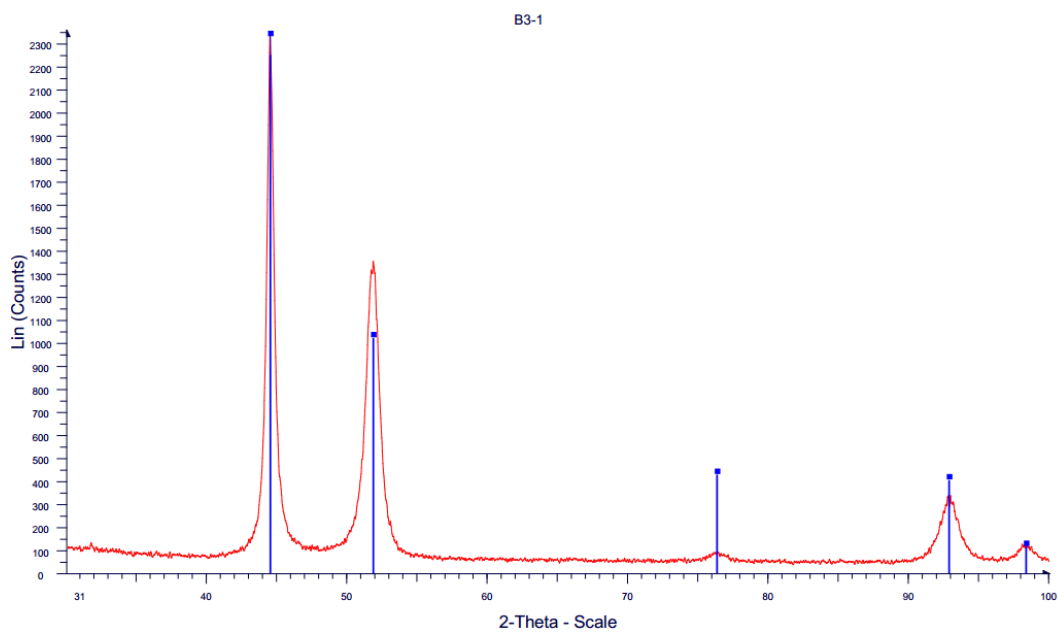
	R_a (nm)		R_q (nm)		R_z (μ m)	
	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
DC	150.69	32.75	277.27	69.24	1.70	0.55
10 Hz	107.12	17.18	227.51	31.23	1.35	0.27
200 Hz	100.66	19.40	179.75	31.57	1.01	0.20

4.2 โครงสร้างผลึกของชิ้นงาน

โครงสร้างผลึกเป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานในส่วนของความแข็ง ความทนทาน เป็นต้น ในการหาโครงสร้างผลึกจะวิเคราะห์โดยใช้ วิธีการ XRD (X-ray diffraction) ซึ่งชิ้นงานที่นำไปใช้วิเคราะห์ได้แก่ ชิ้นงานที่ชุบจากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz และ 200 Hz กับ ชิ้นงานจากการชุบโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ในการวิเคราะห์ชิ้นงานด้วย XRD จะทำการยิงรังสีเอ็กซ์ ประับมุมยั้งตั้งแต่ 30-100 องศาโดยทำการปรับมุมทีละ 0.023 องศา เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4ก-รูปที่ 4.4ข และรูปที่ 4.5ก เป็นภาพที่ได้จากวิธีการ XRD มีเส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นอ้างอิงสำหรับโครงสร้างผลึกในนิเกิล ในการวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างผลึก จะพิจารณาตำแหน่งมุมที่ทำให้พลังงานมีค่ามากที่สุด ซึ่งจากกราฟดังกล่าว ตำแหน่งมุมที่พลังงานมีค่ามากที่สุดคือ 44.5 องศา ซึ่งลักษณะของกราฟเป็นรูปแบบในทางเดียวกัน ซึ่งจะบ่งบอกว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นจากการชุบไม่ว่าจะเป็นจากไฟฟ้ากระแสตรง หรือ จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ต่าง ๆ ได้โครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน โดยโครงสร้างผลึกดังกล่าวเป็นโครงสร้างผลึกชนิดแบบ FCC (Face-Centered Cubic) มีดรรชนีมิลเลอร์ที่ (111) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.5ข โดยจะคำนวณ lattice constant (a) มีค่า 3.52 \AA



รูปที่ 4.4 ผล XRD (ก) ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (ข) ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz



รูปที่ 4.5 (ก) ผล XRD ชิ้นงานที่สร้างโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz (ข) ลักษณะของโครงสร้างผลึกและดรรชนีมิลเลอร์ของชิ้นงาน

4.3 ประสิทธิภาพของกระแส (Current Efficiency)

ประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์หนึ่งสำหรับการชี้วัดว่าระบบการชุบใช้พลังงานมากแค่ไหน ถ้ามีเยื่อหมายถึงมีการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสำหรับการชุบโลหะเพื่อที่จะให้น้ำหนักที่ต้องการ ในหัวข้อนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้กระแสไฟฟ้าของชิ้นงานไมโครแอกชูเอเตอร์โดยชิ้นงานจากการชุบไฟฟ้าที่นำมาทดสอบนี้จะมี 5 กรณีความถี่ได้แก่ไฟฟ้ากระแสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 10 50 200 และ 500 Hz กับไฟฟ้ากระแสตรง โดยในแต่ละกรณีสุ่มขึ้นมา 3 ชิ้นจากชิ้นงานไมโครแอกชูเอเตอร์ทั้งหมด 6 ชิ้นไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่ต้องการสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 4.2 โดยค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 และประสิทธิภาพการใช้กระแสสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 4.3 ผลการทดสอบ ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าของการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงและกระแสตรงเป็นดังตารางที่ 4.3 ซึ่งสามารถสรุปเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.6

การใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงมีประสิทธิภาพการใช้กระแสไฟฟ้าดีกว่าการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการชุบ แต่อย่างไรก็ตามในการเมื่อเทียบกันในด้านการใช้ความถี่ที่สูงและต่ำ ในการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 95-96% ในขณะที่เดียวกันการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง อยู่ที่ประมาณ 80 %

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณน้ำหนักที่ต้องการของไมโครแอกชูเอเตอร์

พื้นที่ของไมโครแอกชูเอเตอร์ , $A_{actuator}(cm^2)$	0.8664
ความหนาของไมโครแอกชูเอเตอร์ , $h_{actuator}(cm)$	0.01
ความหนาแน่นของนิกเกิล , $\rho_{Ni} (g/cm^2)$	8.91

$$m_{actuator} = \rho_{Ni} V_{actuator} \quad 4.1$$

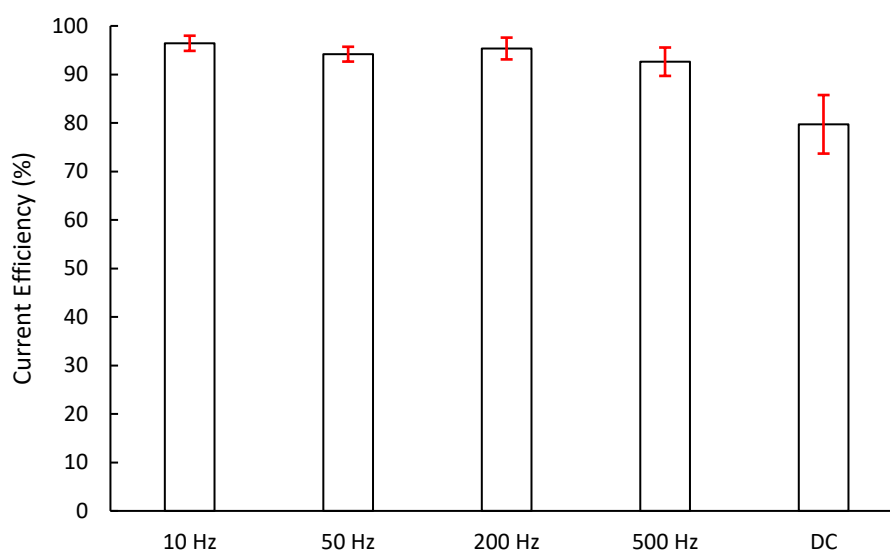
$$m_{actuator} = \rho_{Ni} (A_{actuator} h_{actuator}) \quad 4.2$$

$$m_{actuator_desire} = 0.07719 \text{ g}$$

$$Current \ Efficiency = \frac{m_{actuator}}{m_{actuator_desire}} \times 100 \quad 4.3$$

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพกระแสที่ได้จากการชุบโลหะ

ความถี่	น้ำหนัก(mg)					Current Efficiency	S.D CE	น้ำหนักที่ต้องการ (mg)
	1	2	3	เฉลี่ย	S.D			
10 Hz	75.7	73.3	7.43	7.44	0.12	96.42	1.56	7.72
50 Hz	7.37	7.14	7.3	7.27	0.12	94.18	1.53	
200 Hz	7.17	7.4	7.51	7.36	0.17	95.34	2.25	
500 Hz	7.0	7.04	7.41	7.15	0.23	92.62	2.93	
DC	6.19	5.67	6.6	6.15	0.47	79.71	6.04	



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลของ Current Efficiency จากการชุบโลหะ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุจากการชุบโลหะไฟฟ้าซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผล ระหว่างการชุบไฟฟ้ากระแสตรงกับการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วง ซึ่งการทดสอบมีอยู่ 3 อย่างได้แก่ ความหนาผิว, การตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธี XRD และการวัดประสิทธิภาพของ กระแสไฟฟ้า การตรวจสอบความหนาผิว ได้วัดพารามิเตอร์ความหนาผิว 3 ตัวได้แก่ ความหนา ผิวเฉลี่ย (R_p), ความหนาผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (R_q) และ ค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด (R_z) ซึ่ง จากผลการทดสอบวัดค่าความหนาผิว ค่าความหนาผิวเฉลี่ยของการชุบไฟฟ้าโดยการใช้ กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz และ 200 Hz มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่าการชุบไฟฟ้า

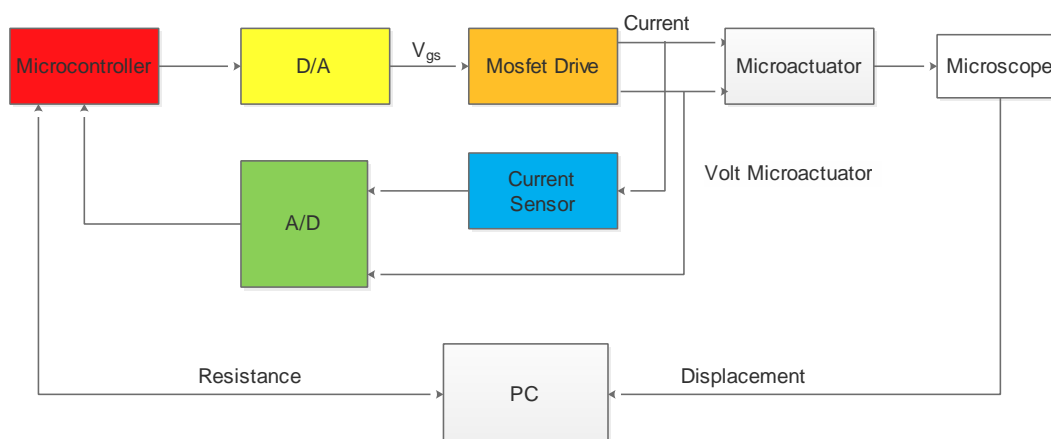
กระแสตรงอยู่ประมาณ 20% ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของผลึกที่ส่องกำลังสองเฉลี่ย ซึ่งงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz น้อยกว่าแบบการชุบไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 35% และ ความเรียบผิวดีกว่าการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงในช่วงความถี่ 10 Hz อยู่ 20% ในส่วนของ ค่าเฉลี่ยของความสูง 10 จุด (R_z) การชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ 200 Hz สามารถลดจากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงได้ประมาณ 70% และลดจากการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz อยู่ 35 % สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างผลึกได้ใช้กระบวนการ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบ (X-ray-diffraction) ซึ่งทำการยิงรังสีเอ็กซ์ปรับมุมตั้งตั้งแต่ 30-100 องศาโดยทำการปรับมุมทีละ 0.023 องศา ซึ่งได้ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรง การชุบไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz และ การชุบไฟฟ้ากระแสแบบช่วงความถี่ 200 Hz ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกพบว่าการชุบทั้ง 3 แบบได้โครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน โดยโครงสร้างผลึกดังกล่าวเป็นโครงสร้างผลึกชนิดแบบ FCC(Face-Centered Cubic) มีดรรชนี Miller ที่ (111) ซึ่งมีค่านวน lattice constant (a) มีค่า 3.524 Å ส่วนของการใช้ประสิทธิภาพกระแสไฟฟ้าได้ทำการวัดโดยการชั่งน้ำหนักซึ่งการใช้กระแสให้มีประสิทธิภาพส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรง การชุบไฟฟ้ากระแสแบบช่วงความถี่ 10 Hz, การชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 50 Hz, การชุบไฟฟ้ากระแสแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz, การชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 500 Hz ซึ่งพบว่า การชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงทั้ง 4 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 95-96% ในขณะเดียวกันการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ประมาณ 80 %

บทที่ 5 การหาคุณลักษณะและการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์

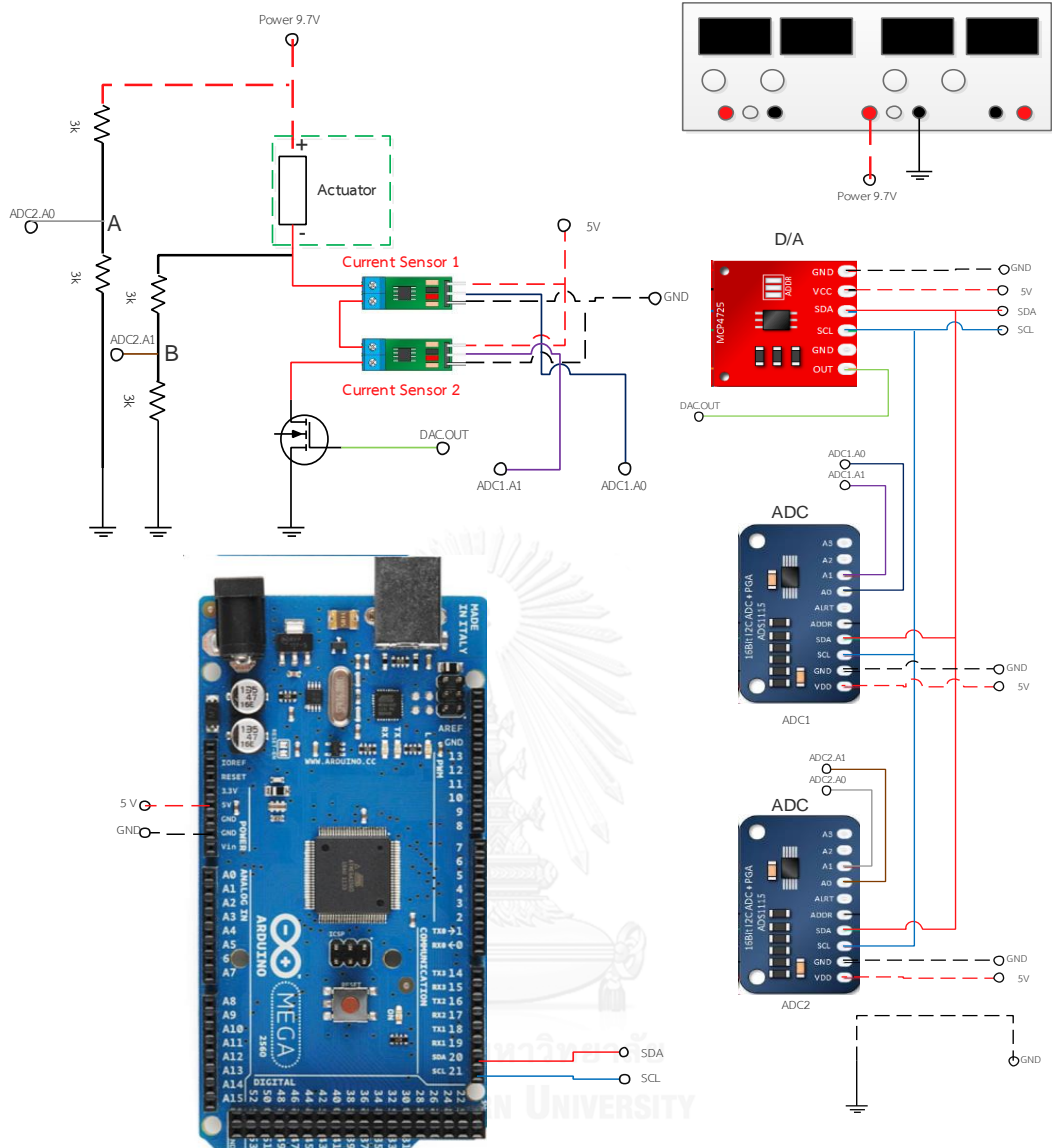
บทนี้จะกล่าวถึงการรูปแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับการทำงานและการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะใช้หลักการป้อนกลับสัญญาณโดยใช้หลักค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ในการดำเนินการเริ่มต้นด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของไมโครแอกซ์เวเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวที่นำมาใช้เพื่อตรวจจับสำหรับการควบคุม ในการทดสอบการควบคุมจะมีการทดสอบอยู่ 3 อย่างได้แก่ การทดสอบอัลกอริทึมของการควบคุม การทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนตำแหน่ง และการทดสอบกับสัญญาณรบกวน

5.1 รูปแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับการทำงาน

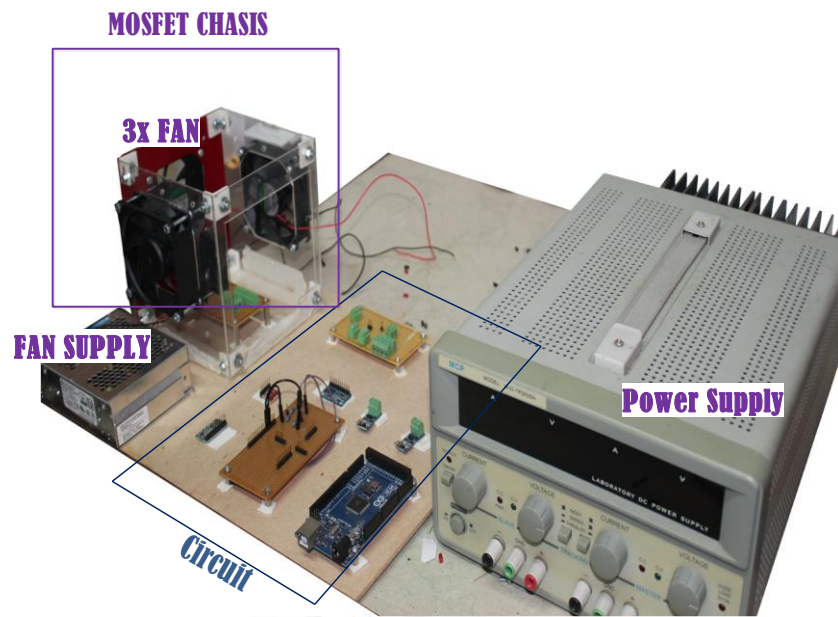
ในการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีหลักการทำงานแผนภาพรูปที่ 5.1 โดยให้คอมพิวเตอร์ส่งคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller)ส่งสัญญาณศักย์ไฟฟ้าไปให้ มอสเฟต(Mosfet) ในการขับกระแสไฟฟ้าและแปลงค่าทางไฟฟ้าเป็นความต้านทานโดยใช้วัดกระแสกับศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมไมโครแอกซ์เวเตอร์นำมาคำนวณความต้านทานโดยใช้กฎของโอห์ม เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไมโครแอกซ์เวเตอร์ทำให้โครงสร้างเกิดความร้อนและทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อน ส่งผลทำให้ปลายแขนของไมโครแอกซ์เวเตอร์เกิดการขยับตัวซึ่งชุดทดลองแสดงในรูปที่ 5.4 จากหลักการทำงานที่กล่าวไว้ทำให้ได้รูปแบบของวงจรไฟฟ้างดังรูปที่ 5.2 โดยอุปกรณ์สำหรับการทดลองสามารถดูได้จากรูปที่ 5.3ก ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนของ เซ็นเซอร์วัดกระแส วงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอล วงจรแปลงดิจิตอลเป็นอนาล็อกและไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงในรูปที่ 5.3ข อุปกรณ์และการวางมอสเฟตแสดงในรูปที่ 5.3ค



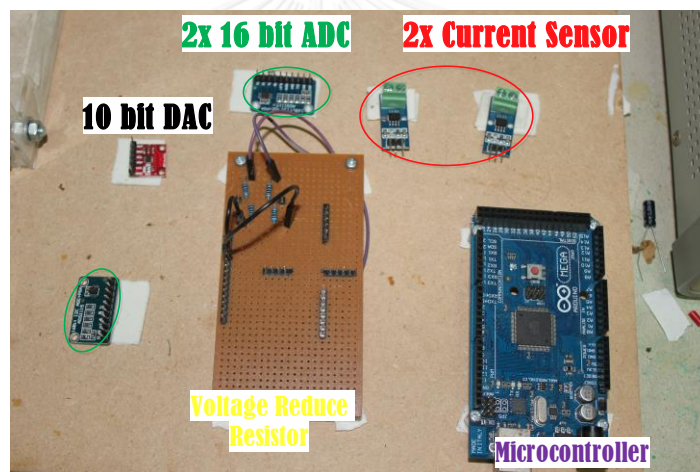
รูปที่ 5.1 แผนภาพการทำงานที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน



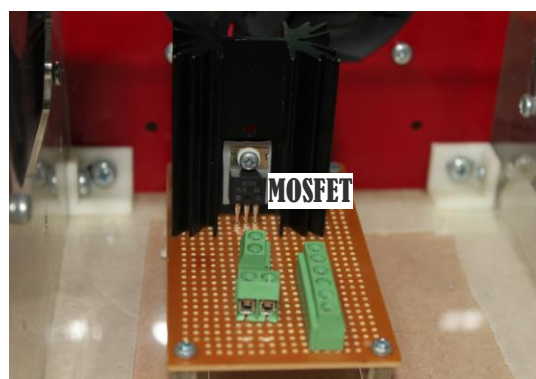
รูปที่ 5.2 การต่อวงจรที่ใช้สำหรับการควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)

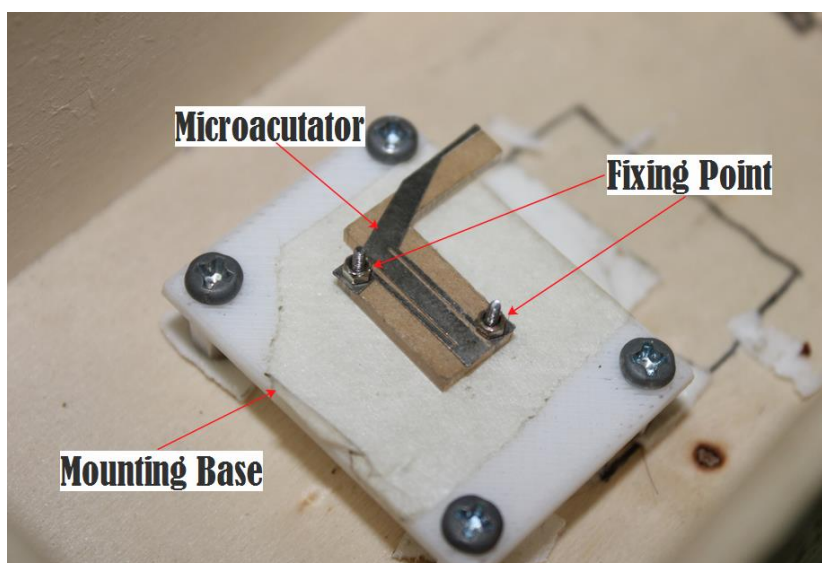


(ข)



(ค)

รูปที่ 5.3 (ก) อุปกรณ์สำหรับการทดสอบ การควบคุมไมโครแอสซเวเตอร์ (ข) อุปกรณ์ไฟฟ้า (ค) การติดตั้งมอสเฟส

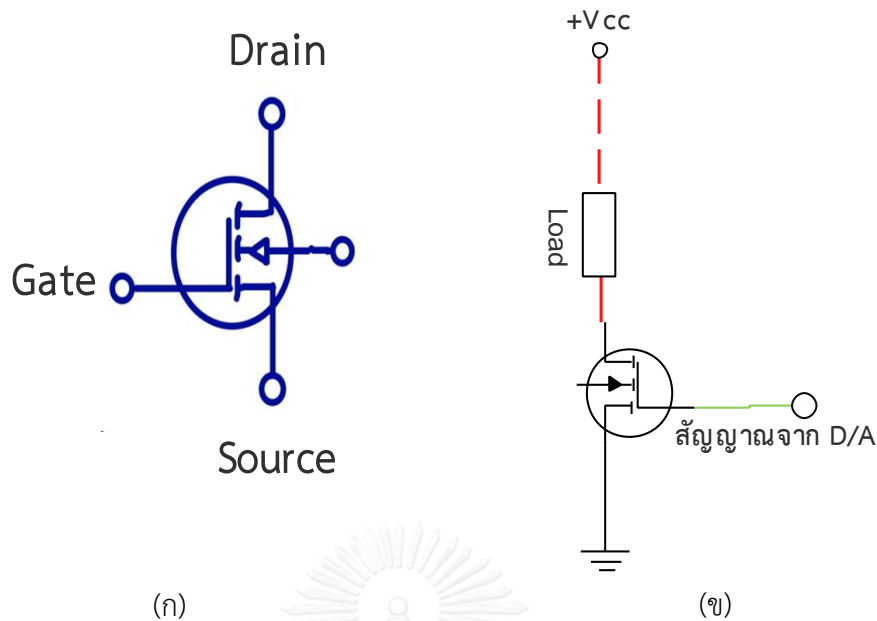


รูปที่ 5.4 ภาพแสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งอยู่ในกล่องเพื่อป้องกันจากสภาพแวดล้อมภายนอก

5.1.4 วงจรมอสเฟสสำหรับการขับกระแสไฟฟ้า

มอสเฟสเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์ ใช้สำหรับการควบคุมกระแสไฟฟ้าโดยการควบคุมสนามแม่เหล็กซึ่งในการควบคุมกระแสไฟฟ้าจะทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าที่ ขา Gate จากสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือก มอสเฟสชนิด N-Channel Enhancement ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังรูปที่ 5.5 หลักการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งโดยขา Drain เป็นต่อมาจากโหลด ส่วนขา Source ต่อไปที่ Ground ซึ่งเรียกการติดตั้งแบบนี้ว่า “Low Side Driver” ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งการติดตั้งแบบนี้จะมีข้อดีคือใช้ ศักย์ไฟฟ้าในการควบคุมกระแสได้ต่ำ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (D/A) สามารถจ่ายได้คือ 5 V ซึ่งจ่ายได้เพียงพอ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มอสเฟส รุ่น IRL510 ซึ่งมีระยะการทำงานของกระแสไฟฟ้าได้ 4 A ที่อุณหภูมิของมอสเฟส 100 °C ซึ่งตัวถังของมอสเฟสก็มีข้อจำกัดในด้านความร้อน ดังนั้นจึงต้องทำการติดฮีทซิงค์กับติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยระบายความร้อนไม่ให้มอสเฟสไหม้ ซึ่งในการคำนวณว่าจะใช้ฮีทซิงค์ขนาดไหนได้บอกไว้ใน ภาคผนวก ค



รูปที่ 5.5 (ก) สัญลักษณ์ของมอสเฟส ชนิด N-Channel Enhancement (ข) การติดตั้ง Mosfet แบบ Low Side Driver

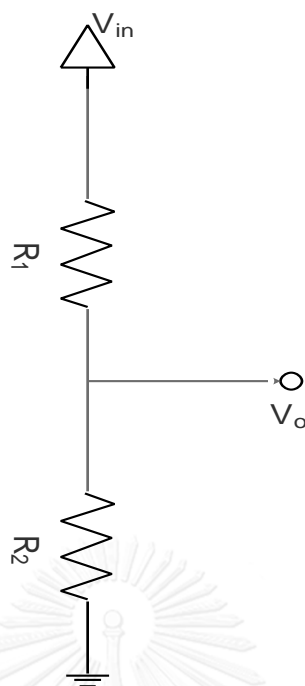
5.1.5 การวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมไมโครแอกซ์เวเตอร์

จากภาพแสดงการต่อวงจรไฟฟ้าจากรูปที่ 5.2 ในการวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมคือผลต่างระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าที่จุด “+” กับศักย์ไฟฟ้าที่จุด “-” ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวมีศักย์ไฟฟ้าที่เกินกว่าอุปกรณ์ แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) จะอ่านได้จึงต้องทำการลดทอนศักย์ไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ลักษณะวงจรดังรูปที่ 5.6 โดยมีสมการ 5.1 ตัวต้านทานที่ใช้สำหรับการนำมาลดทอนต้องมีค่ามากกว่า ความต้านทาน ของวงจรมอสเฟส และไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลไปทางวงจรสำหรับการลดทอนกระแสแทน ซึ่งศักย์ไฟฟ้า ณ ทั้งสองตำแหน่งจะเป็นไปตามสมการที่ 5.1 และสมการที่ 5.2 ซึ่งการลดทอนสัญญาณจะใช้ตัวต้านทาน 3000 Ω โดยในการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีนี้มีความไม่แน่นอนในการวัด ± 3 mV

$$V_O = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{IN} \quad 5.1$$

$$V_{ADC2.A0} = \frac{3k}{3k + 3k} V_+ \quad 5.2$$

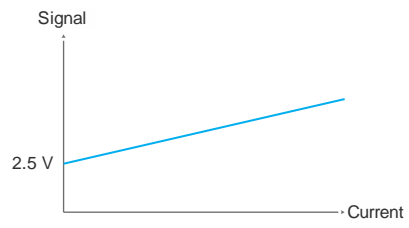
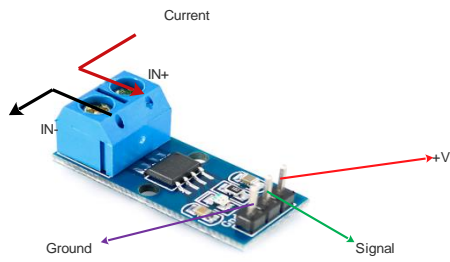
$$V_{ADC2.A1} = \frac{3k}{3k + 3k} V_- \quad 5.3$$



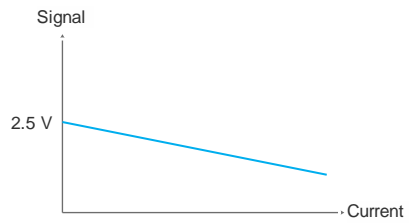
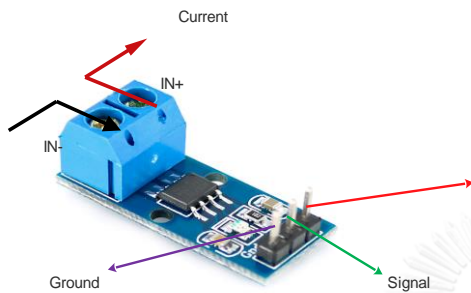
รูปที่ 5.6 ลักษณะวงจรแบ่งแรงดัน

5.1.6 การวัดกระแสไฟฟ้าในวงจร

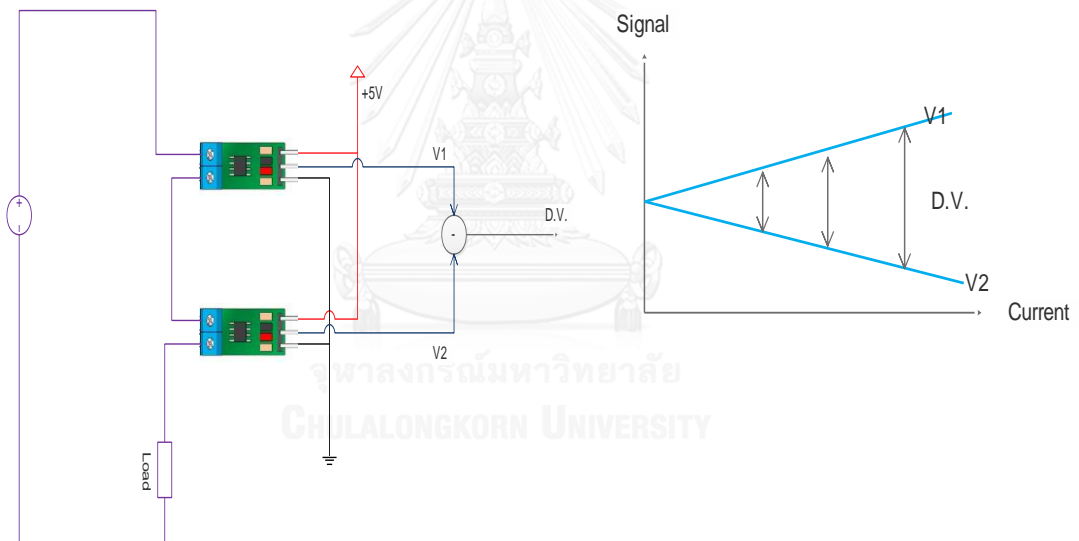
ในการวัดกระแสไฟฟ้าจะใช้โมดูลเซ็นเซอร์วัดกระแส ACS712 ซึ่งจะวัดกระแสได้ -5 A ถึง 5 A โดยเซ็นเซอร์ชนิดนี้เป็นหลักการทำงานแบบ Hall Effect คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณความต่างศักย์ออกมา โมดูลดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้าจะแปรผันกับสัญญาณที่ออกมาหรือแปรผกผันกันขึ้นอยู่กับทิศทางการป้อนกระแสซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.7ก กับรูปที่ 5.7ข ซึ่งรูปแบบการต่อเซ็นเซอร์วัดกระแส (Current Sensor) แบบใดแบบหนึ่งจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity) ที่ไม่เหมาะสมกับในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงเลือกการต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสแบบรูปที่ 5.7ค ซึ่งใช้สัญญาณแบบแตกต่าง (Differential) ในการวัดกระแส ซึ่งรูปแบบการต่อวงจรไฟฟ้างดังกล่าวมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดกระแสที่ $\pm 2\text{ mA}$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.7 (ก) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดย กระแสไฟฟ้าแปรผันกับสัญญาณศักย์ไฟฟ้า (ข) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดย กระแสไฟฟ้าแปรผกผันกับสัญญาณสัญญาณศักย์ไฟฟ้า (ค) การต่อเซ็นเซอร์วัดกระแสโดยใช้สัญญาณความแตกต่างในการวัดกระแส

5.1.7 การวัดค่าความต้านทาน

ในการอ่านค่าความต้านทาน จะใช้กฎของโอห์ม คือการวัดกระแสที่ไหลผ่านไมโครแอกซ์เวเตอร์และความต่างศักย์ตกคร่อมไมโครแอกซ์เวเตอร์ ซึ่งไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเปรียบเสมือนตัวต้านทานตัวหนึ่งมีลักษณะรูปที่ 5.8 ซึ่งคำนวณได้โดยสมการ 5.4

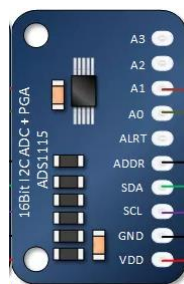
$$R_a = \frac{V_a}{I_a} \quad 5.4$$



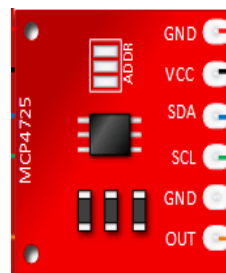
รูปที่ 5.8 ภาพแสดงตัวแทนไมโครแอกซ์เวเตอร์ เป็นโหลดความต้านทาน

5.1.8 การรับสัญญาณและส่งสัญญาณเพื่อทำงาน

ในการรับค่าสัญญาณของไมโครแอกซ์เวเตอร์ ทั้งสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดกระแสและ สัญญาณศักย์ไฟฟ้าจะใช้ไมโครแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล รุ่น ads1115 ซึ่งมีความละเอียดถึง 16 บิตและมีลักษณะดังรูปที่ 5.9ก เนื่องจากถ้าใช้ไมโครแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์มีความละเอียดที่น้อยกว่าทำให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงระดับ 1 mV ได้ ซึ่งไมโครดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน โปรโตคอล I2C สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครดังกล่าวสองตัวเนื่องจากว่าเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ สำหรับการส่งสัญญาณเพื่อไปสั่ง มอสเฟสจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการสั่ง เนื่องจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่มีไมโครแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกในตัว ดังนั้นจึงต้องนำไมโครภายนอกมาใช้ งานในงานวิจัยนี้ได้เลือกไมโครรุ่น MCP4725 มีลักษณะดังรูปที่ 5.9ข ความละเอียดของไมโครนี้มีถึง 12 บิต หรือเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าสำหรับการทำงานคือ 5V จะสามารถส่งสัญญาณได้ละเอียดถึง 1.2 mV ในการเชื่อมต่อก็คือจะเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอล I2C เช่นเดียวกับไมโครแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล



(ก)



(ข)

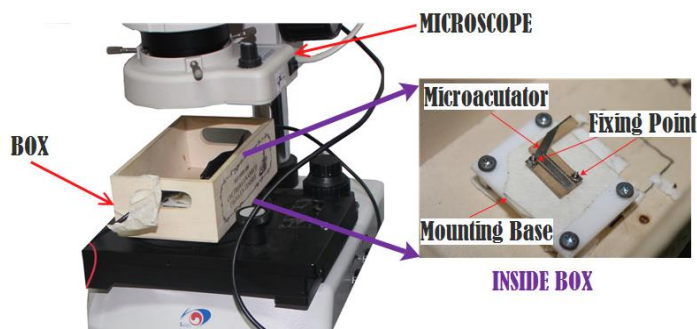
รูปที่ 5.9 (ก) โมดูล Analog to Digital Converter ads1115 (ข) โมดูล Digital to Analog Converter MCP472

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของไมโครแอกชูเอเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่

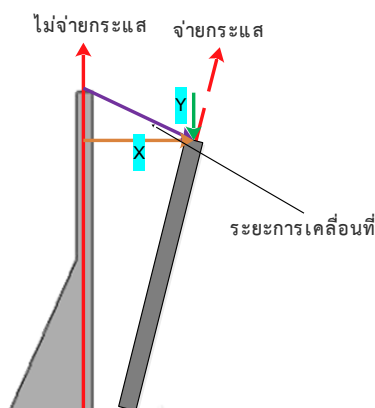
ในงานวิจัยนี้ได้ควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยวิธีการป้อนกลับด้วยตัวเอง (Self-Feedback) โดยการตรวจสอบค่าอุณหภูมิผ่านค่าความต้านทานซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้เกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนมาเพื่อประมาณค่าระยะการเคลื่อนที่ได้

5.2.1 การวัดระยะการเคลื่อนที่

การวัดระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกชูเอเตอร์ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) โดยติดตั้งไมโครแอกชูเอเตอร์กับ กล้องจุลทรรศน์ดังรูปที่ 5.10 ในการวัดระยะโดยใช้ซอฟต์แวร์ของกล้องจุลทรรศน์ในการอัดวิดีโอ จากนั้นไปวัดระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกชูเอเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Tracking ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ฟรี ซึ่งเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าจะทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เคลื่อนที่ ในการวัดระยะการเคลื่อนที่จะทำการวัดบริเวณปลายแขน ขนาดของระยะการเคลื่อนที่คำนวณจากระยะกระดกไปในทิศทางแนวราบ (Vertical ,X) และแนวดิ่ง (Horizontal ,Y) ดังรูปที่ 5.11 โดยมีความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ $\pm 6 \mu\text{m}$



รูปที่ 5.10 การวางไมโครแอกชูเอเตอร์บนกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 5.11 ภาพแสดงการวัดระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเดเตอร์

5.2.2 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของความต้านทานและระยะการเคลื่อนที่

สำหรับการดำเนินการในการทดลองนี้จะใช้วงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 5.2 โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานเป็น DAQ (Data-acquisition) โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุก 20 ms สำหรับการเก็บค่าความต้านทาน และใช้กล้องจุลทรรศน์ ในการตรวจสอบระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮอเดเตอร์

ในการหาคุณลักษณะนี้จะสั่งการจะให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งให้มอสเฟส ส่งค่ากระแสไฟฟ้า 5 ค่า ซึ่ง ณ ค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละค่าจะทำให้เกิดความต้านทานที่ต่างกัน เนื่องจากผลของอุณหภูมิ ส่วนการเก็บข้อมูลจะนำค่าความต้านทานและระยะการเคลื่อนที่ ณ สภาวะคงตัวซึ่งจากรูปที่ 5.13 จะอยู่ประมาณตั้งแต่วินาที ที่ 18 ไปถึง วินาทีสุดท้ายของการถ่ายวีดิโอมาเฉลี่ยกัน โดยจะใช้ไมโครแอกซ์ฮอเดเตอร์ทำซ้ำ 4 ตัว

5.2.3 ผลของการหาคุณลักษณะ

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองที่ได้จากการป้อนกระแสคือเมื่อจ่ายกระแสไปนานขึ้นทำให้ อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ความต้านทานมีค่ามากขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็จะทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนมากขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งลักษณะของการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 5.11 จากภาพที่รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของไมโครแอกซ์ฮอเดเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นโดยเมื่อค่าความต้านทานสูงขึ้นก็จะทำให้ไมโครแอกซ์ฮอเดเตอร์มีระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจากรูปที่ 5.15 ยิ่งค่าความต้านทานเปลี่ยนไปมากก็ทำให้ระยะการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ

สมการที่ 5.10 ซึ่งสมการดังกล่าวพิสูจน์ได้ จากสมการที่ 5.5 ซึ่งเป็นสมการที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป, สมการที่ 5.6 สมการการขยายตัวทางความร้อน และสมการที่ 5.7 เป็นสมการความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างระยะการขยายตัวของขาคเล็กซึ่งพิสูจน์จากงานวิจัยที่ผ่านมา[21] โดยค่าพารามิเตอร์ทางเรขาคณิตต่างๆ เทียบได้ในรูปที่ 5.12ก และรูปที่ 5.12ข จากผลการหาค่าคุณลักษณะจะเห็นได้ว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์แต่ละตัว เมื่อจ่ายกระแสเท่ากับระยะการเคลื่อนที่จะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.8 เนื่องจากค่าความต้านทานเริ่มต้น(R_0) ของแต่ละตัวไม่เหมือนกัน แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ตัวที่สองมีความต้านทานค่อนข้างแตกต่างจากตัวอื่นทั้งนี้ ทางผู้วิจัยสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากการจับยึดไมโครแอกซ์เอเตอร์

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad 5.5$$

$$\Delta l = L \beta \Delta T \quad 5.6$$

$$d = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2} \Delta l \quad 5.7$$

$$d = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2} \frac{L \beta R}{\alpha R_0} - \sqrt{1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2} \frac{L \beta}{\alpha} \quad 5.8$$

$$\text{จาก } d = aR + b$$

$$a = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2} \frac{L \beta}{\alpha R_0} \quad 5.9$$

$$b = -\sqrt{1 + \left(\frac{s}{L}\right)^2} \frac{L \beta}{\alpha} \quad 5.10$$

Δl ระยะการยืดตัวของบริเวณ แขนเล็กของไมโครแอกซ์เอเตอร์

L ระยะปกติของแขนไมโครแอกซ์เอเตอร์

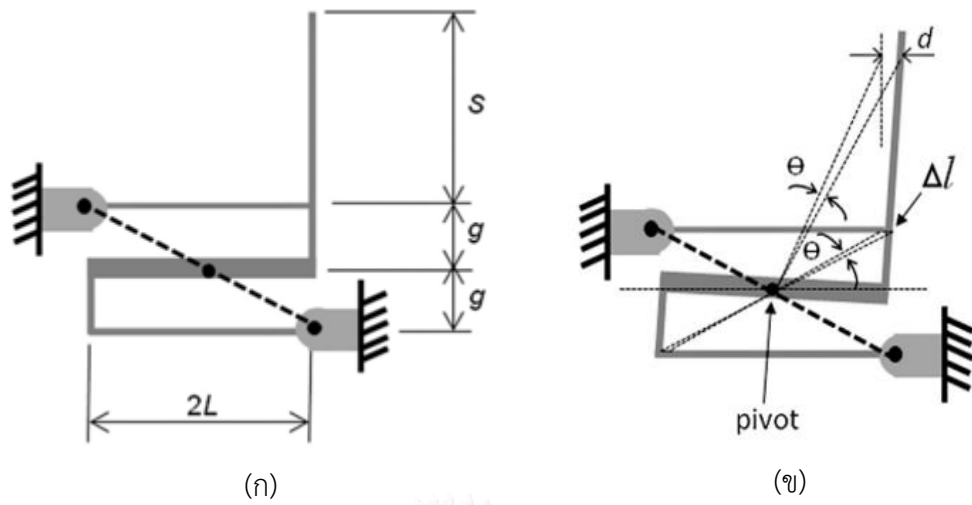
β สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ΔT อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของไมโครแอกซ์เอเตอร์

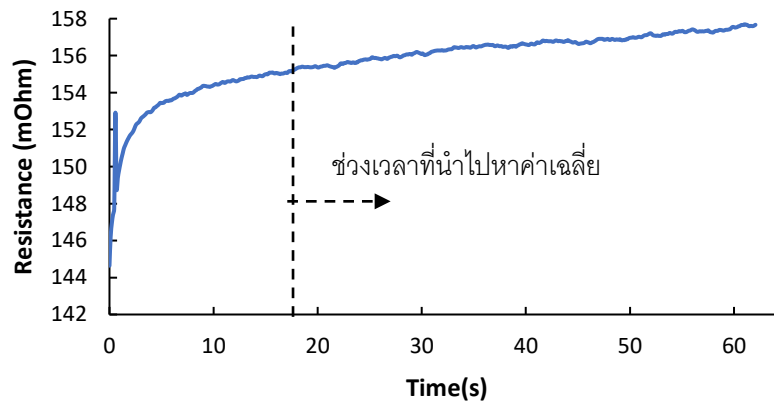
R_0 ค่าความต้านทานเริ่มต้น

R ค่าความต้านทานปัจจุบัน

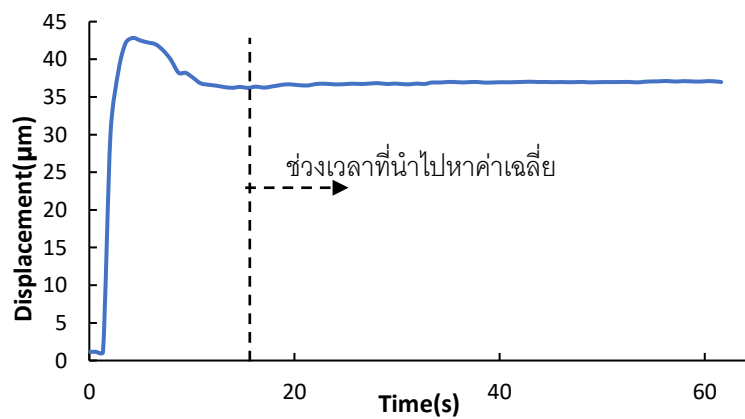
α สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 5.12 (ก) พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตของไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนในขณะสถานะปกติ (ข) ไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนเมื่อมีการกระตุ้น [21]

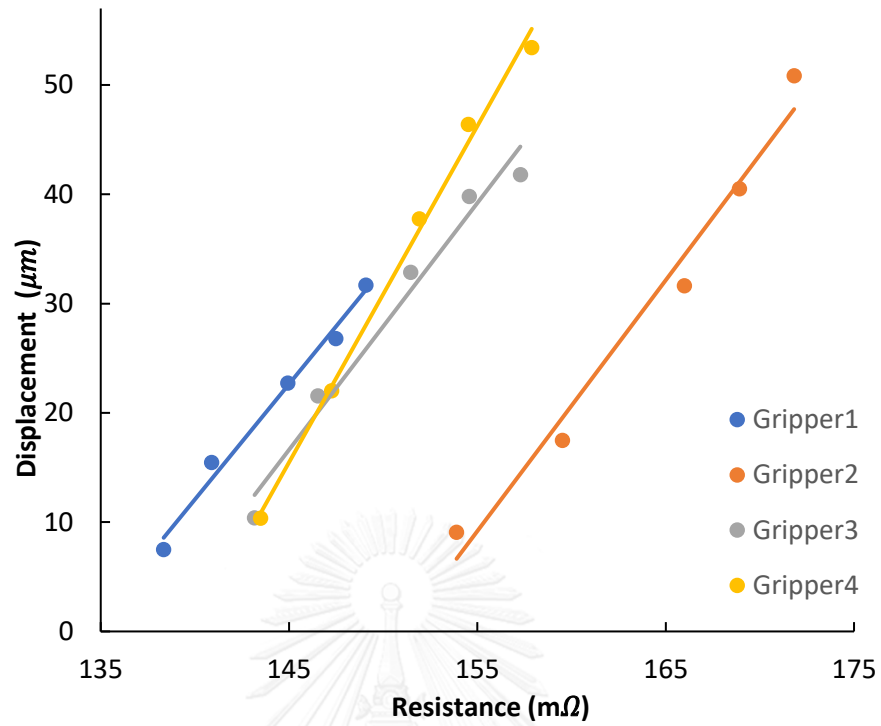


(ก)

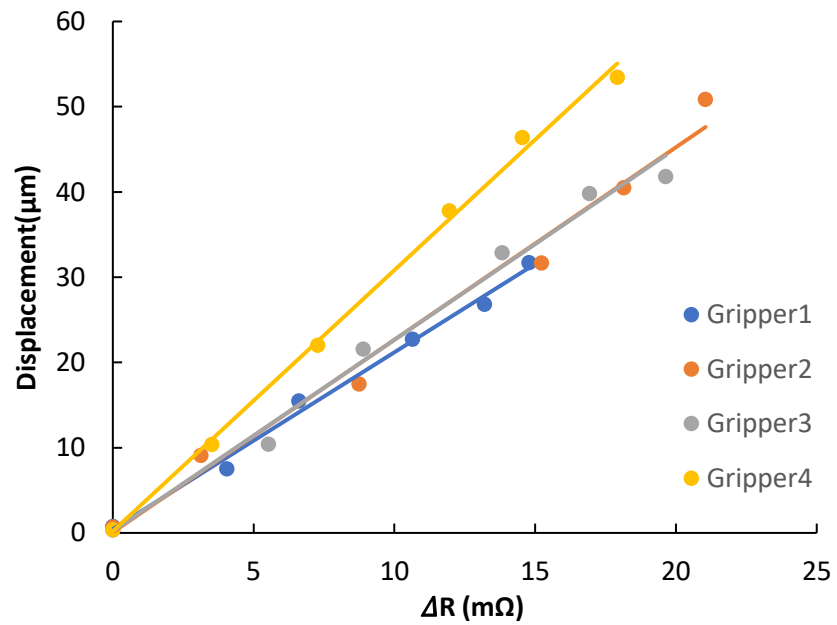


(ข)

รูปที่ 5.13 การตอบสนองทางเวลา (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ระยะการเคลื่อนที่



รูปที่ 5.14 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของไมโครแอดชัวเอเตอร์กับระยะการเคลื่อนที่



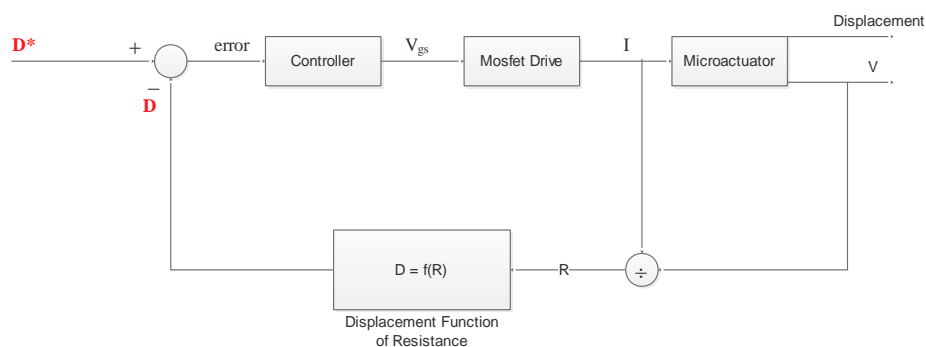
รูปที่ 5.15 ภาพแสดงความต้านทานที่เปลี่ยนไปกับระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอดชัวเอเตอร์

5.3 การควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์

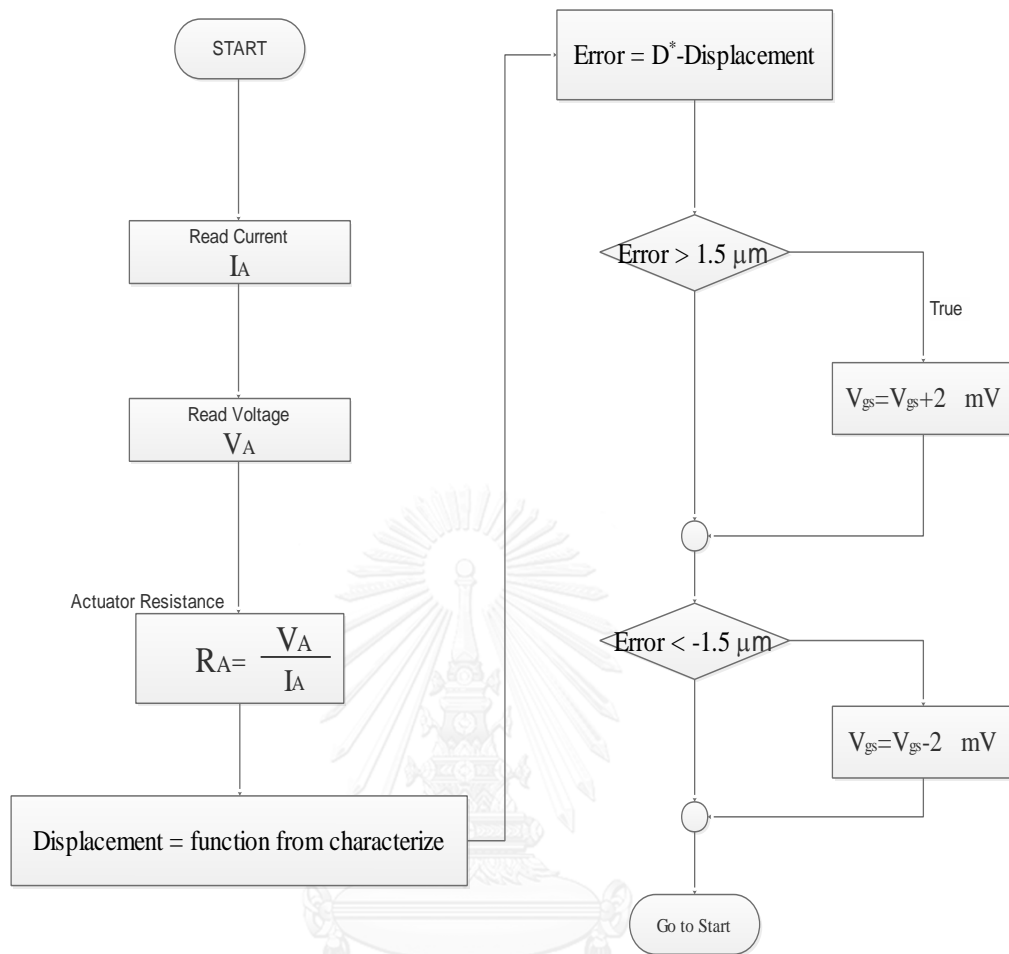
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบการควบคุม จากนั้นจะเป็นการทดสอบการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์ซึ่งได้ทดสอบ 3 อย่างได้แก่ การทดสอบสอปอัลกอริทึม การทดสอบการตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันได และการทดสอบต่อการถูกรบกวน

5.3.1 หลักการควบคุมและอัลกอริทึมการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างวิธีการและหลักการสำหรับการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนซึ่ง หลักการที่นำมาใช้เพื่อการควบคุมตำแหน่ง เมื่อมีการสั่งให้เกิดการเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งที่กำหนด ระบบจะทำการตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันโดยใช้สมการคุณลักษณะของไมโครแอกซ์เวเตอร์ ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับระยะการเคลื่อนที่ ที่ทำในการทดลองก่อนหน้านี้ในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 เมื่อตรวจสอบตำแหน่งแล้วเกิดความคลาดเคลื่อนกับคำสั่ง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการสั่งการมอสเฟส ให้มอสเฟสเพิ่มกระแสจนกระทั่งได้ค่าความต้านทานที่ตรงกับตำแหน่งที่สั่ง ซึ่งหลักการการควบคุมสรุปเป็นแผนภาพบล็อกดังในรูปที่ 5.16 สำหรับลำดับการทำงานที่นำมาเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปสั่งไมโครแอกซ์เวเตอร์ มีหลักการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่ากระแสกับศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมไมโครแอกซ์เวเตอร์ จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาคำนวณค่าความต้านทานแล้วนำค่าความต้านทานมาคำนวณระยะการเคลื่อนที่โดยใช้สมการคุณลักษณะ หลังจากจะเข้าสู่กระบวนการควบคุม โดยการตรวจเช็คค่ามีความคลาดเคลื่อนกับตำแหน่งที่สั่งการหรือไม่ถ้ามีแล้วจะมีเท่าไร ซึ่งอัลกอริทึมสำหรับการควบคุมนี้ จะเช็คค่ามีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 1.5 ไมครอนหรือน้อยกว่า 1.5 ไมครอนหรือไม่ ถ้ามีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่กำหนดจะต้องเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับสั่งการมอสเฟส (V_{gs}) เพื่อเพิ่มกระแส โดยจะเพิ่มค่าดังกล่าวทีละ 2 mV ถ้าน้อยกว่าต้องทำการลดค่าทีละ 2 mV ซึ่งสรุปเป็นผังงานไว้ในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 หลักการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยนี้



(ข)

รูปที่ 5.17 ผังงานการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์

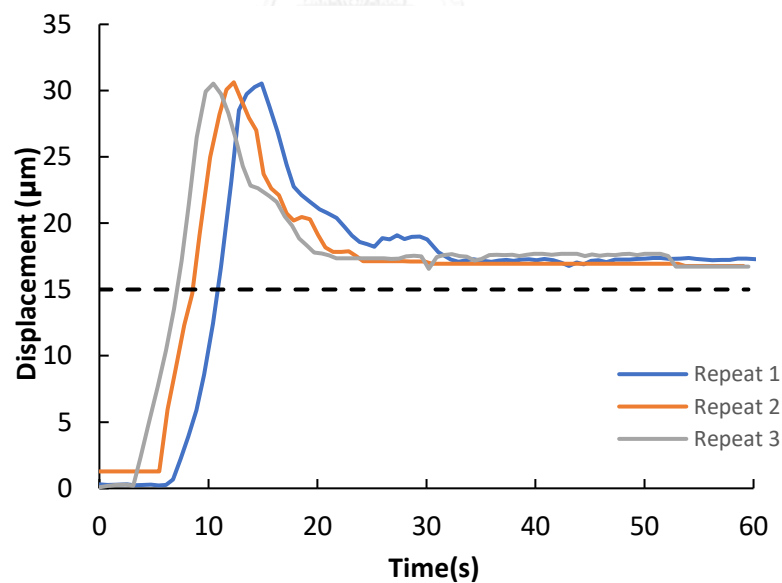
5.3.2 การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการควบคุม

การทดสอบอัลกอริทึมสำหรับการควบคุมจะพิจารณาระยะการกระดกที่ได้จากการสั่งให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณที่กำหนด ซึ่งระยะการกระดกที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของ การควบคุม จะมีสองระยะที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ที่ $15\ \mu\text{m}$ กับ $25\ \mu\text{m}$ โดยความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ $\pm 6\ \mu\text{m}$ ในการทดสอบแต่ละตัวได้ใช้ไมโครแอกชูเอเตอร์ 4 ตัวและทดสอบซ้ำสามรอบ โดยวัดระยะการกระดกจากกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งผลที่นำมาเสนอเป็นผลของไมโครแอกชูเอเตอร์ 1 ตัว

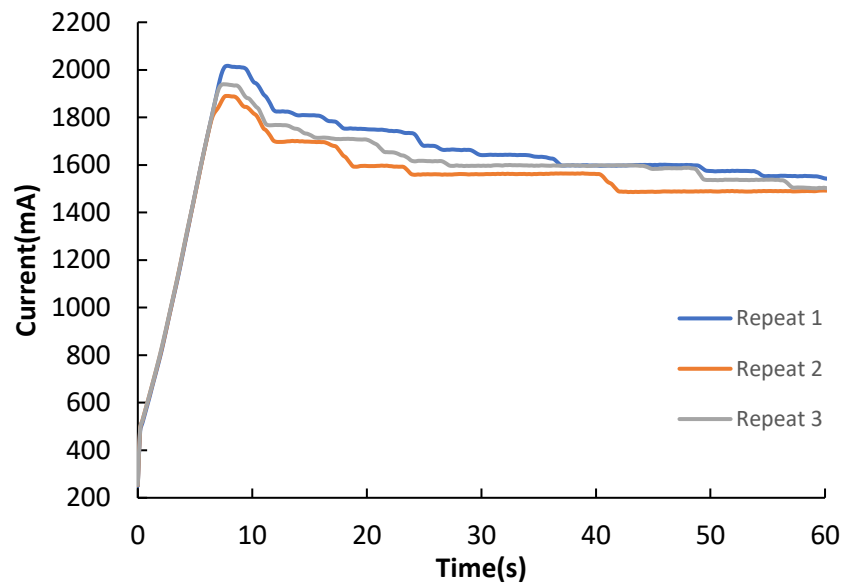
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.18 คือผลตอบสนองเชิงเวลาของระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกชูเอเตอร์ โดยจากการสั่งให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เคลื่อนที่ไป $15\ \mu\text{m}$ โดยเริ่มแรกเมื่อตรวจสอบค่าความต้านทานของไมโครแอกชูเอเตอร์ ระบบควบคุมจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นทำให้ต้องเพิ่ม

ปริมาณกระแสไฟฟ้าลักษณะดังรูปที่ 5.19ก ทำให้ได้ค่าความต้านทานที่ต้องการดังรูปที่ 5.19ข ซึ่งการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนสะสมมาก ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการขยายตัวทางความร้อนที่มากทำให้เกิดโอเวอร์ชูต(Overshoot) อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดความร้อนสะสมที่เยอะจะทำให้ความต้านทานของโครงสร้างเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนได้ที่แล้วถ้าคงที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าไว้ที่ค่าเดิมต่อไปความต้านทานจะเพิ่มขึ้นและทำให้ความร้อนสะสมก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งระบบจะไม่ต้องการให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอีกจึงต้องลดกระแสลงมาเพื่อรักษาระดับค่าความต้านทานค่า ส่งผลให้ระยะการกระดกของโครงสร้างจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัว จากผลการทดสอบโดยการสั่งไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์เคลื่อนที่ไป $15\ \mu\text{m}$ โครงสร้างจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลัง หลังจากวินาทีที่ 15 โดยประมาณ

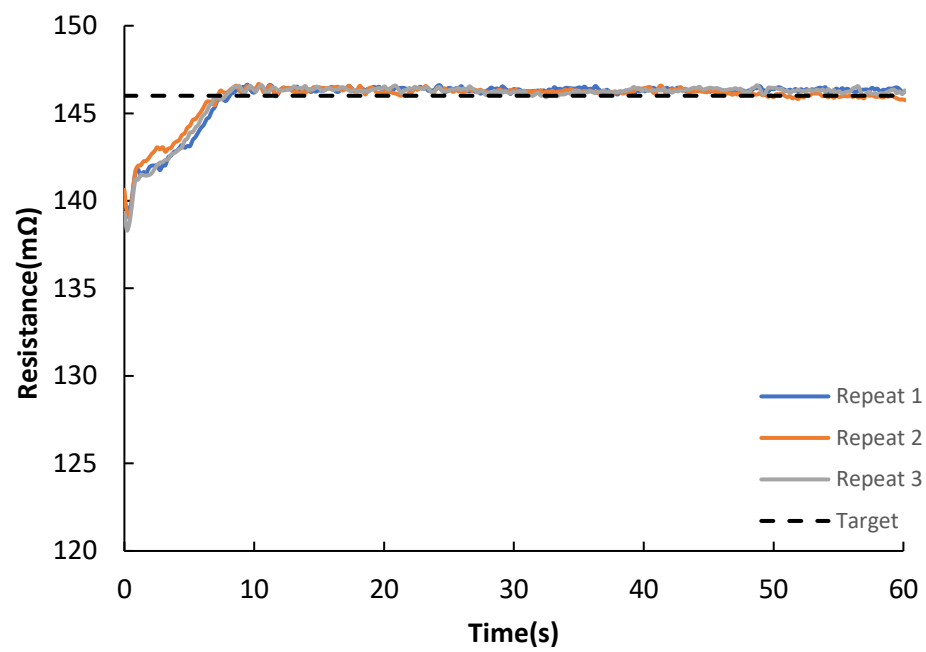
ในอีกหนึ่งการทดสอบคือสั่งให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์เคลื่อนที่ไปที่ $25\ \mu\text{m}$ ซึ่งลักษณะของการตอบสนองมีลักษณะคล้ายกับการสั่งให้เคลื่อนที่ไป $15\ \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 5.21 , รูปที่ 5.22 และ รูปที่ 5.23 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า โครงสร้างจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากวินาที ที่ 15 เช่นเดียวกับการทดสอบสั่งการให้เคลื่อนที่ไปที่ $15\ \mu\text{m}$



รูปที่ 5.18 ผลการตอบสนองทางเวลาต่อคำสั่ง $15\ \mu\text{m}$

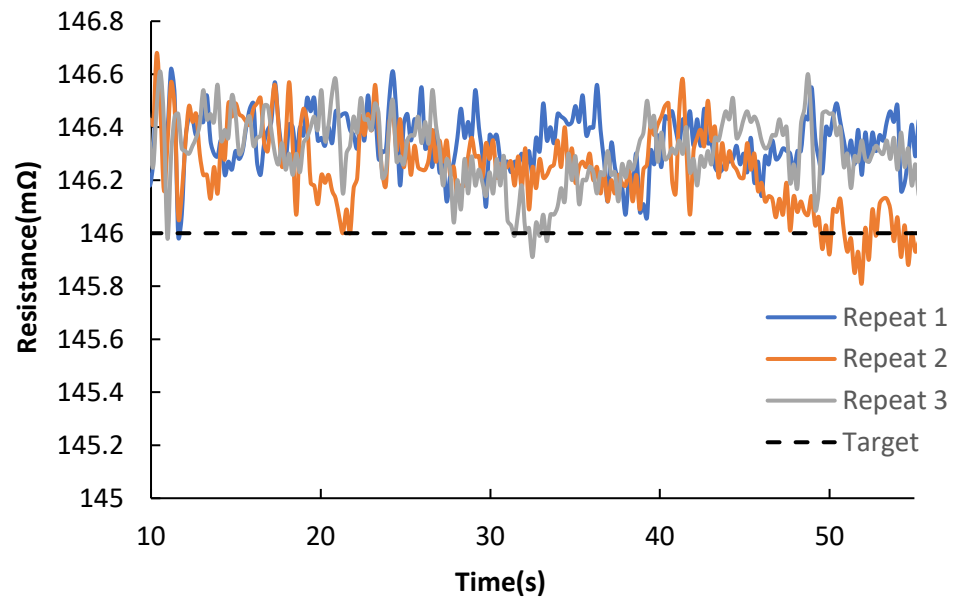


(ก)

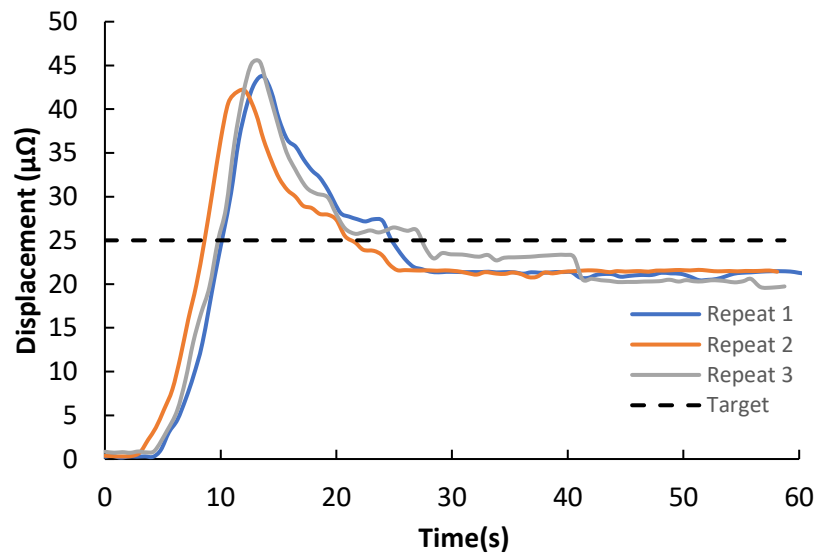


(ข)

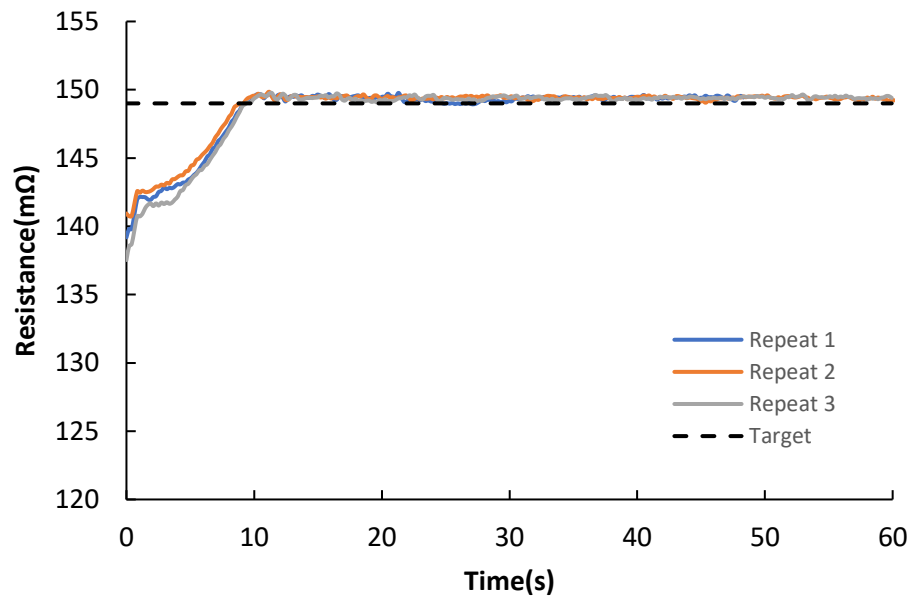
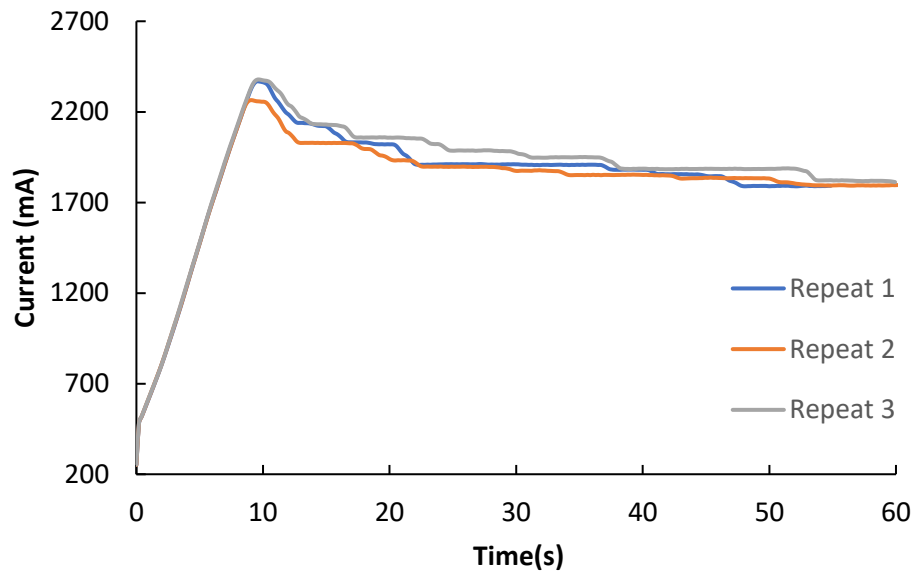
รูปที่ 5.19 ผลการตอบสนองทางเวลา (ก) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 15 μm (ข) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 15 μm



รูปที่ 5.20 ผลการตอบสนองค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 15 μm

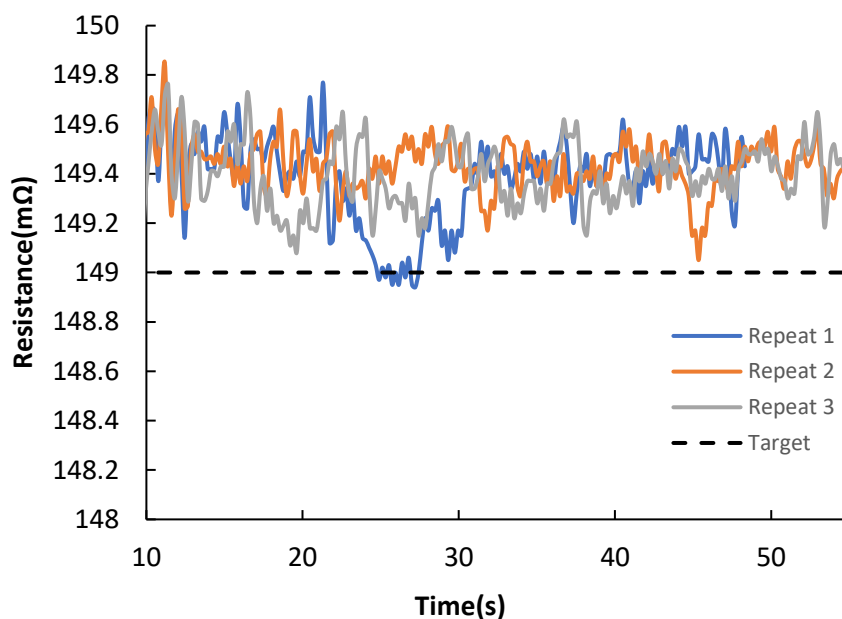


รูปที่ 5.21 ผลการตอบสนองทางเวลาต่อคำสั่ง 25 μm



(ข)

รูปที่ 5.22 ผลการตอบสนองทางเวลา(ก) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 25 μm (ข) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 25 μm



(ง)

รูปที่ 5.23 ผลการตอบสนองทางเวลาของค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 25 μm

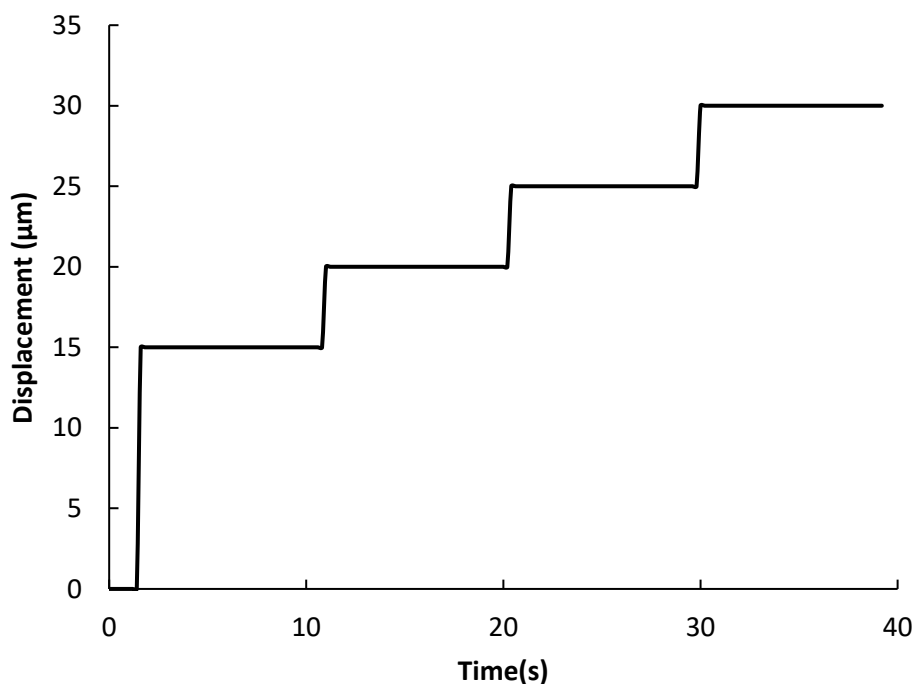
5.3.3 การทดสอบการตอบสนองต่อคำสั่งแบบขั้นบันได

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ ว่าสามารถเคลื่อนที่ตามคำสั่งที่ส่งไปได้หรือไม่ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (FeedForward) ในการทดสอบนี้จะทดสอบโดยการสั่งให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์เคลื่อนที่ไปในระยะที่กำหนด ได้แก่ 15 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที, 20 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที, 25 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที และ 30 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที ลักษณะสัญญาณคำสั่งจะเป็นรูปแบบสัญญาณขั้นบันไดดังรูปที่ 5.24

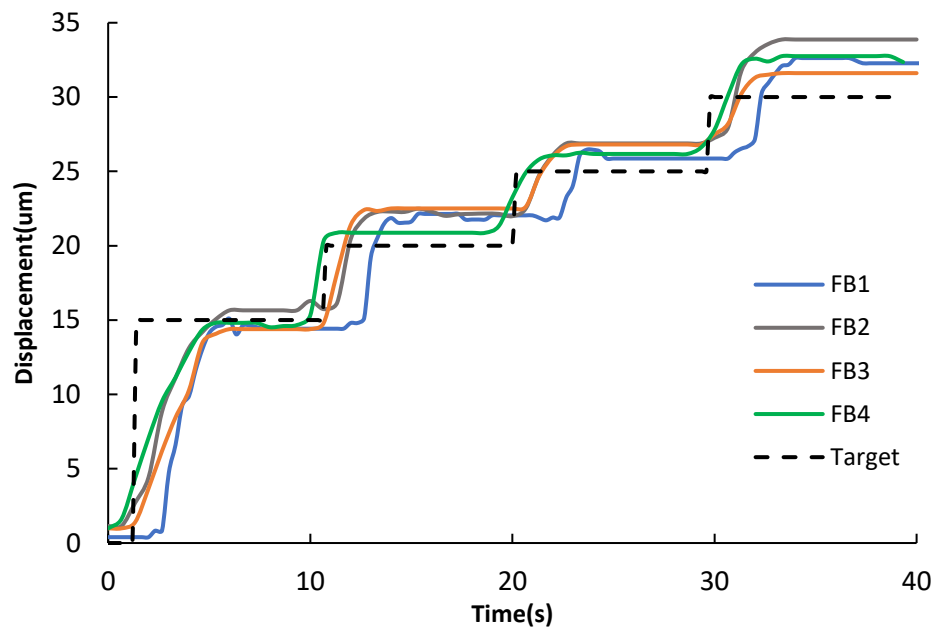
เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่ได้จากการควบคุมแบบป้อนกลับจากรูปที่ 5.25 ก พบว่าในช่วงเวลาคำสั่งแรกคือ 15 μm ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์จะใช้เวลาประมาณ 3 วินาทีในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังตำแหน่งที่ 15 μm ซึ่งเมื่อพิจารณาการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 5.26 ก จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มค่าเพื่อสร้างความร้อน เมื่อกระแสไฟฟ้าสามารถสร้างความร้อนที่ทำให้ได้ค่าความต้านทานที่ต้องการซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ 5.27 ก ไมโครคอนโทรลเลอร์จะพยายามรักษาค่าความต้านทานเพื่อรักษาระยะการเคลื่อนที่ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาผลของการควบคุมโดยวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า จากรูปที่

5.25ข จะใช้เวลาประมาณ 1 วินาที ในการนำไมโครแอกซ์เอเตอร์ไปสู่ตำแหน่งที่ตั้ง ซึ่งการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ป้อนไปกับระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์เอเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที คำสั่งระยะการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนจาก 15 μm เป็น 20 μm เมื่อเปลี่ยนคำสั่งส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการปรับกระแสอีกรอบเพื่อทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งโดยใช้เวลาประมาณ 2 วินาที ในการทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่สภาวะคงตัวสำหรับการควบคุมแบบป้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าก็ใช้เวลาประมาณ 2 วินาทีเช่นกัน ซึ่งในช่วงการเปลี่ยนคำสั่งที่เหลือจะมีลักษณะการตอบสนองการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับช่วงที่สอง

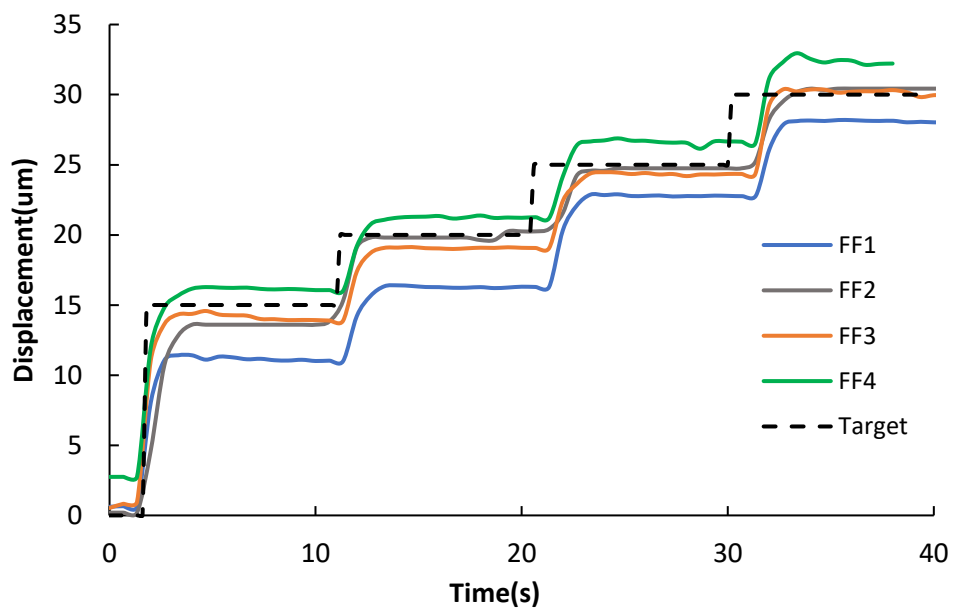
จากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคำสั่งพบว่าในช่วงแรกการควบคุมแบบป้อนกลับใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวมากกว่าแบบการใช้การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากในช่วงแรกมีค่าความผิดพลาดระหว่างระยะการเคลื่อนที่กับคำสั่งเยอะเป็นผลทำให้วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับจะใช้เวลามากกว่า อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าสู่ในช่วงที่สองเป็นต้นไปพบว่าในการควบคุมทั้งสองแบบใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวในระยะเวลาประมาณใกล้เคียงกัน 2 วินาที ในส่วนของระยะการเคลื่อนที่ที่วัดได้พบว่า เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับมีความเที่ยงตรง (precision) ที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า



รูปที่ 5.24 ภาพแสดงคำสั่งของแต่ละช่วงเวลาของไมโครแอกซ์เอเตอร์

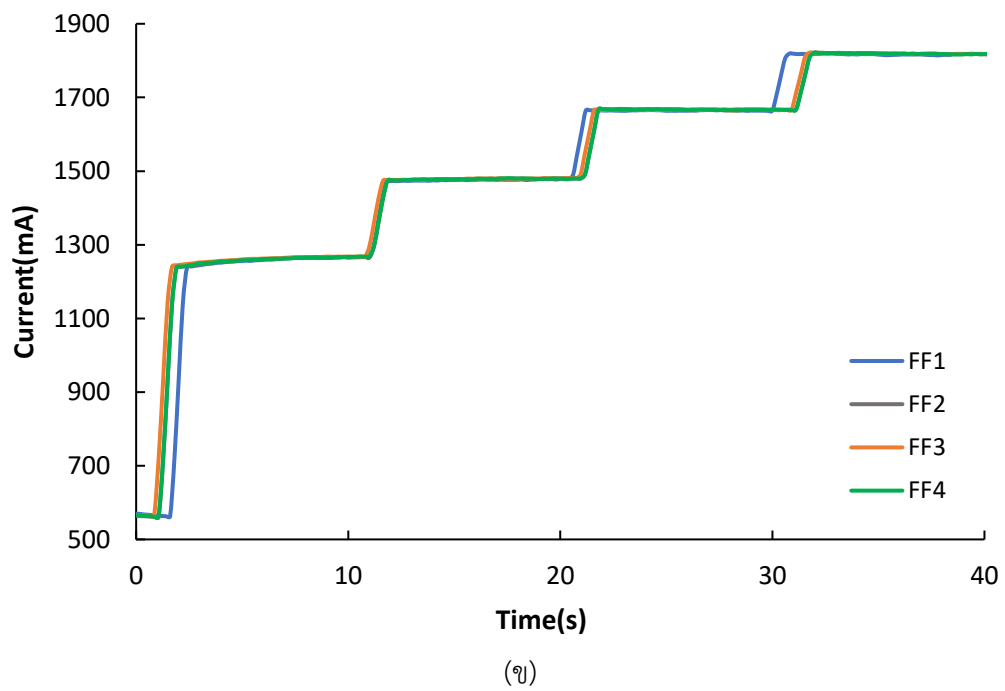
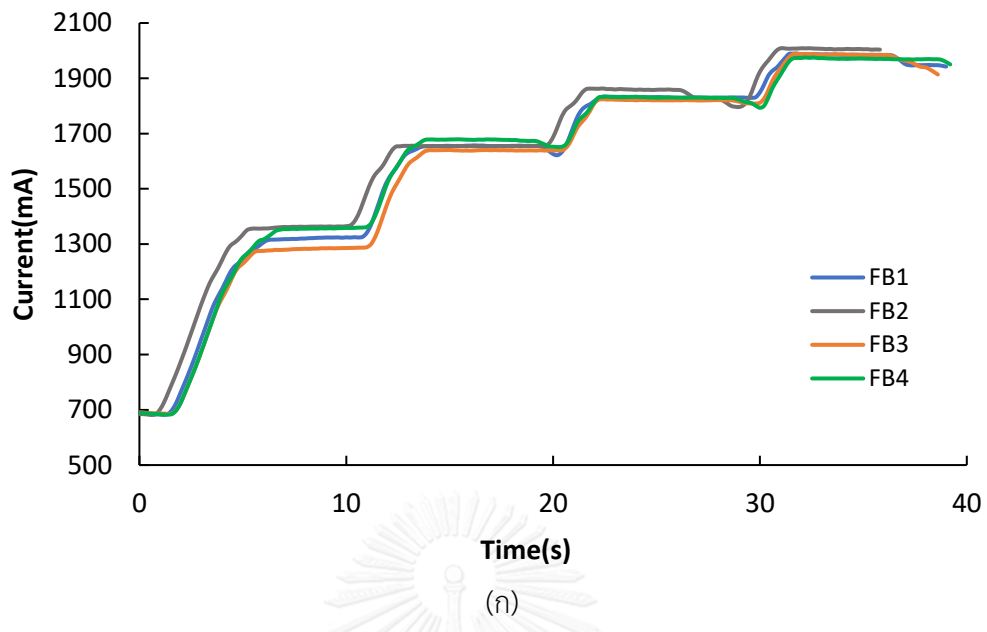


(ก)

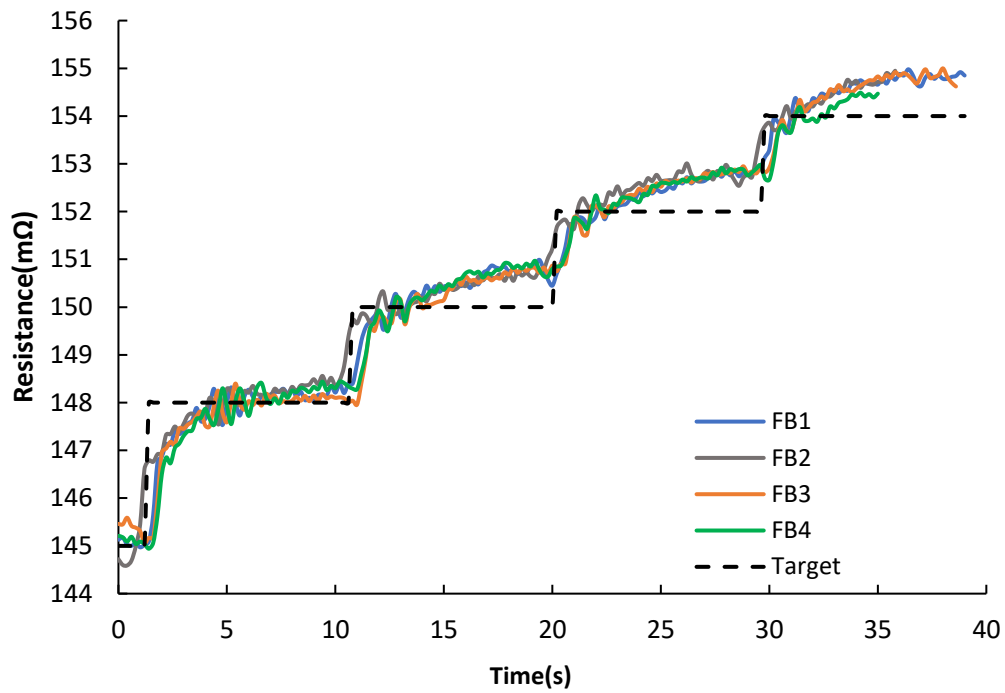


(ข)

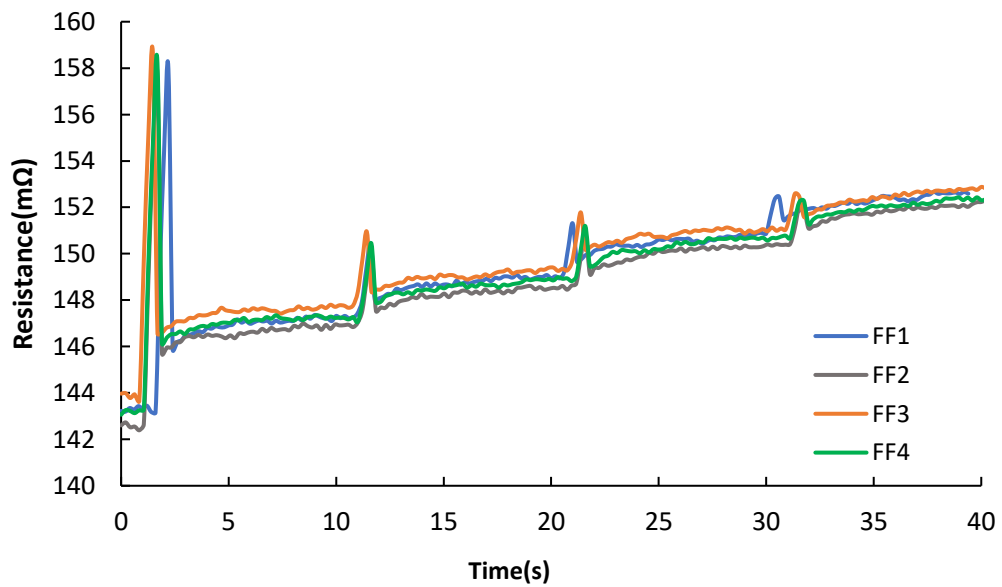
รูปที่ 5.25 การเคลื่อนที่ของไมโครแอกชูเอเตอร์ของ (ก) การควบคุมด้วยการป้อนกลับ (ข) การควบคุมด้วยวิธีป้อนไปข้างหน้า



รูปที่ 5.26 กระแสไฟฟ้าจาก (ก) วิธีการควบคุมแบบป้อนกลับ (ข) วิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า



(ก)



(ข)

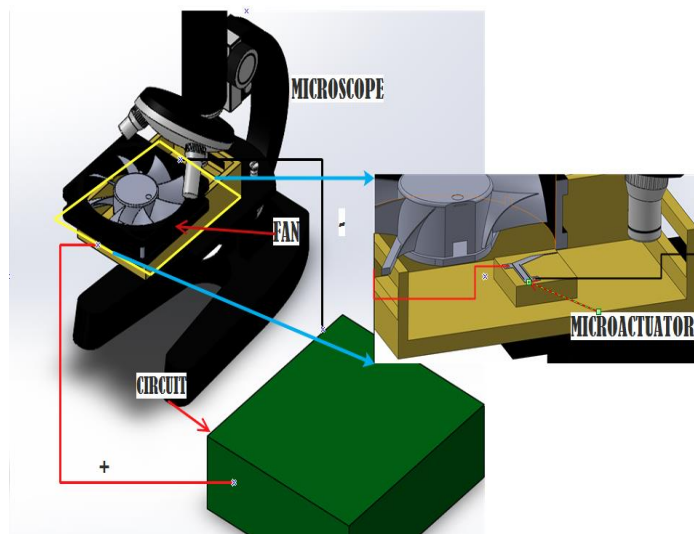
รูปที่ 5.27 ความต้านทานที่เกิดขึ้น (ก) จากการควบคุมแบบป้อนกลับ (ข) จากการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

5.3.4 การตอบสนองต่อการถูกรบกวน

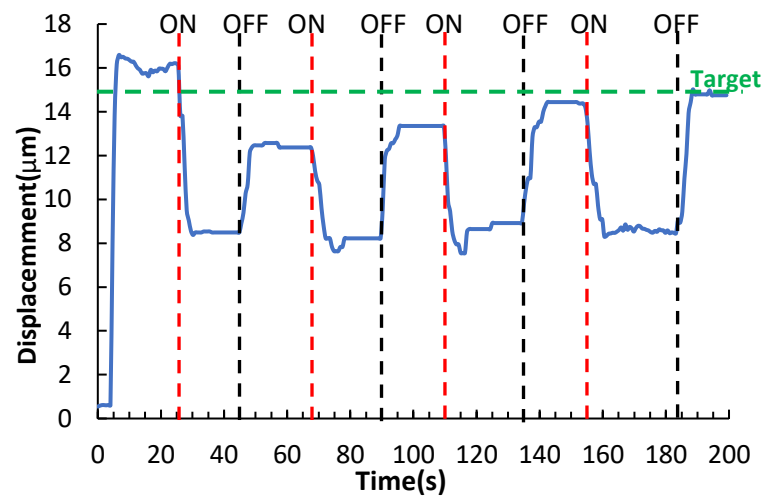
ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบต่อการถูกรบกวน ซึ่งตัวอย่างในการใช้งานไมโครแอกซ์เวเตอร์ในอุตสาหกรรมจริงมีโอกาสถูกรบกวนจากสภาพอากาศข้างนอกซึ่งส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดได้ ในการทดสอบต่อการถูกรบกวนนี้จะทำการเพิ่มพัลสมเพื่อนำมาจำลองสภาพแวดล้อมสมมติเมื่อถูกบรรยากาศภายนอกกรบกวนโดยพัลสมจะสร้างปริมาณอัตราการใช้ของอากาศ 41 CFM เข้าไปที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยเซตชุดทดลองเป็นดังรูปที่ 5.28 เป็นการจัดวางเพื่อทำการสร้างสภาพแวดล้อมการถูกรบกวนจากภายนอก การทดสอบนี้ทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบป้อนไปข้างหน้ากับวิธีการใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการเปิดพัลสม ณ วินาที ที่ 28 69 110 และ 155 ตามลำดับ หลังแอกซ์เวเตอร์ทำงานไปแล้ว ระยะเวลาในการเปิดพัลสมจะแบ่งเป็น 4 ช่วง เป็นระยะเวลา 15 วินาที, 20 วินาที, 25 วินาที , 25 วินาที ตามลำดับ ผลการตอบสนองต่อการถูกรบกวนของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเป็นดังรูปที่ 5.29 โดยจะเห็นได้ว่าระหว่างที่มีการรบกวนในช่วงแรกจะทำให้ ระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะลดลงไปอยู่ที่ 8.5 μm และคงที่ไว้ระยะดังกล่าวจนกระทั่งหยุดการรบกวน ทั้งนี้การรบกวนส่งผลทำให้ อุณหภูมิลดลงโดยเฉียบพลันเป็นผลทำให้ระยะการขยายตัวของโครงสร้างน้อยลงทันทีทันใดเช่นกัน เมื่อหลังจากผ่านช่วงแรกระยะการกระดกจะกลับมาอยู่ที่ 12 μm หลังจากเมื่อถึงช่วงที่สองของการถูกรบกวนระยะการกระดกก็จะลดลงในลักษณะเดิมในช่วงการรบกวนทั้ง 3 ช่วงที่เหลือ

ในขณะเดียวกันในส่วนของการทดสอบการตอบสนองต่อการถูกรบกวนโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.30 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการรบกวนการทำงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะทำให้ระยะการกระดกตกลงไปเป็นระยะเวลา 5 วินาที ระบบจะพยายามทำการปรับค่าขึ้นไปเพื่อต้านกับการถูกรบกวน โดยจะทำให้ระยะการกระดกกลับอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดในเวลา 5 วินาที จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อทำการหยุดรบกวนการทำงานในช่วงแรก จากรูปที่ 5.31 จะเห็นได้ว่า ณ จุดเวลาที่ทำการปิดพัลสมจะมีกระแสไฟฟ้าตกค้างซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการสะสมความร้อน แล้วจะทำให้ระยะการกระดกเคลื่อนที่ออกไปเป็นเวลาประมาณ 2 วินาทีถึงกลับเข้าสู่สภาวะเดิม ซึ่งในช่วงอื่นที่ทำการรบกวน ไมโครแอกซ์เวเตอร์ก็มีลักษณะการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับกับในช่วงเวลาการรบกวนในครั้งแรก

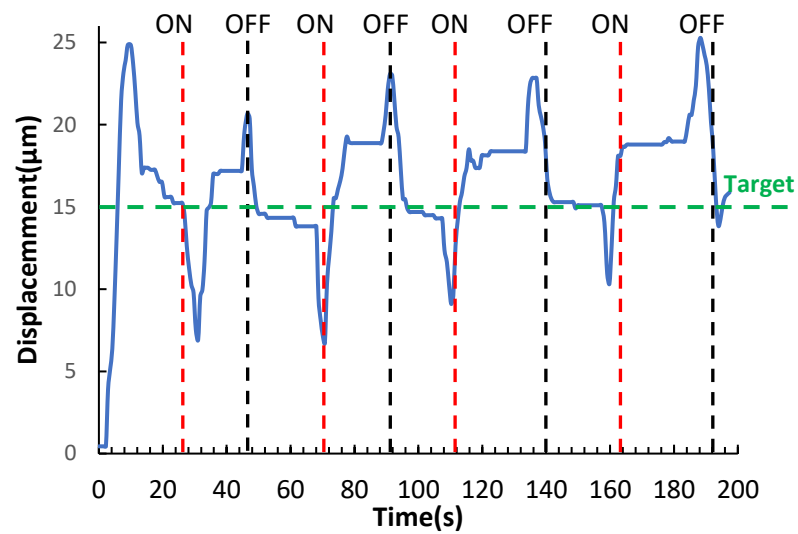
จากการทดสอบการตอบสนองต่อการถูกรบกวนจะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบป้อนกลับมีการตอบสนองต่อการถูกรบกวนที่ดีกว่าการใช้ ป้อนไปข้างหน้า โดยการควบคุมแบบป้อนกลับจะมีการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในการป้องกันการถูกรบกวนจากภายนอกได้



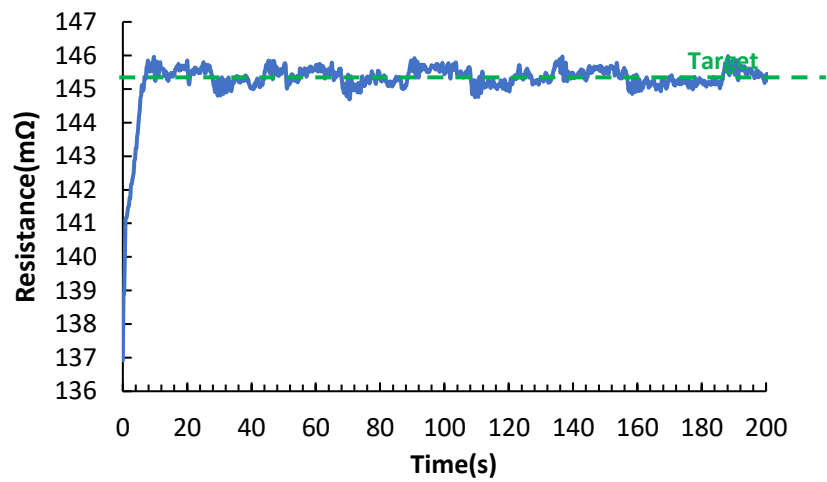
รูปที่ 5.28 ลักษณะการติดตั้งไมโครแอกชูเอเตอร์ในการทดลองการตอบสนองต่อการถูกรบกวน



รูปที่ 5.29 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนของระยะการเคลื่อนที่ของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

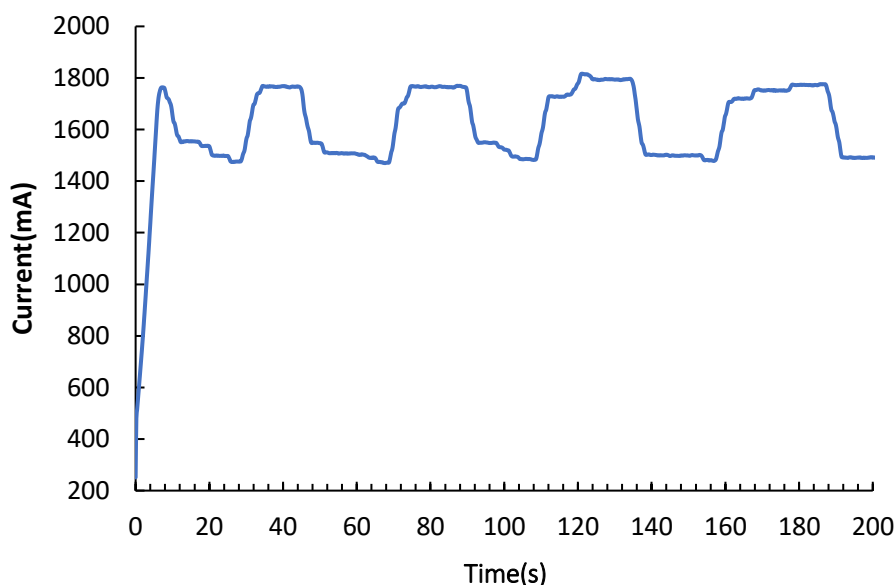


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.30 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนของการควบคุมแบบป้อนกลับ (ก) ระยะการเคลื่อนที่ (ข) ความต้านทาน



รูปที่ 5.31 ผลการตอบสนองต่อการรบกวนกระแสไฟฟ้าต่อการควบคุมแบบป้อนกลับ

5.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึง การหาคุณลักษณะและวิธีการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ ซึ่งการควบคุมและการหาคุณลักษณะได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเก็บค่าและประมวลผลในการควบคุมและการหาคุณลักษณะของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมกระแสไฟฟ้า โดยการใช้อุปกรณ์มอสเฟสในการควบคุม

สำหรับการหาคุณลักษณะของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ได้ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็น DAQ มีความถี่ในการสุ่มค่าอยู่ที่ 20 ms ซึ่งผลการทดสอบคุณลักษณะได้ทำการทดสอบไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ 4 ตัว จากผลการทดสอบพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกันซึ่งพิสูจน์ได้จากสมการการขยายตัวทางความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับอุณหภูมิและความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต ในส่วนของการควบคุมได้ใช้อัลกอริทึมโดยปรับกระแสตามระดับความต้านทานที่เปลี่ยนไปซึ่งความต้านทานดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังกล่าวได้มาจากการทดลองการหาคุณลักษณะ ในการทดสอบการควบคุมแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบได้แก่ การทดสอบอัลกอริทึม การทดสอบการตอบสนองคำสั่งแบบขั้นบันได และการทดสอบต่อการถูกรบกวน โดยค่าความไม่แน่นอนในการวัดระยะการกระดกอยู่ที่ $\pm 6 \mu\text{m}$ ความไม่แน่นอนในการวัดของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ $\pm 2 \text{ mA}$ และความไม่แน่นอนในการวัดของความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ $\pm 3 \text{ mV}$

ในการทดสอบอัลกอริทึมได้ทำการทดสอบโดยการป้อนคำสั่งให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ 2 คำสั่ง ได้แก่ 15 μm กับ 25 μm ซึ่งผลตอบสนองเชิงเวลาของระยะการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ โดยจากการสั่งให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์เคลื่อนที่ไป 15 μm เมื่อตรวจสอบค่าความต้านทานของไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ ระบบควบคุมจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นทำให้ต้องเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ได้ค่าความต้านทานทำให้เกิดความร้อนสะสมมาก ส่งผลให้โครงสร้างเกิดการขยายตัวทางความร้อนที่มากทำให้เกิดโอเวอร์ชูด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนได้ที่แล้วระบบจะไม่ต้องการให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอีกจึงต้องลดกระแสลงมาเพื่อรักษาระดับค่าความต้านทานค่า ส่งผลให้ระยะการกระดกของโครงสร้างจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่ง โครงสร้างจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากวินาทีที่ 15 โดยประมาณ สำหรับการสั่งการให้เคลื่อนที่ไปที่ 25 μm ซึ่งลักษณะของการตอบสนองมีลักษณะคล้ายกับการสั่งให้เคลื่อนที่ไป 15 μm ในการทดสอบการตอบสนองคำสั่งแบบขั้นบันได ได้ทำการทดสอบการเปรียบเทียบการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้ากับการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะทดสอบโดยการส่งคำสั่งเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได โดยให้เคลื่อนที่ไปในระยะที่กำหนด ได้แก่ 15 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที, 20 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที , 25 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที และ 30 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่าในช่วงแรกการควบคุมแบบป้อนกลับจะเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ช้ากว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ในช่วงที่สองเป็นต้นไป การควบคุมทั้งสองแบบใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวในระยะเวลาประมาณใกล้เคียงกัน 2 วินาทีในช่วงที่สอง ในส่วนของระยะการเคลื่อนที่ที่วัดได้พบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับมีความเที่ยงตรง (precision) ที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อการถูกรบกวน ได้ทำการเปิดพัลลัมให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์แบบป้อนไปข้างหน้า เวลาที่ทำการเปิดพัลลัมอยู่ที่ ณ วินาที ที่ 28 69 110 และ 155 ตามลำดับหลังไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์ทำงาน โดยระยะเวลาในการเปิดพัลลัมจะแบ่งเป็น 4 ช่วงโดยกัน เป็นระยะเวลา 15 วินาที, 20 วินาที, 25 วินาที , 25 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเมื่อถูกรบกวนจะทำให้ระยะการกระดกของโครงสร้างลดลงผลจากการคลายความร้อน แต่ในขณะเดียวกันการควบคุมแบบป้อนกลับจะพบว่าเมื่อมีการถูกรบกวนเกิดขึ้น ตัวควบคุมจะทำการปรับเพิ่มกระแสเพื่อให้ไมโครแอกซ์ฮิวเอเตอร์รักษาระดับร้อนเพื่อให้อุณหภูมิการกระดกให้เป็นไปตามคำสั่งไว้

บทที่ 6 สรุปภาพรวมงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือการปรับปรุงความเรียบผิวของชิ้นงานไมโครแอกซ์เวตเตอร์ และการควบคุมตำแหน่งไมโครแอกซ์เวตเตอร์เชิงความร้อน ซึ่งไมโครแอกซ์เวตเตอร์เชิงความร้อนในงานวิจัยนี้ได้ใช้สร้างโดยวิธีการชุบโลหะในการสร้างจากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้กระแสไฟฟ้าแบบคลื่นช่วงสามารถปรับปรุงความเรียบผิวของชิ้นงานได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการชุบโลหะโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงโดยได้ใช้ความถี่ในการชุบ 4 ช่วงความถี่ได้แก่ 10 Hz ,50 Hz ,200 Hz และ 500 Hz โดยทำการเปรียบเทียบกับการชุบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งในการหาค่าความหยาบผิวได้ใช้เครื่องมือวัดประเภทไมล์สัมผัสและค่าพารามิเตอร์ความหยาบผิวที่ใช้ในการทดสอบ มี 3 ตัวได้แก่ ความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a) ความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (R_q) ค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่สูงที่สุด 5 จุดและจุดที่ต่ำที่สุด 5 จุด (R_z) ในการหาค่าความหยาบผิวได้นำชิ้นงานที่สร้างจากการชุบไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้าแบบช่วง 10 Hz และ 200 Hz เพื่อเป็นตัวแทนในส่วนของความถี่สูงและความถี่ต่ำตามลำดับ จากผลการทดสอบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของการชุบไฟฟ้าโดยการใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz และ 200 Hz มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่าการชุบไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ประมาณ 20% ขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาความหยาบผิวรากที่สองกำลังสองเฉลี่ยชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงด้วยความถี่ขนาด 200 Hz น้อยกว่าแบบไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 35% และความเรียบผิวดีกว่าการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงในช่วงความถี่ 10 Hz อยู่ 20% ในส่วนของค่าเฉลี่ยของผลรวมของจุดที่สูงที่สุด 5 จุด และ จุดที่ต่ำที่สุด 5 จุด (R_z) การชุบที่ 200 Hz สามารถลดจากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงได้ประมาณ 70% และลดจากการชุบกระแสไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz อยู่ 35 % นอกจากการทดสอบความหยาบผิวแล้วยังได้ทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบช่วงกับไฟฟ้ากระแสตรงได้โครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน และการทดสอบประสิทธิภาพการใช้กระแสพบว่า การชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบคลื่นสี่เหลี่ยมมี ทั้ง 4 กรณีมี ค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 95-96% ในขณะเดียวกันการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ประมาณ 80%

ในส่วนของ การควบคุมได้ใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โครงสร้างเพื่อให้เกิดความร้อน เมื่อเกิดความร้อนก็จะเกิดการขยายตัวทางความร้อน ซึ่งปริมาณกระแสที่จ่ายได้ควบคุมโดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการป้อนกลับค่าได้ใช้ความสัมพันธ์ของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิกับระยะการเคลื่อนที่ไมโครแอกซ์เวตเตอร์เคลื่อนที่ได้ ซึ่งจากการทดลองหาคุณลักษณะ

พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในการควบคุมได้ใช้วิธีการค่อยๆเพิ่มค่าจนกระทั่งได้ค่าความต้านทานที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการควบคุมอยู่ 3 อย่างได้แก่การทดสอบอัลกอริทึม ซึ่งทดสอบโดยการป้อนคำสั่งระยะการเคลื่อนอยู่สองคำสั่งได้แก่ 15 μm และ 25 μm เมื่อเริ่มต้นตัวควบคุมจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นทำให้ต้องเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ได้ค่าความต้านทานที่กระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนสะสมมากทำให้เกิดโอเวอร์ชูต เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนได้ที่แล้วระบบจะทำการปรับระดับกระแสเพื่อรักษาระดับความต้านทาน ส่งผลให้ระยะการกระดกของโครงสร้างจะลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งโครงสร้างจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากวินาทีที่ 15 โดยประมาณสำหรับการสั่งการให้เคลื่อนที่ไปที่ 25 μm ซึ่งลักษณะของการตอบสนองมีลักษณะคล้ายกับการสั่งให้เคลื่อนที่ไป 15 μm

ในการทดสอบการตอบสนองต่อคำสั่งแบบขั้นบันไดได้ทำการทดสอบการเปรียบเทียบการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้โครงสร้างกระดกไปเป็นระยะที่ต้องการกับการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งจะทดสอบโดยการส่งคำสั่งเป็นสัญญาณแบบขั้นบันไดโดยให้เคลื่อนที่ไปในระยะที่กำหนดได้แก่ 15 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที, 20 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที, 25 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที และ 30 μm เป็นช่วงเวลา 10 วินาที ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าในช่วงแรกการควบคุมแบบป้อนกลับจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้ากว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า หลังจากนั้นตั้งแต่ช่วงที่สองเป็นต้นไป การควบคุมทั้งสองแบบใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวใกล้เคียงกันเป็นระยะเวลาประมาณ 2 วินาที ในส่วนของระยะการเคลื่อนที่ที่วัดได้พบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวพบว่าการควบคุมแบบป้อนกลับมีความเที่ยงตรง (precision) ที่ดีกว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อการถูกรบกวนได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับกับการควบคุมไมโครแอกชูเอเตอร์แบบป้อนไปข้างหน้ากับวิธีการใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ เวลาที่ทำการเปิดพัลสมอยู่ที่ ๓ วินาที ที่ 28 69 110 และ 155 ตามลำดับโดยระยะเวลาในการเปิดพัลสมจะแบ่งเป็น 4 ช่วงโดยกัน เป็นระยะเวลา 15 วินาที, 20 วินาที, 25 วินาที, 25 วินาทีตามลำดับ และมีระยะเวลาที่ทำให้เกิดการสะสมความร้อนมีระยะเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเมื่อถูกรบกวนจะทำให้ระยะการกระดกของโครงสร้างลดลงจากการคลายความร้อนแต่ในขณะเดียวกันการควบคุมแบบป้อนกลับจะพบว่าเมื่อมีการถูกรบกวนเกิดขึ้นตัวควบคุมจะทำการปรับเพิ่มกระแสเพื่อให้ไมโครแอกชูเอเตอร์รักษาระดับร้อนเพื่อรักษาระยะการกระดกให้เป็นไปตามคำสั่งไว้

จากผลการทดลองในการควบคุมพบว่า ข้อดีของการควบคุมแบบป้อนกลับมีคือสามารถรักษา ระดับการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเมื่อถูกสภาวะแวดล้อมรบกวนและมีความเที่ยงตรงที่ดีกว่าการ ควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดผู้วิจัยจึงมีแนวทางในการต่อยอดการวิจัย ในอนาคตได้แก่การปรับปรุงอัลกอริทึมในการควบคุมเป็นการผสมระหว่างการใช้การควบคุมแบบป้อน ไปข้างหน้ากับการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อให้สามารถลบข้อเสียของการควบคุมที่ทำการใช้ในงานวิจัยนี้ได้



รายการอ้างอิง

- [1] I. habil and H. Janocha, "Microactuators - Principles, Applications, Trends," Saarland University.
- [2] D. J. Bell, T. J. Lu, N. A. Fleck, and S. M. Spearing, "MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 7, p. S153, 2005.
- [3] R. Zhang, J. Chu, H. Wang, and Z. Chen, "A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation," *Microsystem Technologies*, journal article vol. 19, no. 1, pp. 89-97, 2013.
- [4] A. M. Rashidi and A. Amadeh, "The effect of current density on the grain size of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings," *Surface & Coatings Technology* vol. 202, no. 2008, pp. 3772-3776, 2008.
- [5] S. Khan, T. de Boer, P. Estevez, H. H. Langen, and R. H. Munnig Schmidt, "Development of Haptic Microgripper for Microassembly Operation," in *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations: International Conference, EuroHaptics 2010, Amsterdam, July 8-10, 2010. Proceedings*, A. M. L. Kappers, J. B. F. van Erp, W. M. Bergmann Tiest, and F. C. T. van der Helm, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 309-314.
- [6] S. Ku and S. E. Salcudean, "Design and control of a teleoperated microgripper for microsurgery," in *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, 1996, vol. 1, pp. 889-894 vol.1.
- [7] N. S. Qu, K. C. Chan, and D. Zhu, "Surface roughening in pulse current and pulse reverse current electroforming of nickel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 91, no. 3, pp. 220-224, 1997/05/20 1997.
- [8] M. S. Chandrasekar and M. Pushpavanam, "Pulse and pulse reverse plating- Conceptual, advantages and applications," *Electrochimica Acta*, vol. 53, no. 2008, pp. 3313-3322, 2008.

- [9] นายอิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ์, "การสร้างและวิเคราะห์คุณลักษณะของไมโครแอคชูเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน," วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์, 2557.
- [10] เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ, เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า, พิมพ์ครั้งที่ 2 ed. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [11] A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical method fundamental and application*, 2 ed. 2000.
- [12] นายณัฐพล อุดมปณิธ, "การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าของโลหะผสมนิกเกิลทั้งสเตรแบบหลายชั้นที่สลับส่วนประกอบทางเคมีบนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430," ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [13] MILAN PAUNOVIC and MORDECHAY SCHLESINGER, FUNDAMENTALS OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION, SECOND EDITION ed.: JOHN WILEY & SONS, 2006. [Online]. Available.
- [14] N.IBL, "SOME THEORETICAL ASPECTS OF PULSE ELECTROLYSIS," *Surface Technology*, vol. 10, pp. 81 - 104, 1980.
- [15] N. S. Qu, D. Zhu, K. C. Chan, and W. N. Lei, "Pulse electrodeposition of nanocrystalline nickel using ultra narrow pulse width and high peak current density," *Surface and Coatings Technology* vol. 168, no. 2003, pp. 123-128, 2003.
- [16] E. A. Pavlatou and N. Spyrellis, "Influence of pulse plating conditions on the structure and properties of pure and composite nickel nanocrystalline coatings," *Russian Journal of Electrochemistry*, journal article vol. 44, no. 6, pp. 745-754, 2008.
- [17] C. K. Chung and W. T. Chang, "Effect of pulse frequency on the morphology and nanoindentation property of electroplated nickel films," *Microsystem Technologies*, journal article vol. 13, no. 5, pp. 537-541, 2007.
- [18] J. Ouyang and Y. Zhu, "Z-Shaped MEMS Thermal Actuators: Piezoresistive Self-Sensing and Preliminary Results for Feedback Control," *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, vol. 21, no. 3, pp. 596-604, 2012.
- [19] Y. Zhu, S. O. R. Moheimani, M. R. Yuce, and A. Bazaei, "Control Issues of MEMS Nanopositioning Devices," in *Nanopositioning Technologies: Fundamentals*

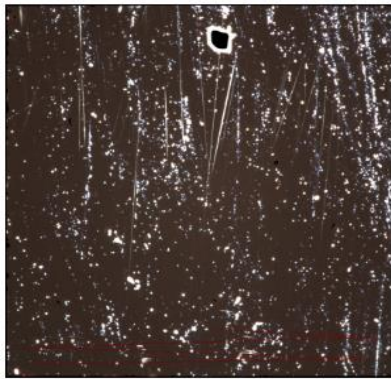
and Applications, C. Ru, X. Liu, and Y. Sun, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 325-346.

- [20] J. T. B. R. A. Kohser, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*. John Wiley & Sons, 2008.
- [21] A. Pimpin, I. Charoenbunyarit, and W. Srituravanich, "Material and performance characterization of Z-shaped nickel electrothermal micro-actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 253, pp. 49-58, 1/1/ 2017.

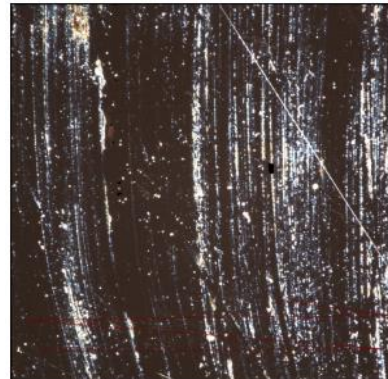




ภาคผนวก ก. ลักษณะผิวของชิ้นงาน

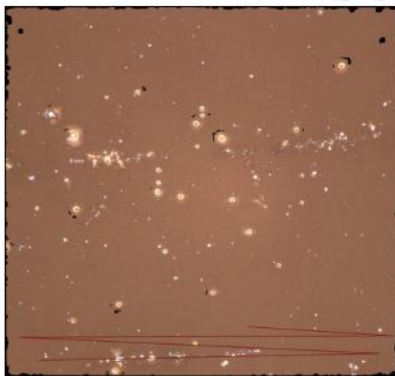


(ก)

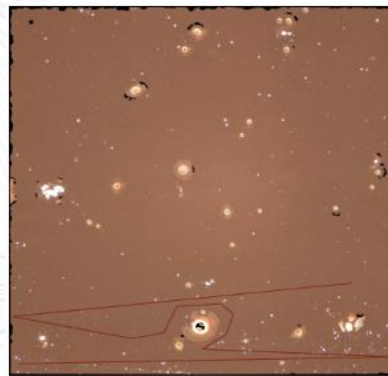


(ข)

รูปที่ ก.1 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงชั้นที่ 1 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

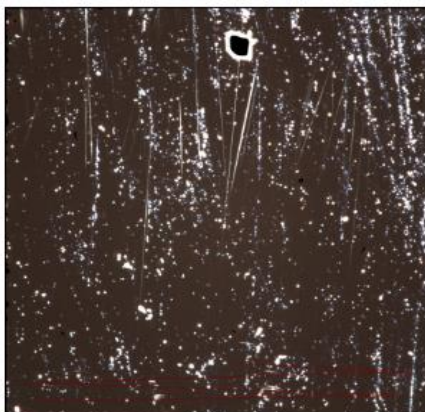


(ก)

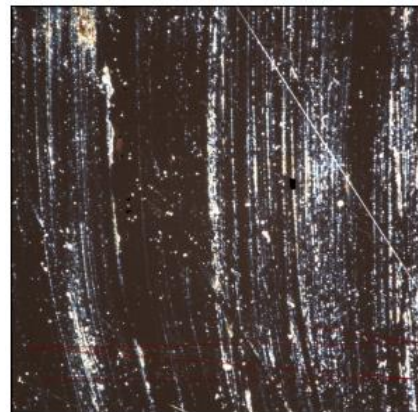


(ข)

รูปที่ ก.2 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงชั้นที่ 2 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

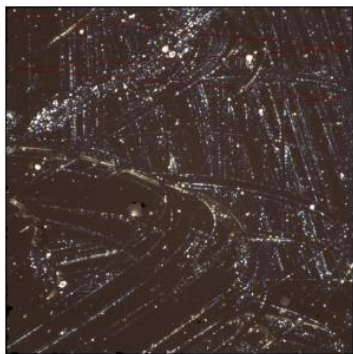


(ก)

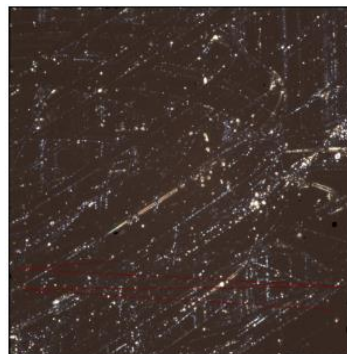


(ข)

รูปที่ ก.3 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงชั้นที่ 3 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

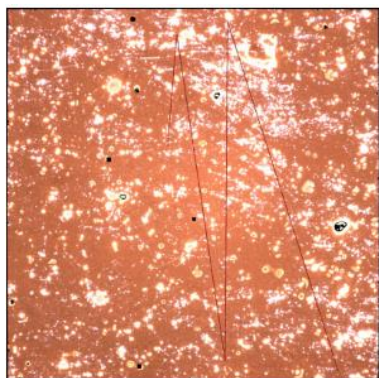


(ก)

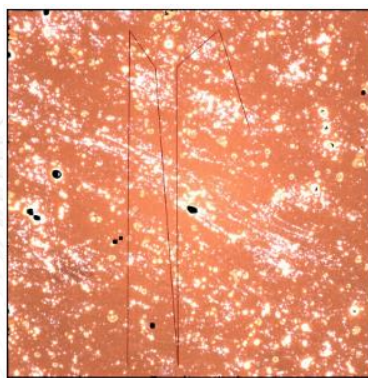


(ข)

รูปที่ ก.4 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ 4 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

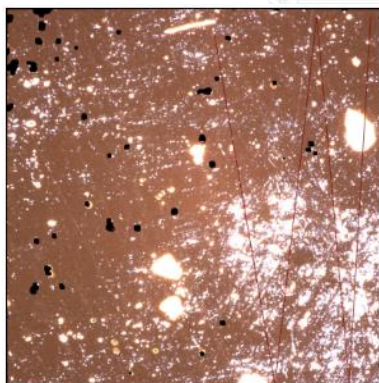


(ก)

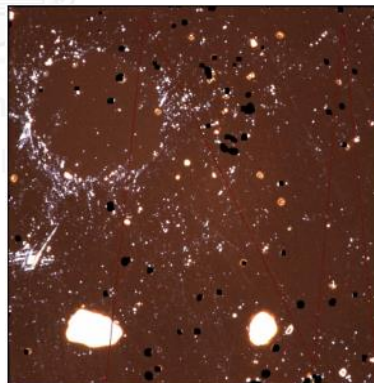


(ข)

รูปที่ ก.5 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ 5 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

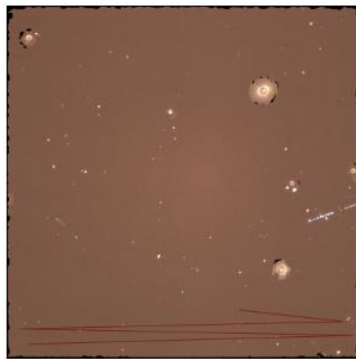


(ก)

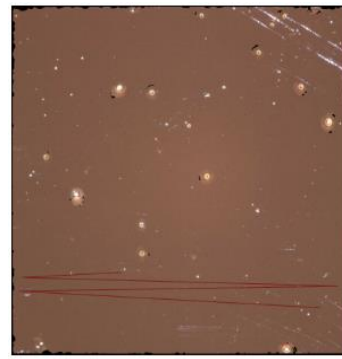


(ข)

รูปที่ ก.6 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ 6 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

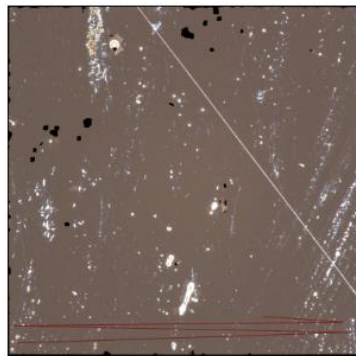


(ก)

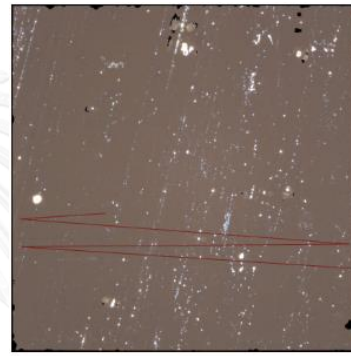


(ข)

รูปที่ ก.7 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 1 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.8 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 2 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

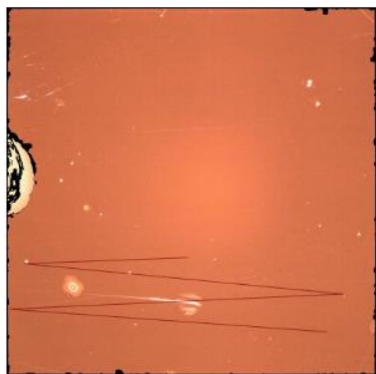


(ก)

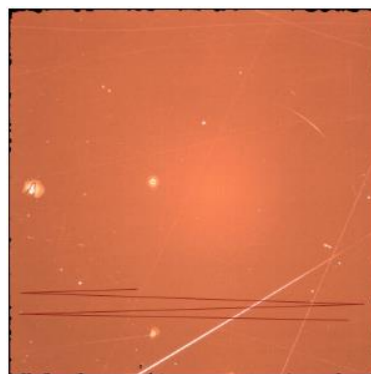


(ข)

รูปที่ ก.9 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 3 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

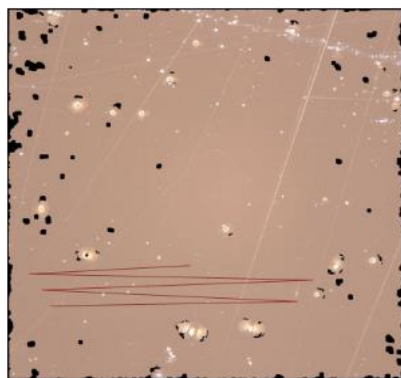


(ก)

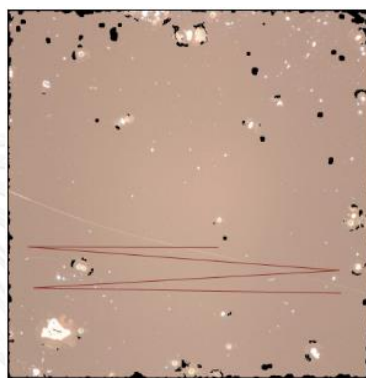


(ข)

รูปที่ ก.10 ชิ้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 4 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

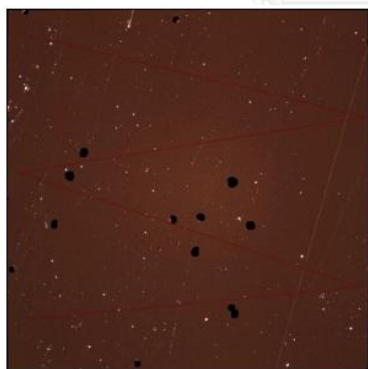


(ก)

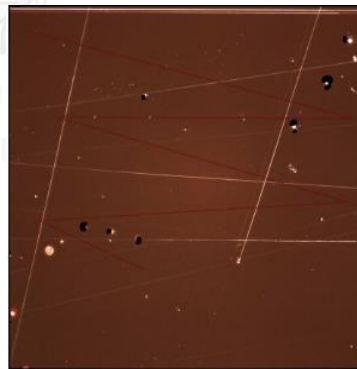


(ข)

รูปที่ ก.11 ชิ้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 5 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

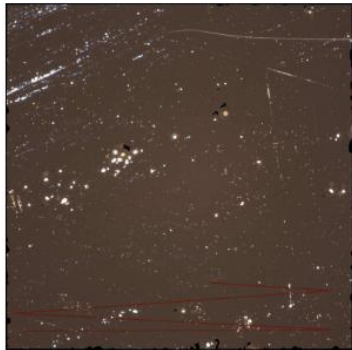


(ก)

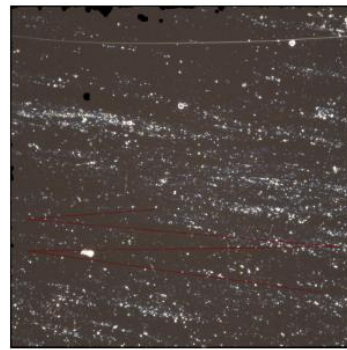


(ข)

รูปที่ ก.12 ชิ้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 10 Hz ชั้นที่ 6 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

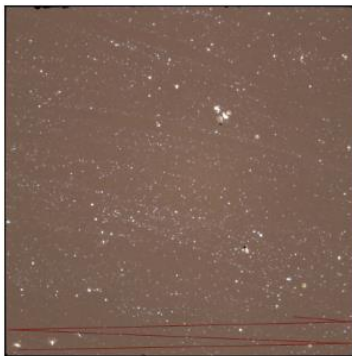


(ก)

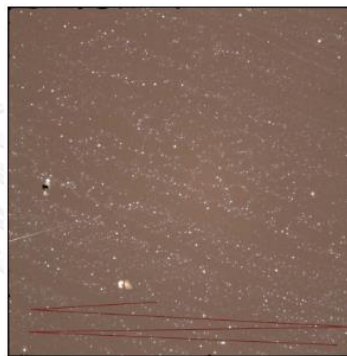


(ข)

รูปที่ ก.13 ชั้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 1 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

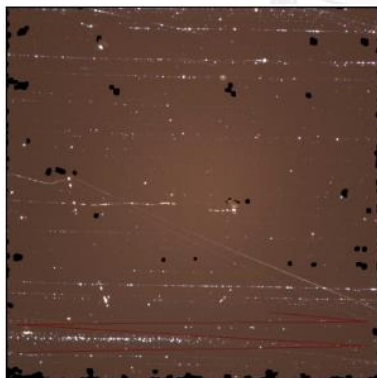


(ก)

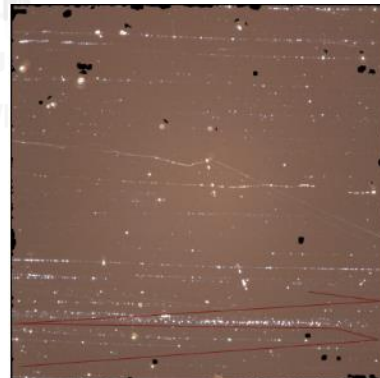


(ข)

รูปที่ ก.14 ชั้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 2 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

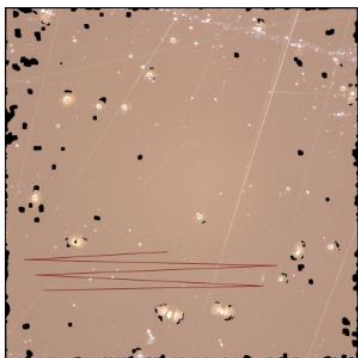


(ก)

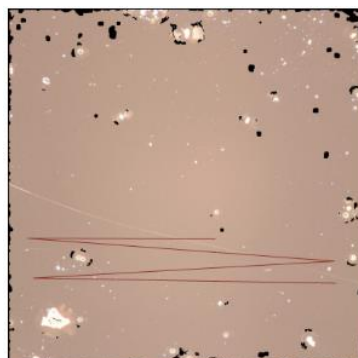


(ข)

รูปที่ ก.15 ชั้นงานที่ได้จากการซูปไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 3 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

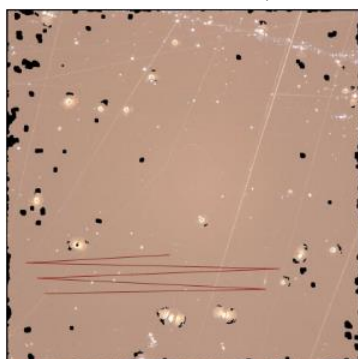


(ก)

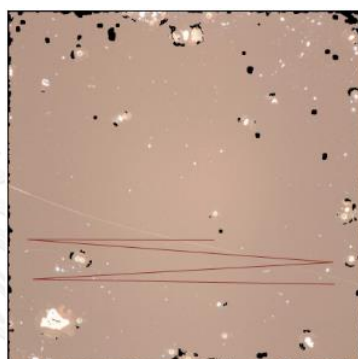


(ข)

รูปที่ ก.16 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 4 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

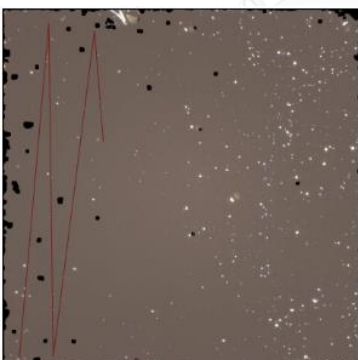


(ก)



(ข)

รูปที่ ก.17 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 5 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.18 ชิ้นงานที่ได้จากการชุบไฟฟ้าแบบช่วงที่ความถี่ 200 Hz ชั้นที่ 6 (ก) พื้นที่ 1 (ข) พื้นที่ 2

ภาคผนวก ข. การสอบเทียบเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

การนำเซนเซอร์ ไปใช้งานจำเป็นต้องทราบถึง ความแม่นยำของตัวเซนเซอร์ว่าเหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่ ซึ่งในการสอบเทียบตัวเซนเซอร์วัดกระแส จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดกระแส โดยเทียบกับค่าที่อ่านได้เครื่องเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้ โดยในการทดสอบนี้ได้ใช้ มัลติมิเตอร์ในการอ่านค่าดังรูปที่ ข.1 จากก็ทำการบันทึกผล ซึ่งผลที่ได้ เป็นดังตารางที่ ข.1 ในส่วนของการสอบเทียบความต่างศักย์จะให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าจากโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยตรง ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ ข.2

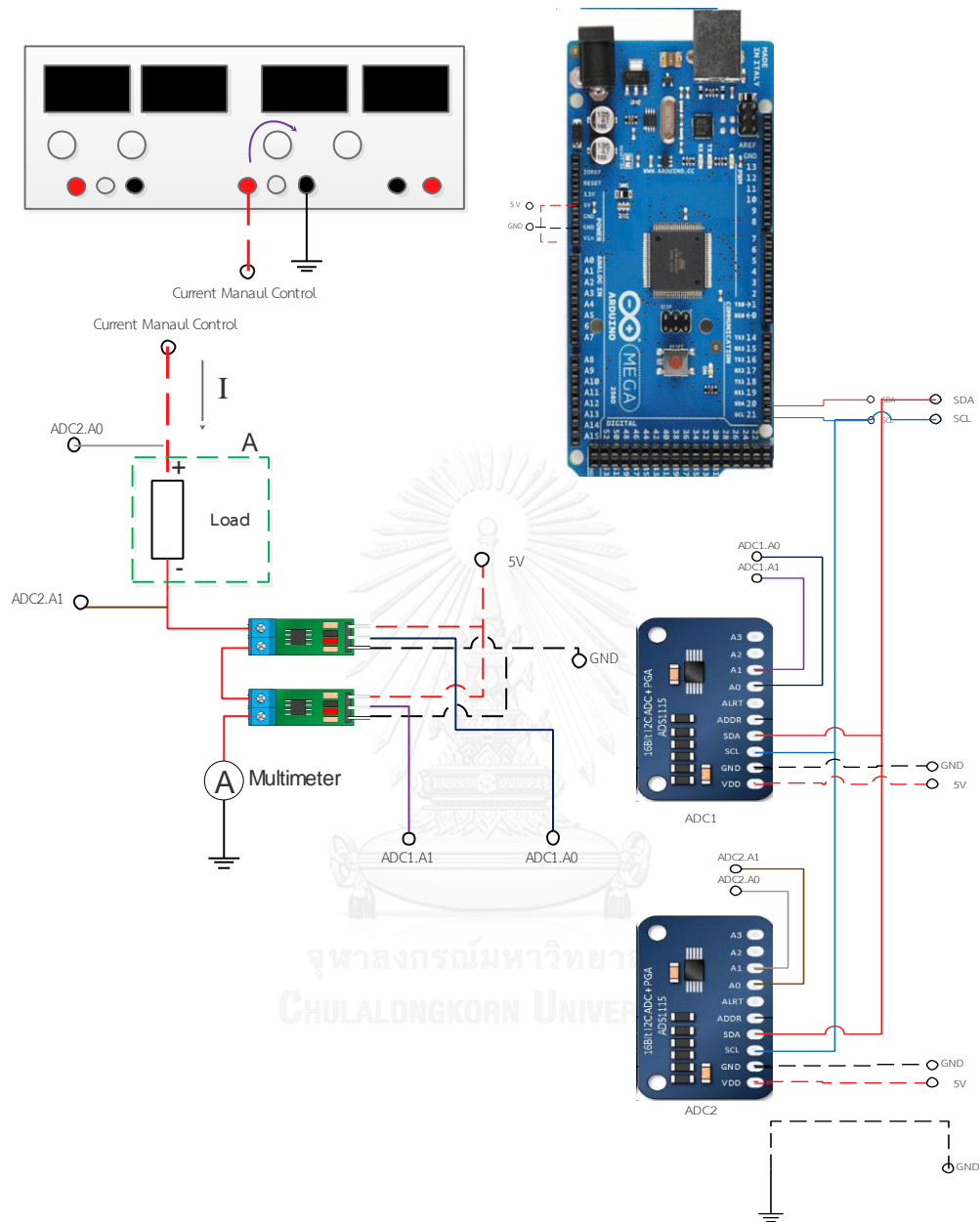
จากผลการสอบเทียบ พบว่าตัวเซนเซอร์วัดกระแสมี ความแม่นยำอยู่มากกว่า 95 % และมีความละเอียดระดับ 1 mA ดังจากตรงนี้จะเห็นได้ว่าตัวเซนเซอร์สามารถ นำมาใช้ในการประยุกต์ใช้งานไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้ ส่วนของการวัดความต่างศักย์มีความผิดพลาดอยู่ที่ 3mV

ตารางที่ ข.1 ตารางผลการสอบเทียบ Current Sensor

Current	Repeat				
	1	2	3	4	5
65.00	65.71	66.35	66.22	66.18	66.12
99.30	99.89	99.70	99.84	99.94	99.73
181.20	180.99	181.14	180.71	181.02	181.30
315.00	315.13	315.48	315.08	315.21	314.99

ตารางที่ ข.2 ตารางผลการสอบเทียบการอ่านค่าศักย์ไฟฟ้า

Volt	Repeat		
	1	2	3
16.30	13.88	13.91	14.12
25.00	23.14	23.46	23.45
37.80	35.88	35.48	35.92
58.40	54.16	54.35	54.69
90.00	87.65	87.18	87.26



รูปที่ ข.1 วงจรไฟฟ้าสำหรับการสอบเทียบ Current Sensor

ภาคผนวก ค. การคำนวณสำหรับการเลือกที่ระบายความร้อน

ตัวระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการใช้งานมอสเฟส รุ่น IRL510 ที่กระแสไฟฟ้ามากกว่า 2 A เพราะเมื่อ ทำงานที่กระแสสูงจะทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถทนความร้อนได้นอกจากนี้ ยังสามารถช่วยให้กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ได้ ซึ่งมีข้อกำหนดในการเลือกที่ระบายความร้อนดังนี้

- มอสเฟสทำงานที่กระแสสูงสุด , $I_D = 3 \text{ A}$
- อุณหภูมิสภาพแวดล้อม , $T_A = 35 \text{ }^\circ\text{C}$
- อุณหภูมิสูงสุดที่มอสเฟส สามารถทนได้ $175 \text{ }^\circ\text{C}$
- ความต้านทานมอสเฟส , $R_{ds} = 0.8 \text{ } \Omega$
- ต้องการให้ Junction , T_J มีอุณหภูมิไม่เกิน $100 \text{ }^\circ\text{C}$

โดยการคำนวณเริ่มจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปเป็นความร้อน

$$P_D = I^2 R$$

$$P_D = (3)^2 (0.8) = 7.2 \text{ W}$$

จาก จากรูปที่ ข.1 ซึ่งเป็นภาพบอกลักษณะทางกายภาพของมอสเฟส แปลงเป็นแผนภาพความต้านทานทางความร้อน ดังรูป ข.2 สามารถคำนวณ ค่าความต้านทานทางความร้อนของ ตัวระบายได้ จาก

$$P_D = \frac{T_J - T_A}{R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}}$$

$$R_{SA} = \frac{T_J - T_A - R_{JC} P_D - R_{CS} P_D}{P_D}$$

$$R_{SA} = \frac{100 - 35 - (3.5)(7.2) - (0.5)(7.2)}{7.2} = 6.03 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

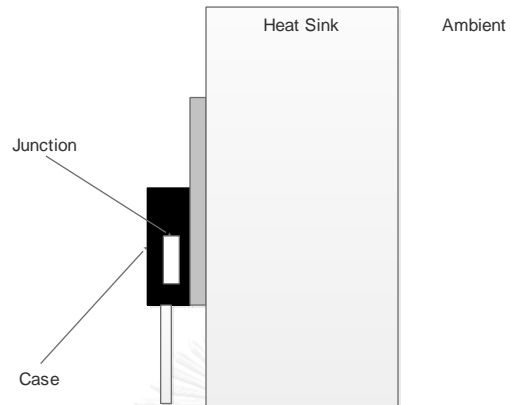
P_D : กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเป็นความร้อน

R_{SA} : ความต้านทานทางความร้อนของตัวระบายความร้อน

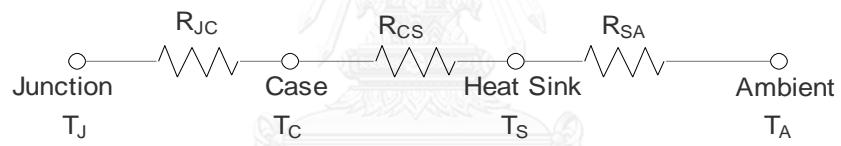
R_{CS} : ความต้านทานทางความร้อนที่เกิดขึ้น จากตัวถังมอสเฟสกับตัวระบายความร้อน

R_{JC} : ความต้านทานทางความร้อนที่เกิดขึ้น จากอุปกรณ์ภายในกับตัวถัง

จากการคำนวณ มีความหมายว่าหากต้องการให้อุณหภูมิของ Junction ไม่เกิน $100 \text{ }^\circ\text{C}$ จะต้องเลือกตัวระบายความร้อนที่มี ค่าความต้านทานทางความร้อนที่ต่ำกว่า $6.03 \text{ }^\circ\text{C/W}$

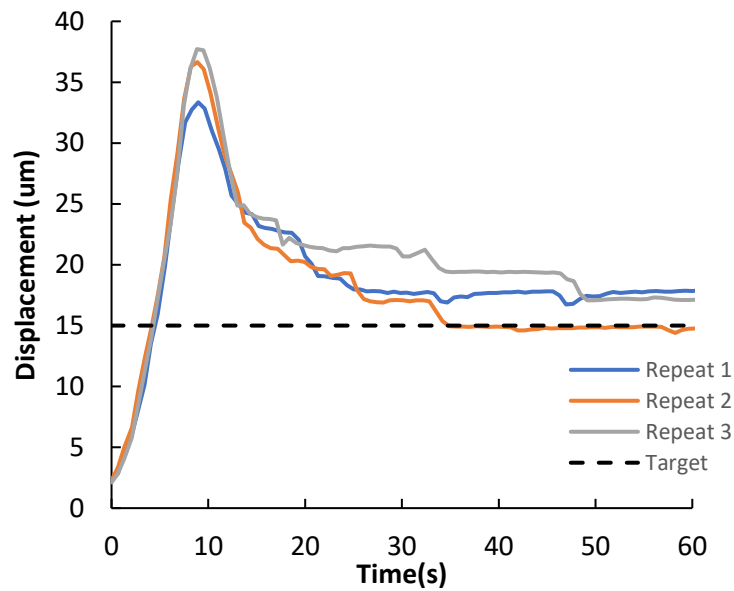


รูปที่ ข.1 ภาพแสดงโครงสร้างทางกายภาพของมอสเฟส

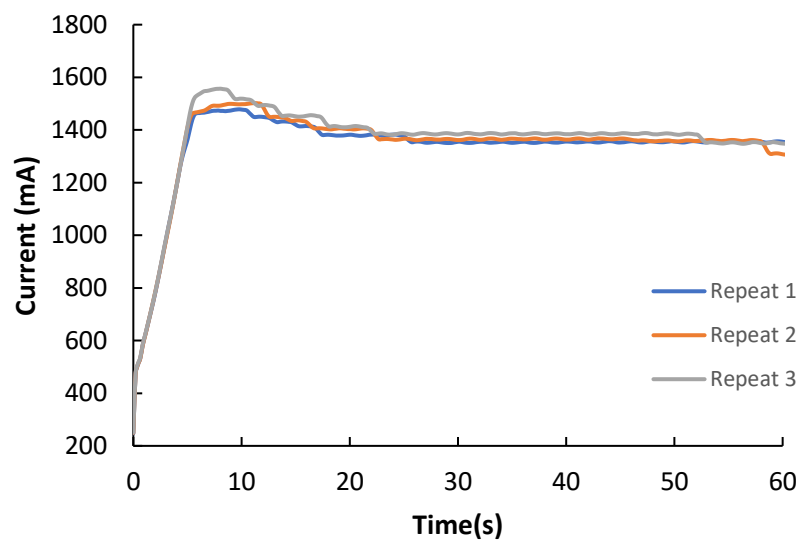


รูปที่ ข.2 แผนภาพความต้านทานความร้อน

ภาคผนวก ง. ข้อมูลการควบคุมไมโครแอกซ์เวเตอร์

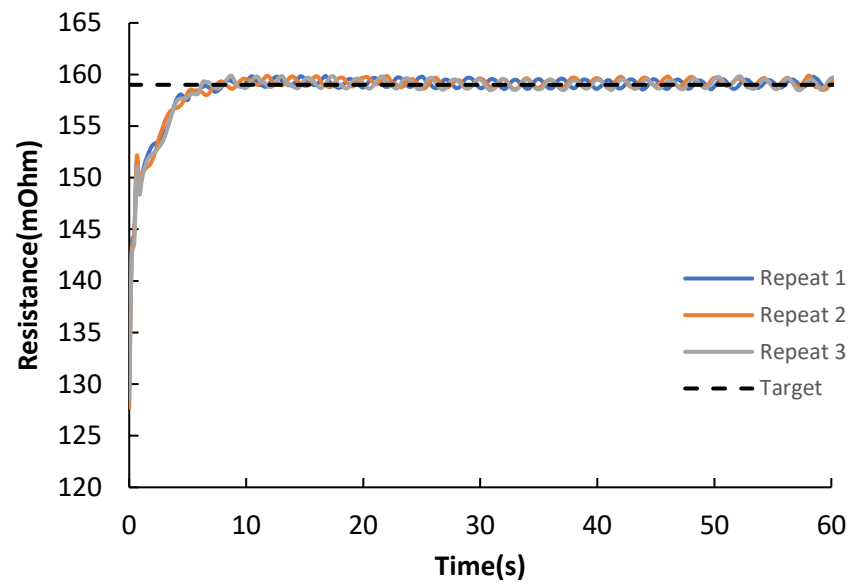


(ก)

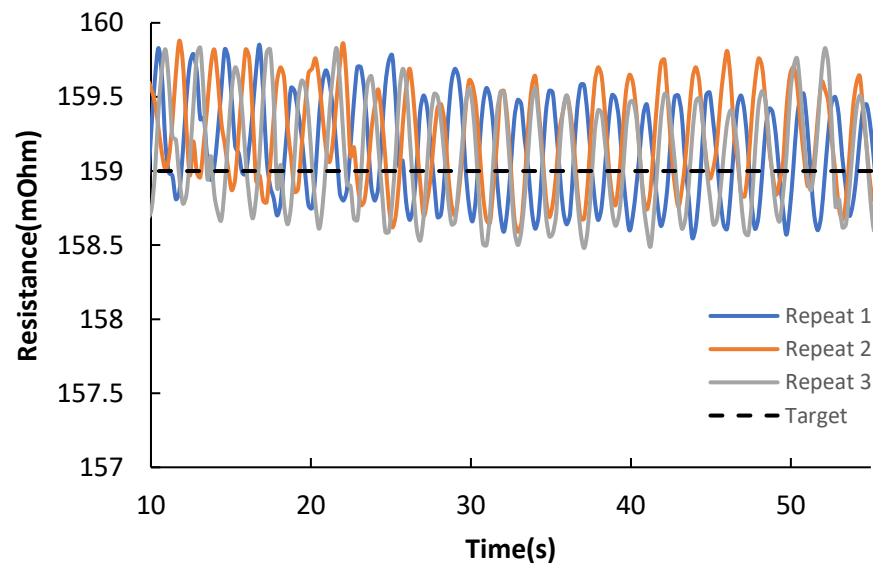


(ข)

รูปที่ ง.1 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่หนึ่ง (ก) คำสั่ง 15 µm (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 15 µm

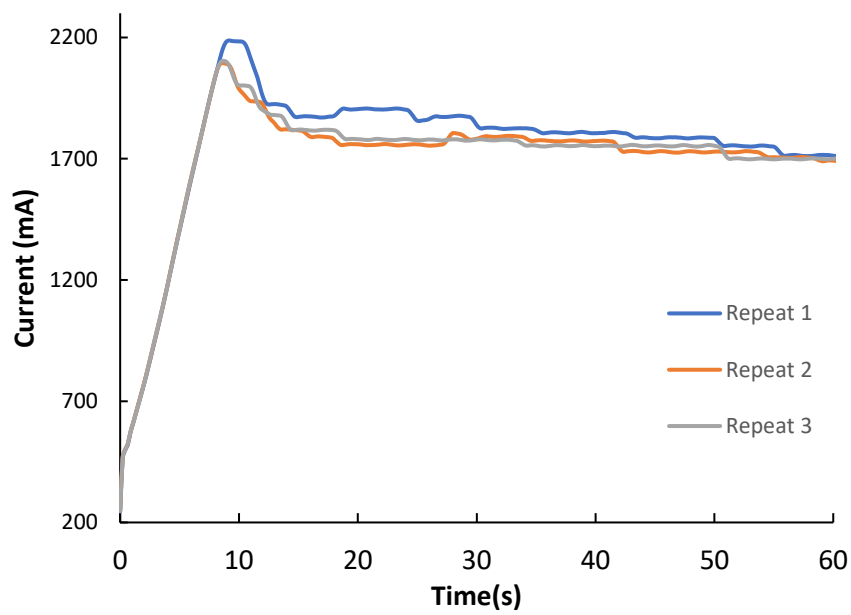
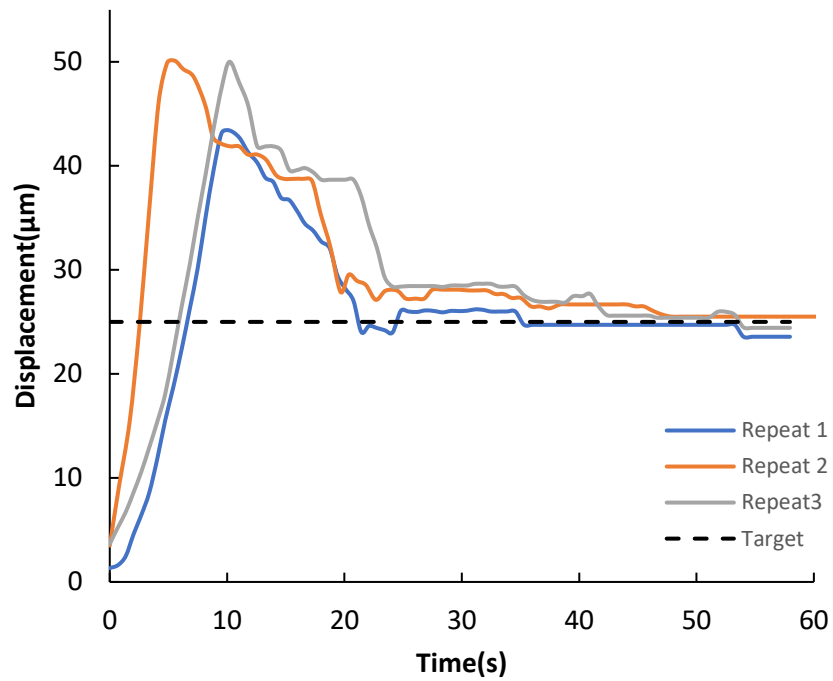


(ค)



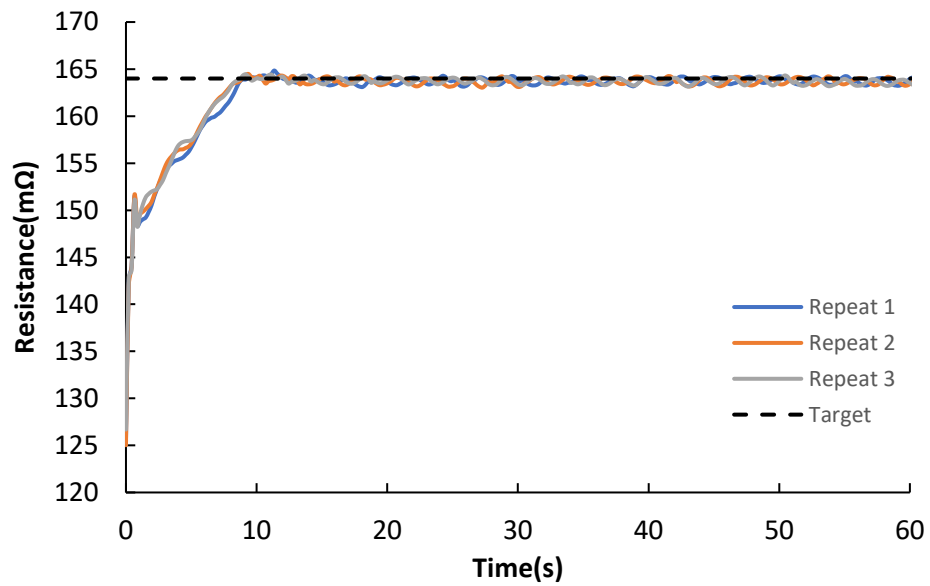
(ง)

รูปที่ ง.2 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่หนึ่ง (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 15 μm (ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 15 μm

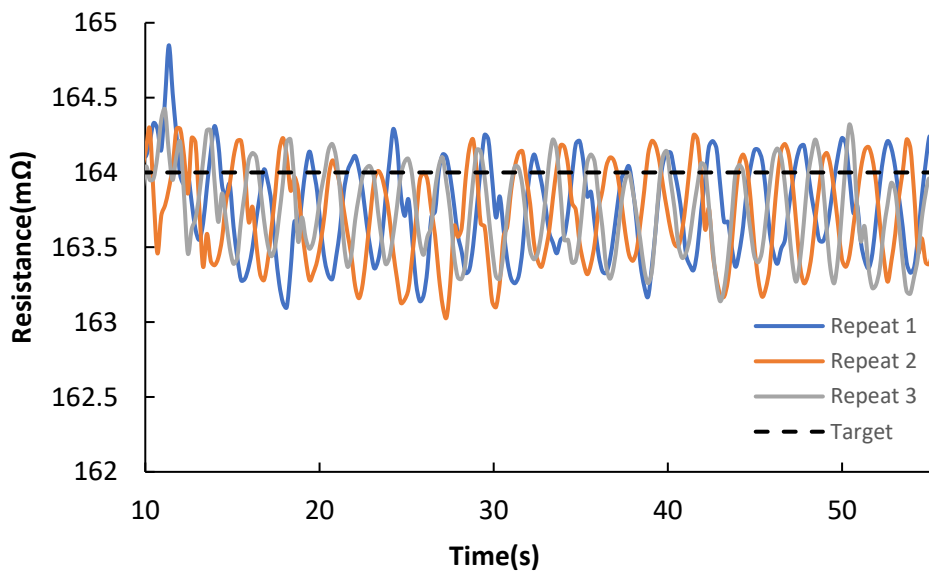


(ข)

รูปที่ 3 ผลการตอบสนองไมโครแอกชูเอเตอร์ตัวที่หนึ่ง (ก) คำสั่ง 25 μm (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 25 μm

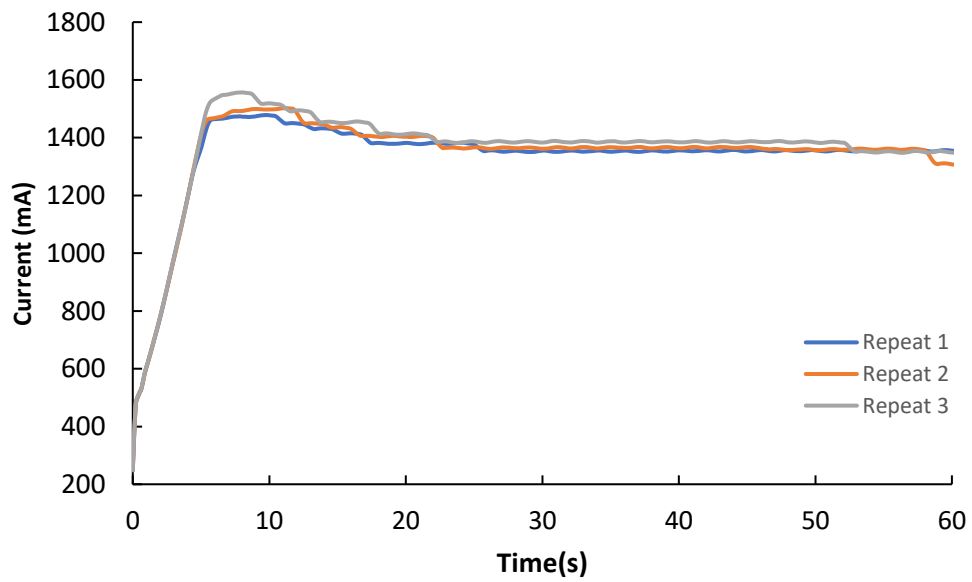
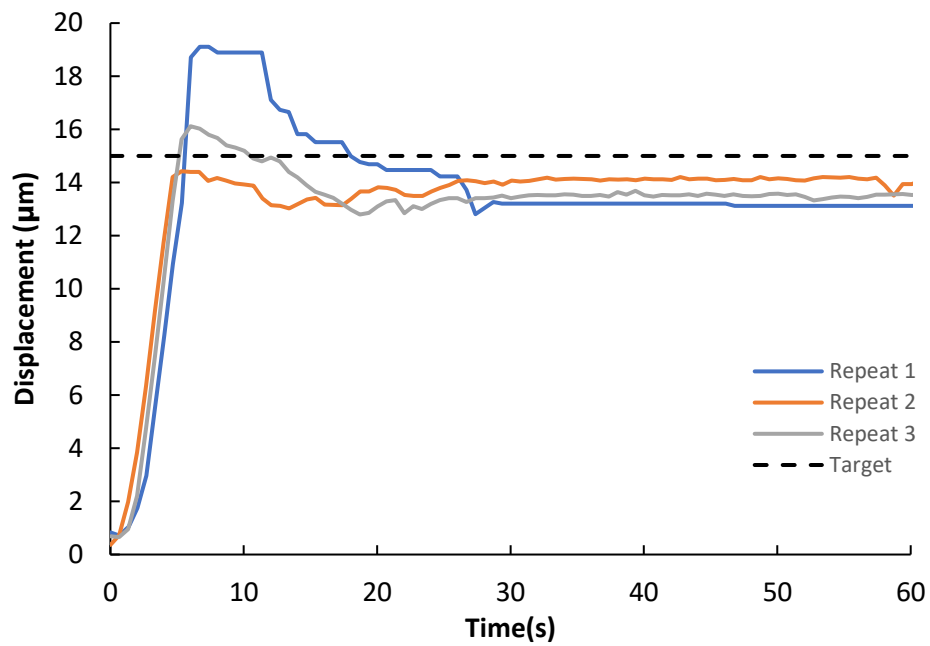


(ก)



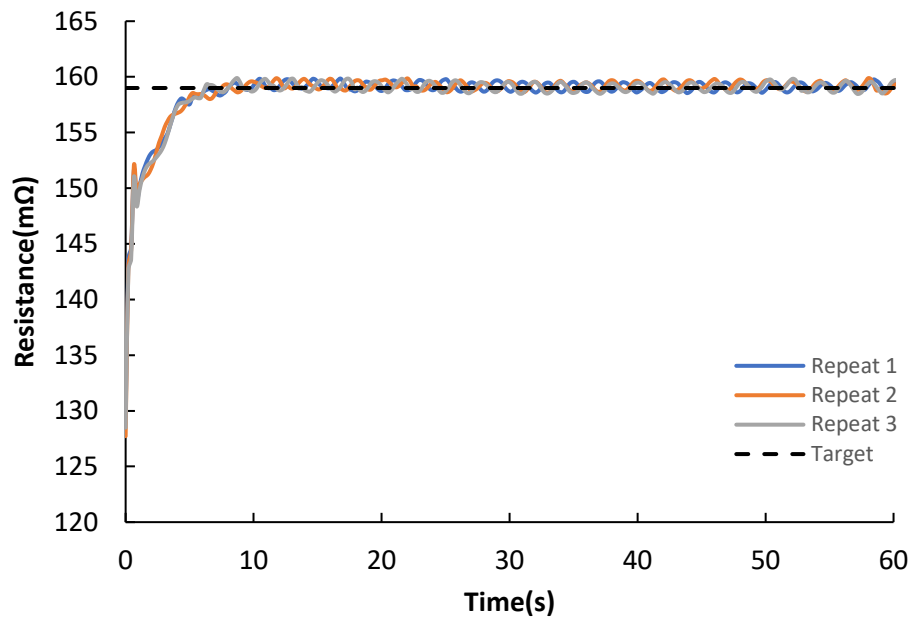
(ง)

รูปที่ ๔.4 ผลการตอบสนองไมโครแอดชัวเอเตอร์ตัวที่หนึ่ง (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 25 μm (ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 25 μm

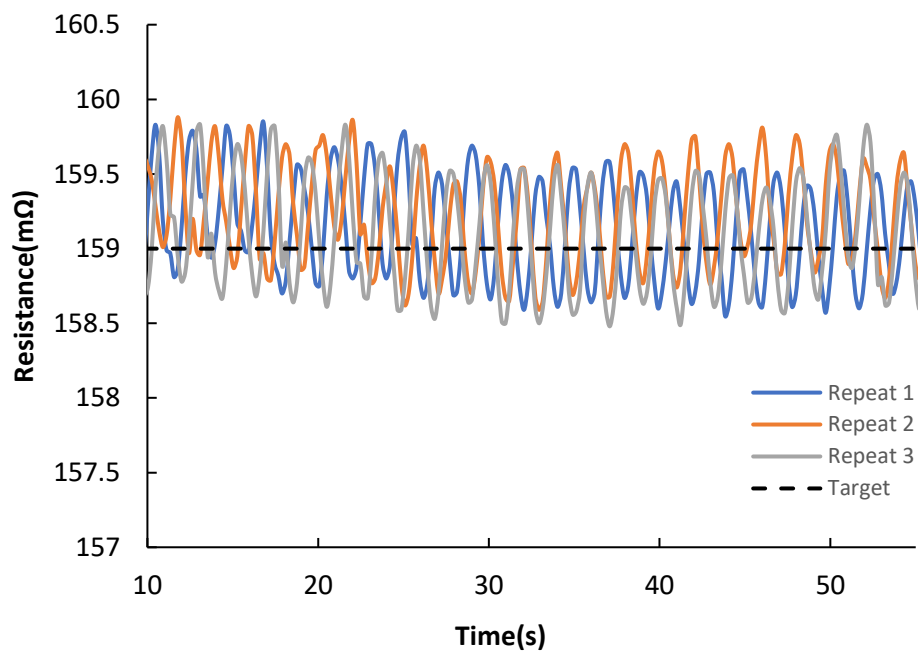


(ข)

รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนองไมโครแอกชูเอเตอร์ตัวที่สอง (ก)คำสั่ง 15 μm (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 15 μm

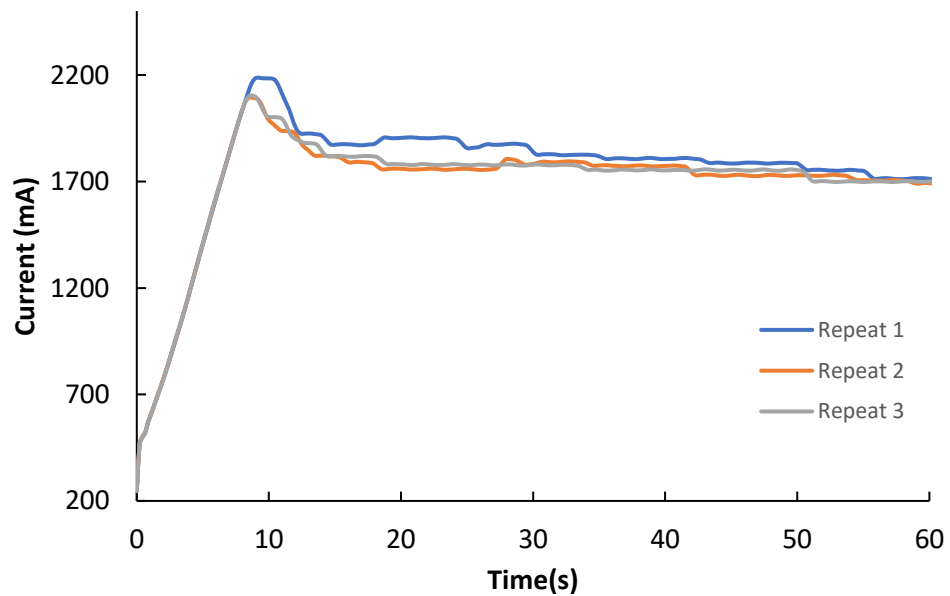
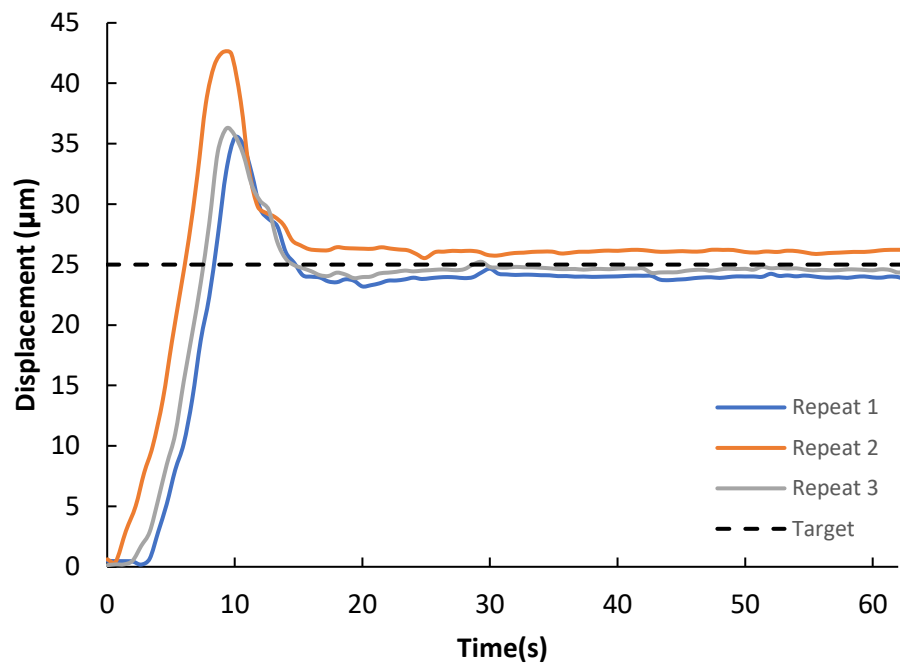


(ก)



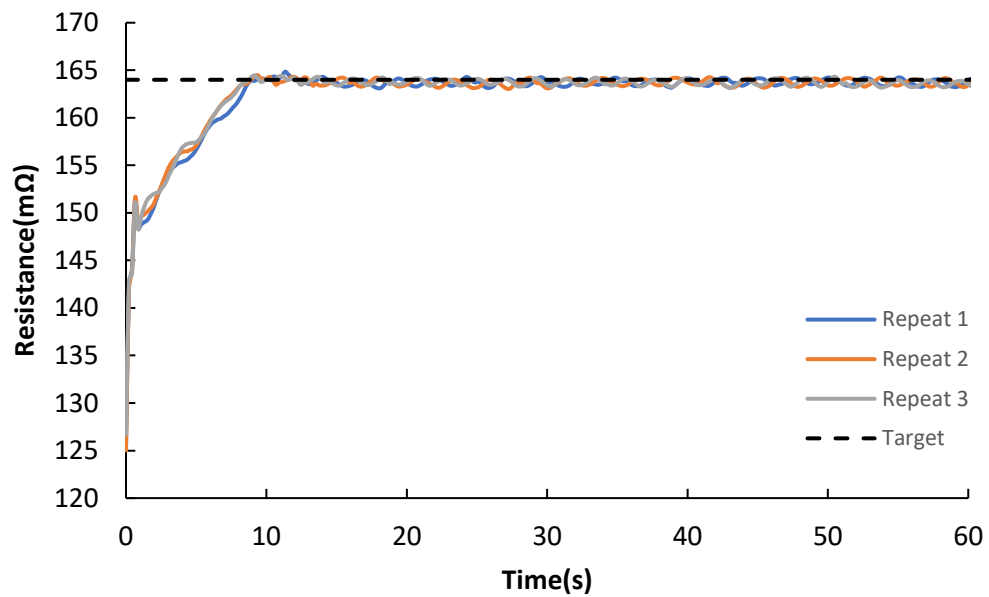
(ง)

รูปที่ ง.6 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่สอง (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 15 μm
 (ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 15 μm

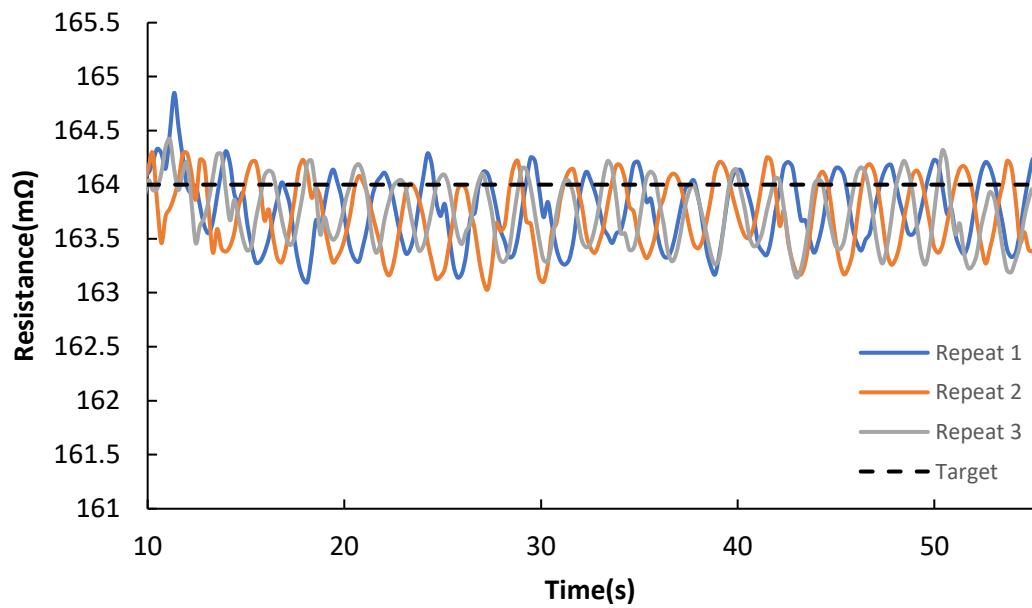


(ข)

รูปที่ ๗.7 ผลการตอบสนองไมโครแอกชูเอเตอร์ตัวที่สอง (ก) คำสั่ง 25 μm (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 25 μm

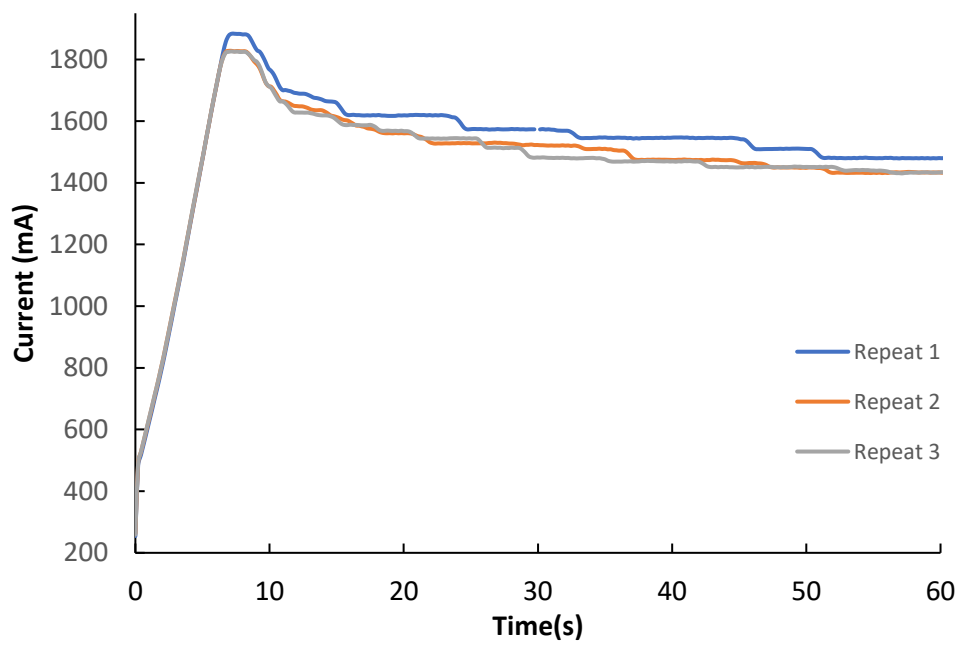
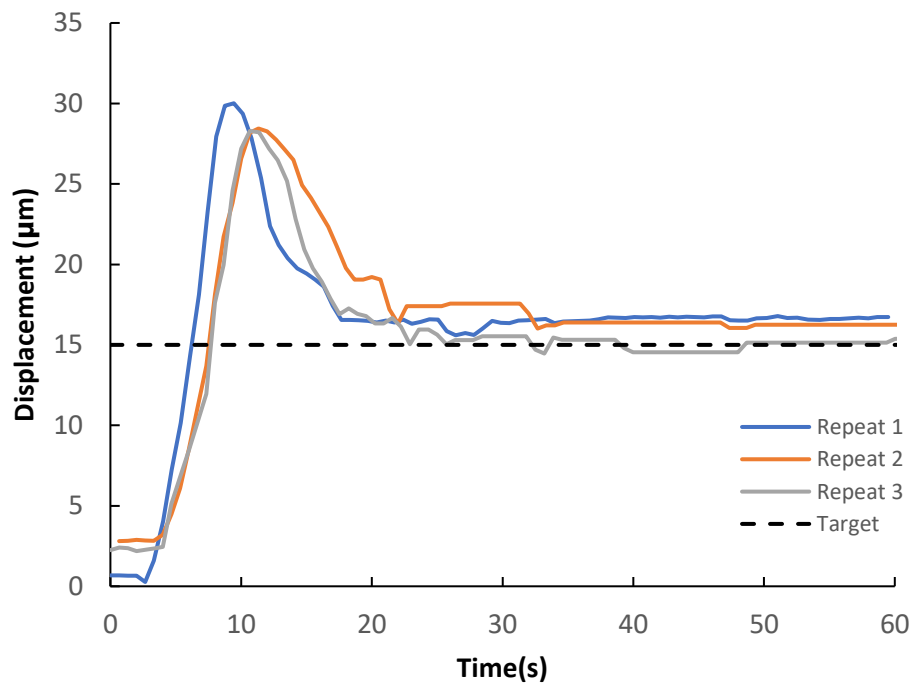


(ก)



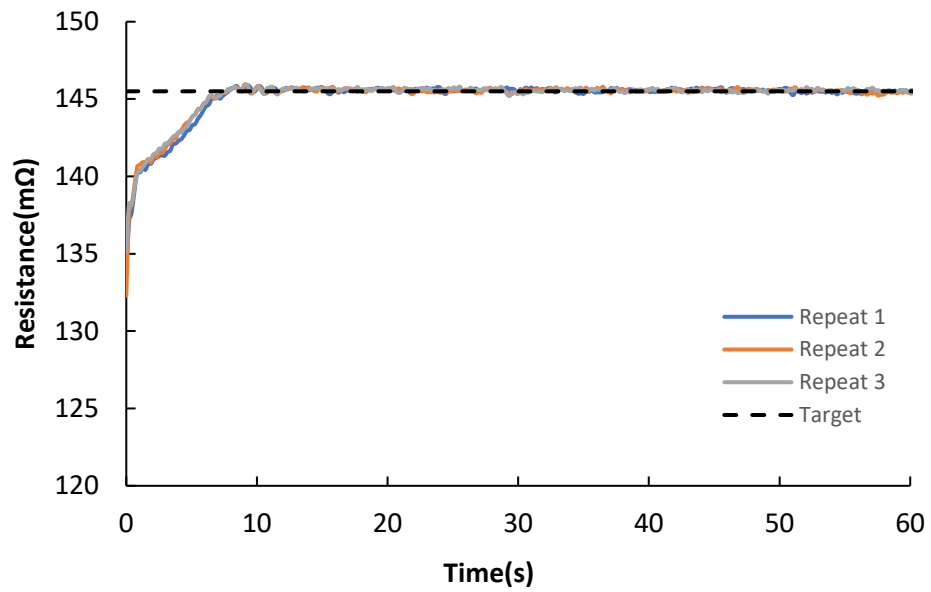
(ข)

รูปที่ ง.8 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่สอง (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 25 μm
(ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 25 μm

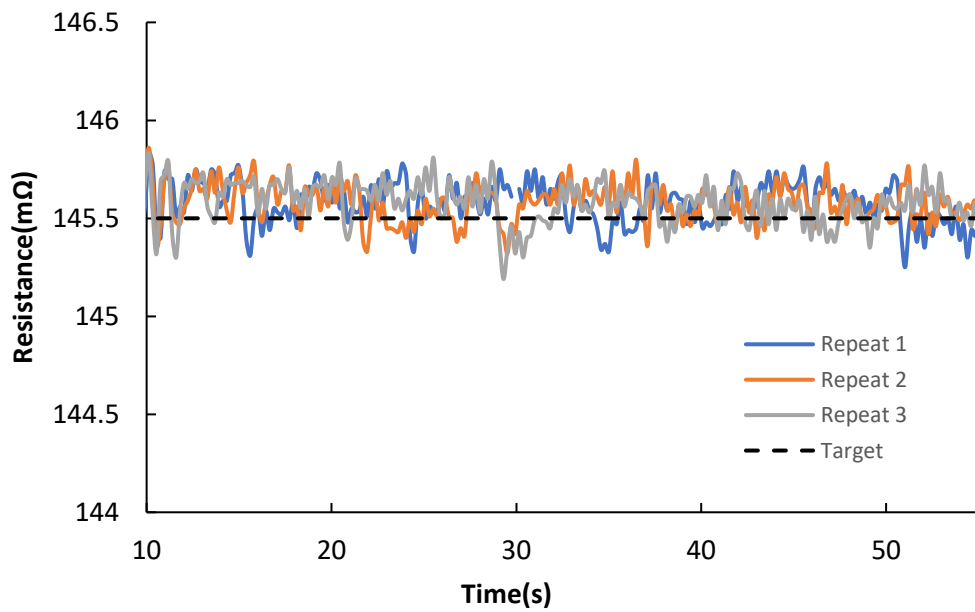


(ข)

รูปที่ ง.9 ผลการตอบสนองไมโครแอกชูเอเตอร์ตัวที่สาม (ก)คำสั่ง 15 μm (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง 15 μm

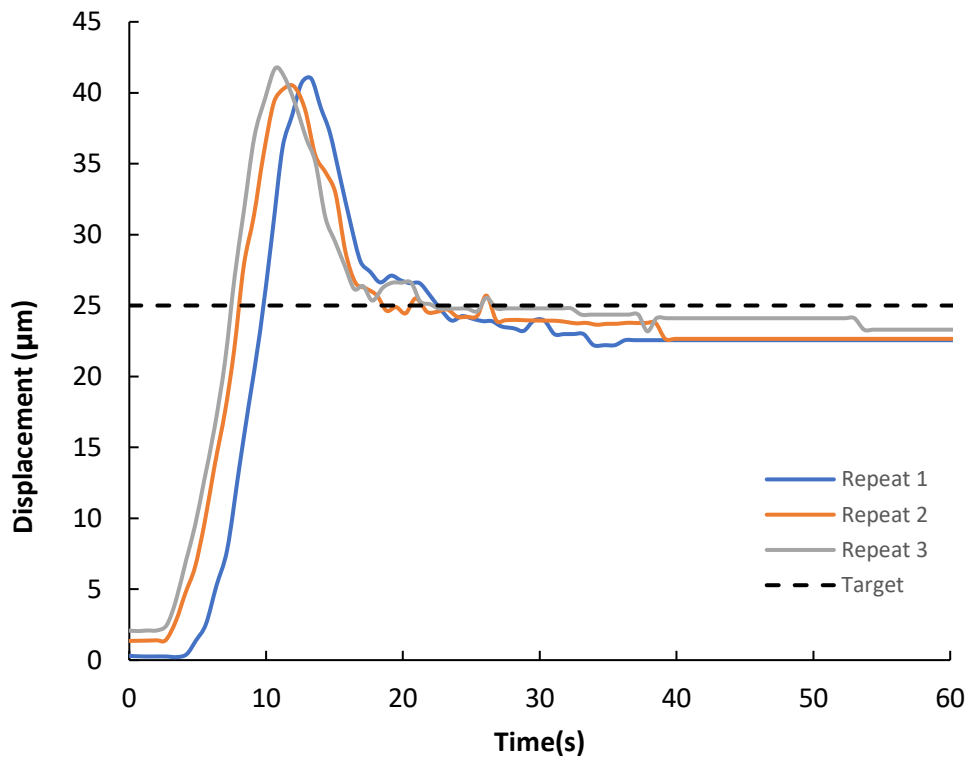


(ก)

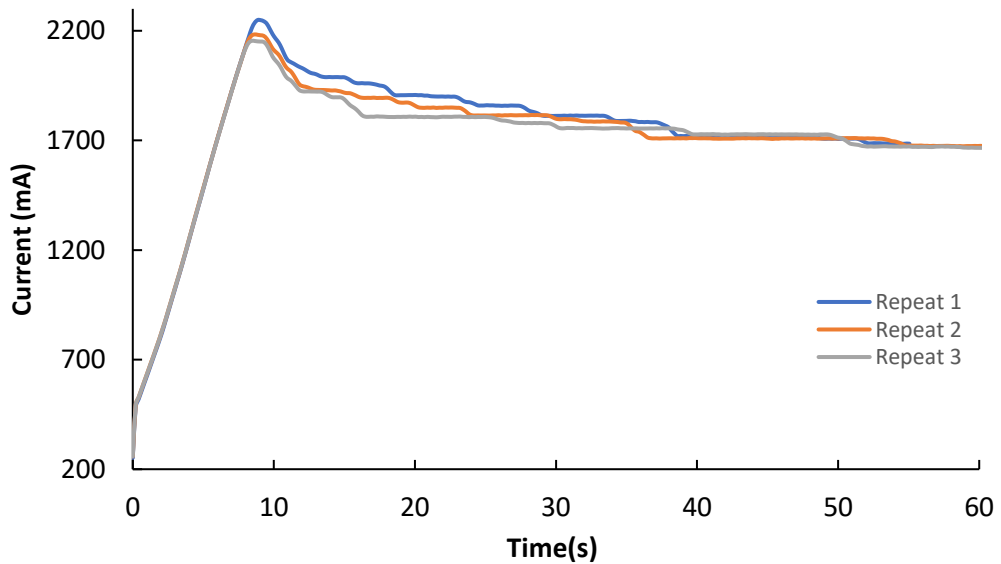


(ง)

รูปที่ ง.10 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่สาม (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 15 μm (ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 15 μm

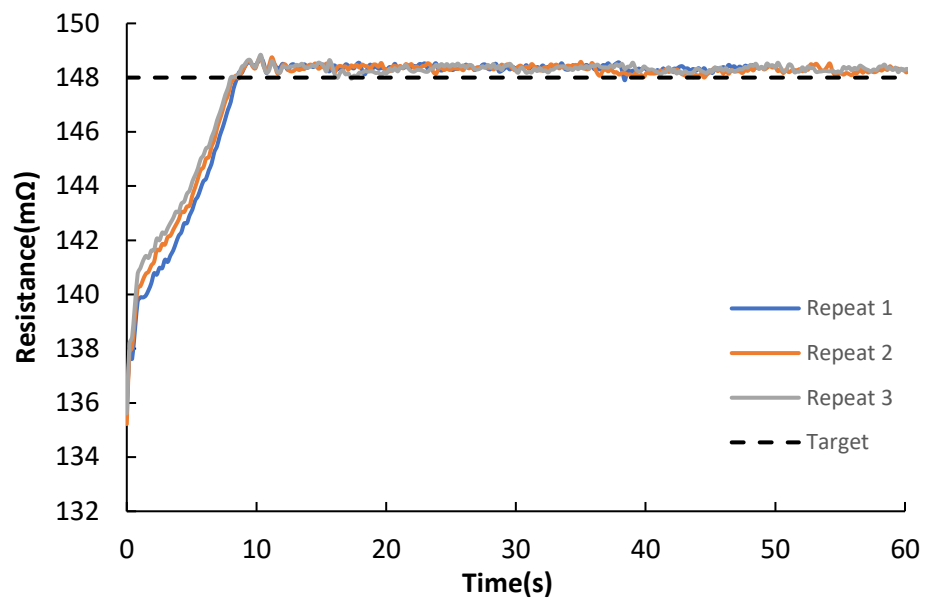


(ก)

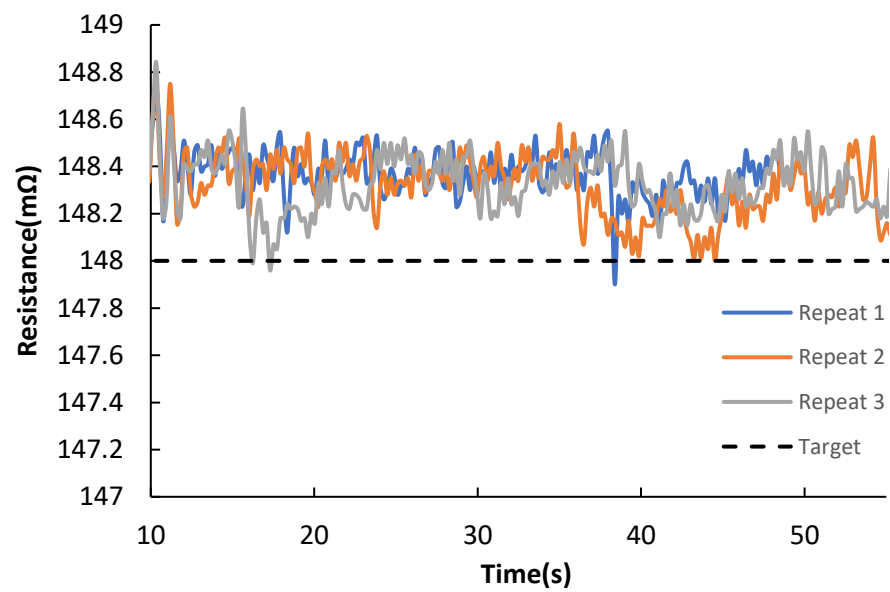


(ข)

รูปที่ ง.11 ผลการตอบสนองไมโครแอกชูเอเตอร์ตัวที่สาม (ก) คำสั่ง $25 \mu\text{m}$ (ข) กระแสไฟฟ้าจากการสั่ง $25 \mu\text{m}$



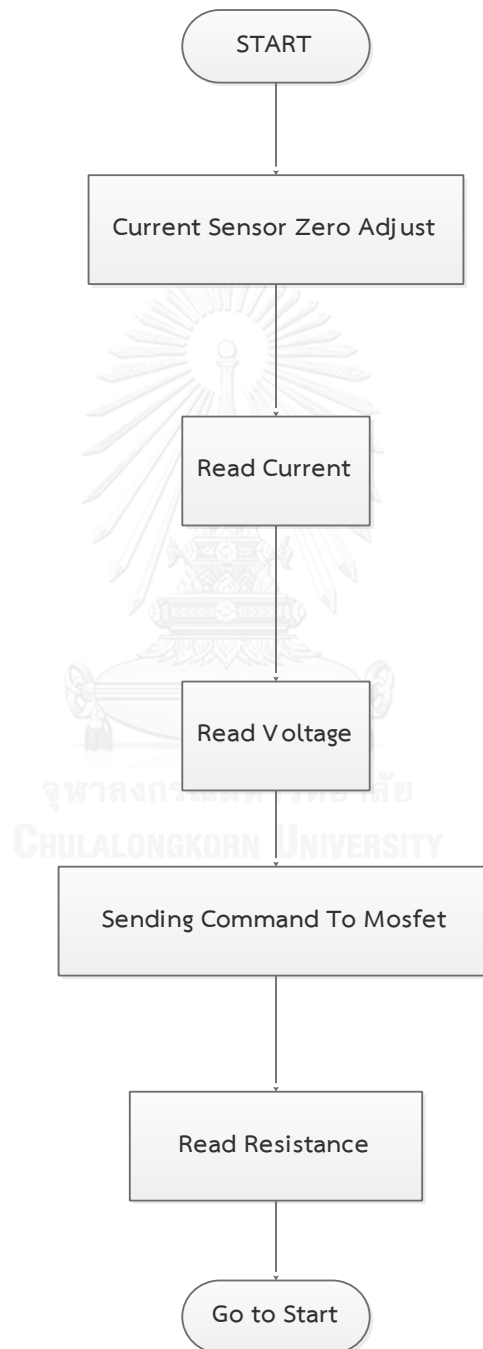
(ก)



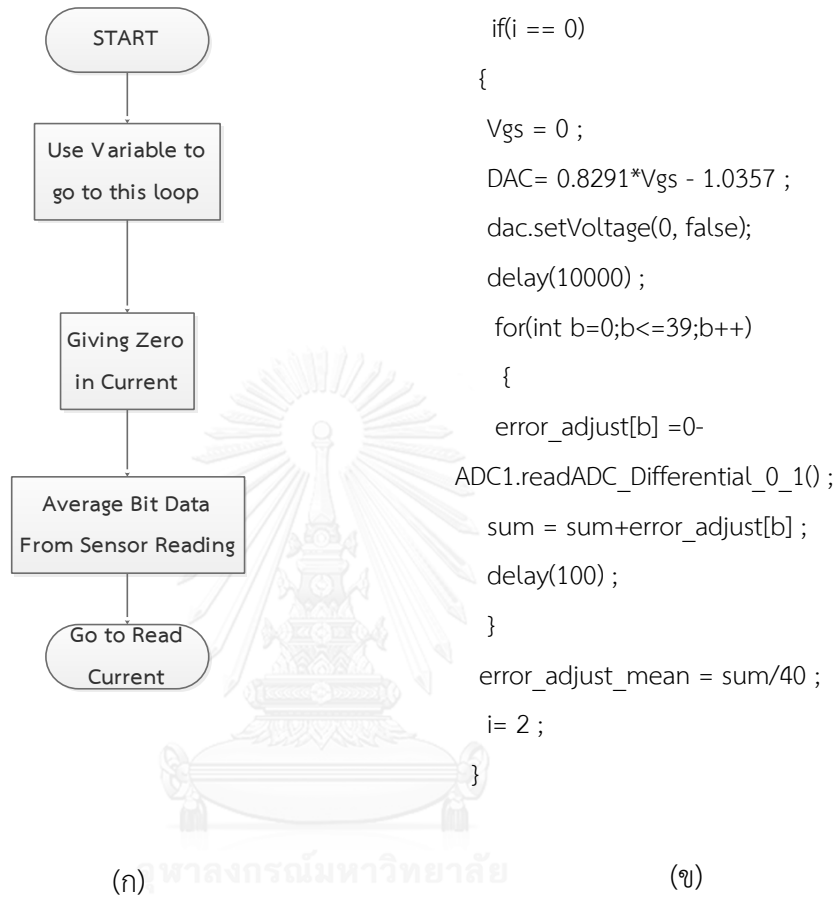
(ข)

รูปที่ ง.12 ผลการตอบสนองไมโครแอกซ์เวเตอร์ตัวที่สาม (ก) ค่าความต้านทานจากการสั่ง 25 μm (ข) ค่าความต้านทาน ณ วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 55 จากการสั่ง 25 μm

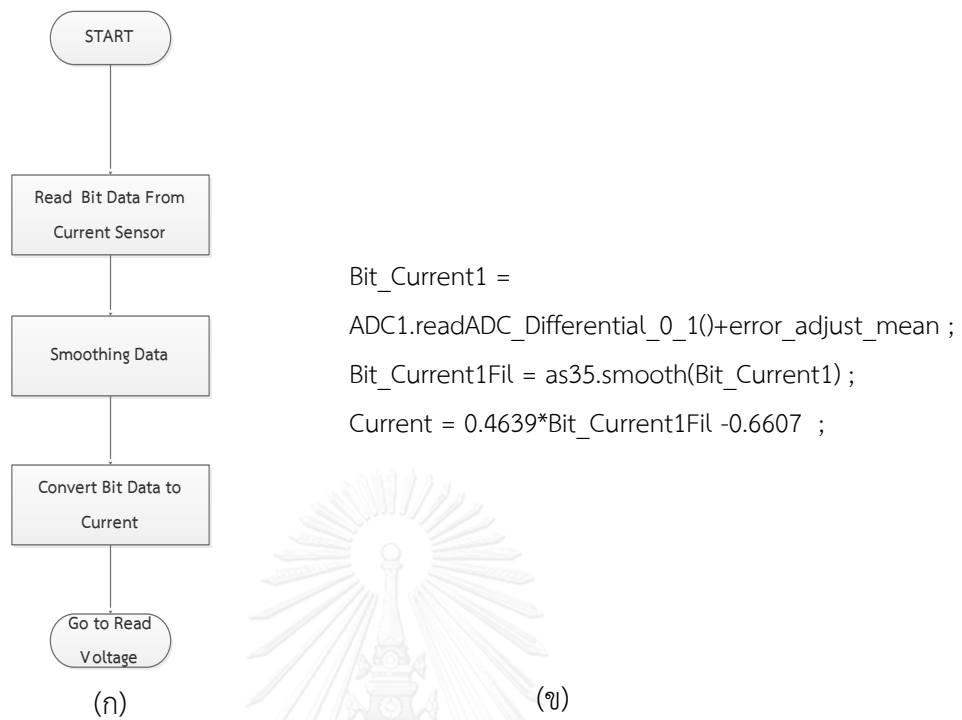
ภาคผนวก จ. โค้ดโปรแกรมและผังงาน



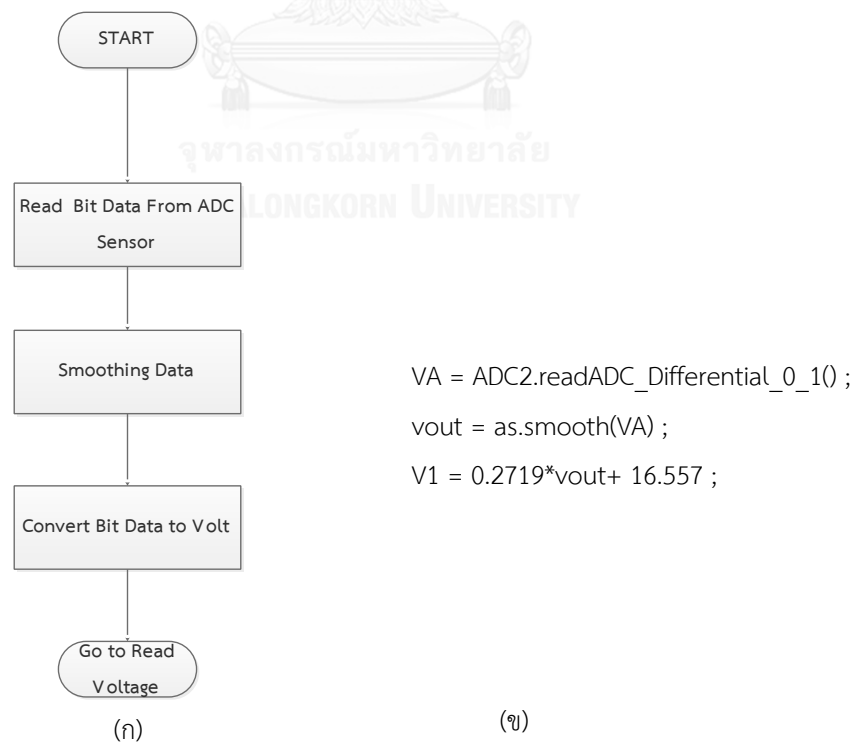
รูปที่ จ.1 ภาพแสดงผังการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการ Characterization



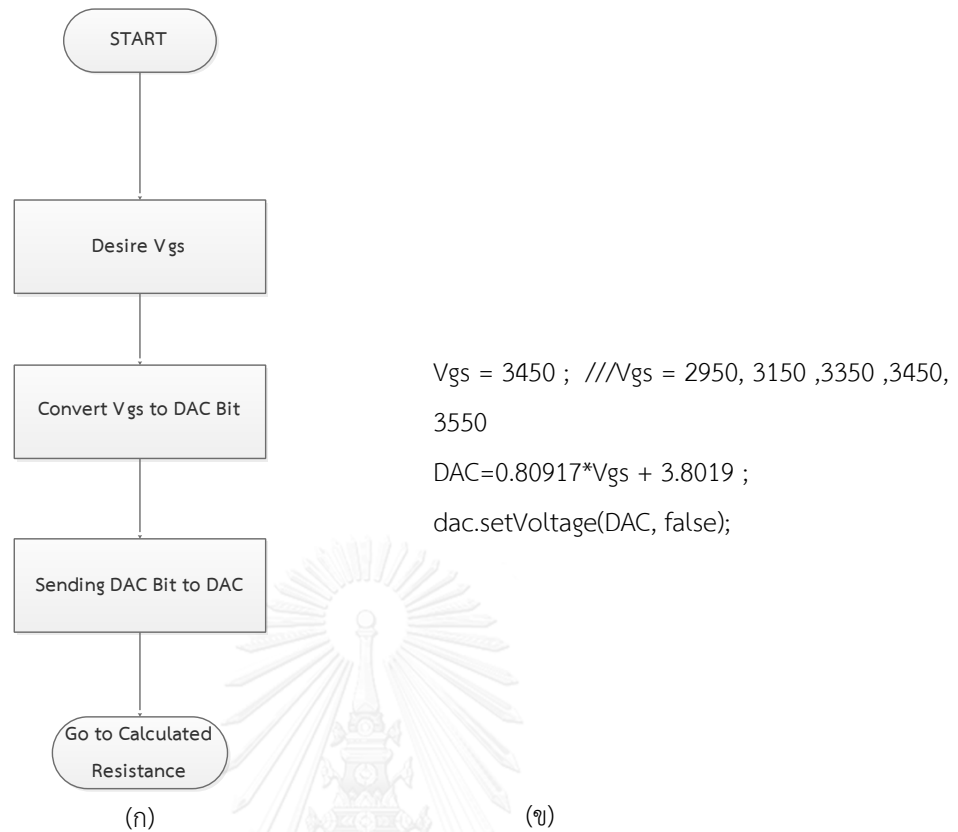
รูปที่ จ.2 การปรับค่าเซ็นเซอร์วัดกระแส (ก) ผังการทำงาน (ข) โค้ดการทำงาน



รูปที่ จ.3 การวัดกระแสไฟฟ้า (ก) ผังการทำงาน (ข)โค้ดการทำงาน



รูปที่ จ.4 การวัดความต่างศักย์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ (ก) ผังการทำงาน (ข)โค้ดการทำงาน



รูปที่ จ.5 การส่งคำสั่งเพื่อให้ออสเฟสจ่ายกระแสไฟฟ้า (ก) ฝั่งการทำงาน (ข) โค้ดการทำงาน

```

if(now-past>sample1)
{
  past = now ;
  Serial.print("DATA,TIME, ");
  Serial.print(Vgs);
  Serial.print(",");
  Serial.print(Resistance);
  Serial.print(",");
  Serial.print(Current);
  Serial.print(",");
  Serial.print(V1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(now) ;
  row++;
  y++;
}

```

รูปที่ จ.6 โค้ดการสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งค่า


```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <AnalogSmooth.h>

AnalogSmooth as = AnalogSmooth(30); // library สำหรับการ smooth ค่า ซึ่งใช้หลักการ moving
average ขนาด Window size can range from 1 - 100
AnalogSmooth as35 = AnalogSmooth(35);

Adafruit_MCP4725 dac ;
Adafruit_ADS1115 ADC1(0x48); // กำหนด address ของ โมดูล analog to digital ตัวที่ 1
Adafruit_ADS1115 ADC2(0x49); // กำหนด address ของ โมดูล analog to digital ตัวที่ 2

float Vgs = 0;
int i = 0 ;
int row =0;
float Bit_Current1 ;
float Bit_Current1Fil = 0 ;
double Resistance ;
double past2 = 0 ;
float Ampt =0;
double error = 0 ;
int t =0 ;
float vout = 0.0;
int sample1 = 100 ;
unsigned long past = 0 ;
int y ;
double error_adjust[40];
double error_adjust_mean ;
double sum = 0 ;

```

```

double V1 ;double VA ;
uint32_t DAC;

void setup(void)
{
  Serial.begin(128000);
  ADC2.setGain(GAIN_TWOTHIRDS) ;
  ADC1.setGain(GAIN_ONE);    // 1x gain  +/- 4.096V  1 bit = 0.125mV  ////////// กำหนดความ
ละเอียดในการรับค่า ของ โมดูล analog to digital ตัวที่ 1
  Serial.println("CLEARDATA");    // Library สำหรับการส่งค่า ที่วัดได้ไปที่ Excel ผ่าน ตัว VBA PLX
DAQ
  Serial.println("LABEL,Time,Index,Vgs,Resistance,Volt,Current,Time,Displacement");    //
  ADC1.begin();
  ADC2.begin() ;
  dac.begin(0x62);
}

void loop(void)
{
  unsigned long now = millis() ;
  //////////////////////////////////////
  //////////////////////////////////////Adjust Current Sensor////////////////////////////////////
  if(i == 0)
  {
    Vgs = 0 ;
    DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
    dac.setVoltage(0, false);
    delay(10000) ;
    for(int b=0;b<=39;b++)
    {
      error_adjust[b] =0- ADC1.readADC_Differential_0_10) ;
      sum = sum+error_adjust[b] ;
    }
  }
}

```

```

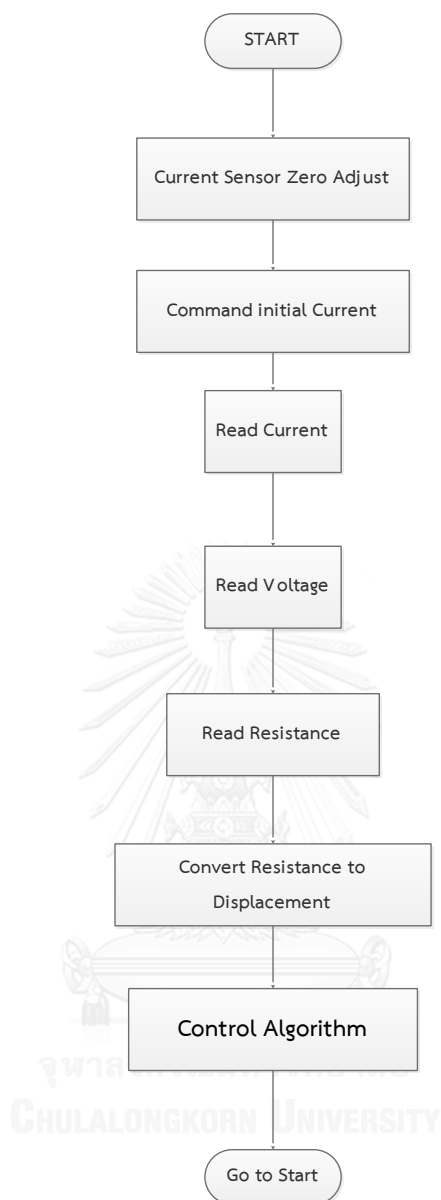
    delay(100);
}
error_adjust_mean = sum/40;
i= 2;
}
////////////////////////////////////
//////////Current Sensor Reading////////////////////////////////////
Bit_Current1 = ADC1.readADC_Differential_0_1()+error_adjust_mean;
Bit_Current1Fil = as35.smooth(Bit_Current1);
Current = 0.4639*Bit_Current1Fil -0.6607 ;
////////////////////////////////////
//////////Voltage Reading////////////////////////////////////
VA = ADC2.readADC_Differential_0_1() ;
vout = as.smooth(VA) ;
V1 = 0.2719*vout+ 16.557 ;
////////////////////////////////////
//*/sending Command to mosfet*//
Vgs = 3450 ; //Vgs = 2950, 3150 ,3350 ,3450, 3550
DAC=0.80917*Vgs + 3.8019 ;
dac.setVoltage(DAC, false);
////////////////////////////////////
Resistance = V1*1000/Ampt ; //Calculate resistance
if(now-past>sample1)
{
    past = now ;
    Serial.print("DATA,TIME, ");
    Serial.print(Vgs);
    Serial.print(",");
    Serial.print(Resistance);
    Serial.print(",");
    Serial.print(Current);
}

```

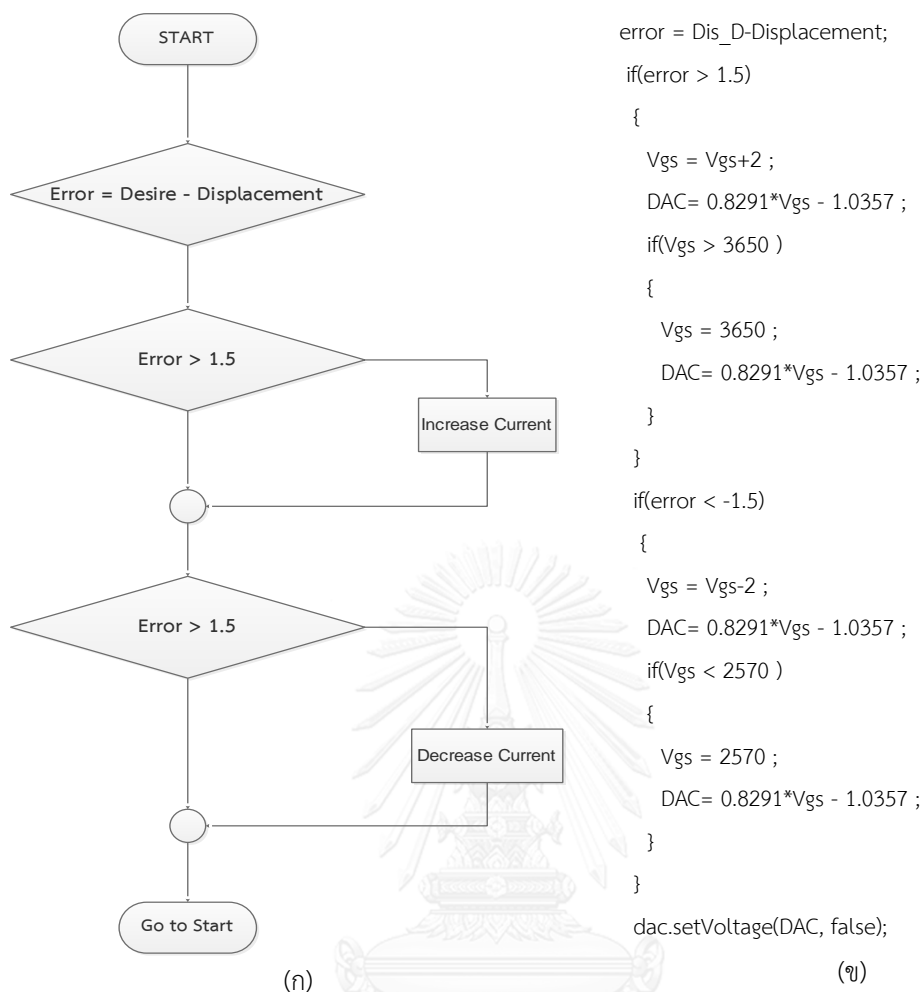
```
Serial.print(",");  
Serial.print(V1);  
Serial.print(",");  
Serial.print(now) ;  
Serial.print(",");  
Serial.println(Displacement);  
  
row++;  
  
y++;  
}  
}
```

รูปที่ จ.7 โค้ดโปรแกรมการ characterization





รูปที่ จ.8 ผังการทำงานการควบคุม



รูปที่ จ.9 การคำนวณเพื่อควบคุมกระแส (ก) ผังการทำงาน (ข)โค้ดการทำงาน

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <AnalogSmooth.h>

```

```

AnalogSmooth as = AnalogSmooth(30); // library สำหรับการ smooth ค่า ซึ่งใช้หลักการ moving
average ขนาด Window size can range from 1 - 100
AnalogSmooth as35 = AnalogSmooth(35);

```

```

Adafruit_MCP4725 dac ;
Adafruit_ADS1115 ADC1(0x48); // กำหนด address ของ โมดูล analog to digital ตัวที่ 1
Adafruit_ADS1115 ADC2(0x49); // กำหนด address ของ โมดูล analog to digital ตัวที่ 2
float Vgs = 0;

```

```

int i = 0 ;
int row =0;
float Bit_Current1 ;
float Bit_Current1Fil = 0 ;
double Resistance ;
double past2 = 0 ;
float Ampt =0;
double error = 0 ;
int t =0 ;
float vout = 0.0;
int sample1 = 100 ;
unsigned long past = 0 ;
int y ;
double error_adjust[40];
double error_adjust_mean ;
double sum = 0 ;
double V1 ;double VA ;
uint32_t DAC;
double Dis_D = 15 ;
double Displacement ;

void setup(void)
{
  Serial.begin(128000);
  ADC2.setGain(GAIN_TWOTHIRDS) ;
  ADC1.setGain(GAIN_ONE);    // 1x gain  +/- 4.096V  1 bit = 0.125mV
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,Index,Vgs,Resistance,Volt,Current,Time,Displacement");
  ADC1.begin();
  ADC2.begin() ;
  dac.begin(0x62);
}

void loop(void)
{

```



```

unsigned long now = millis() ;
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////Adjust Current Sensor////////////////////////////////////
if(i == 0)
{
    Vgs = 0 ;
    DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
    dac.setVoltage(0, false);
    delay(10000) ;
    for(int b=0;b<=39;b++)
    {
        error_adjust[b] =0- ADC1.readADC_Differential_0_1() ;
        sum = sum+error_adjust[b] ;
        delay(100) ;
    }
    error_adjust_mean = sum/40 ;
    i= 2 ;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////Current Sensor Reading////////////////////////////////////
Bit_Current1 = ADC1.readADC_Differential_0_1()+error_adjust_mean;
Bit_Current1Fil = as35.smooth(Bit_Current1);
Ampt = 0.4639*Bit_Current1Fil -0.6607 ;
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////Voltage Reading////////////////////////////////////
VA = ADC2.readADC_Differential_0_1() ;
vout = as.smooth(VA) ;
V1 = 0.2719*vout+ 16.557 ;
////////////////////////////////////
///*sending Command to mosfet*///
Vgs = 3450 ; //Vgs = 2950, 3150 ,3350 ,3450, 3550
DAC=0.80917*Vgs + 3.8019 ;
dac.setVoltage(DAC, false);
////////////////////////////////////
Resistance = V1*1000/Ampt ; //Calculate resistance

```



```

Displacement = 2.4993*Resistance - 355.77;
//////////Control Algorithm//////////
error = Dis_D-Displacement;
if(error > 1.5)
{
  Vgs = Vgs+2 ;
  DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
  if(Vgs > 3650 )
  {
    Vgs = 3650 ;
    DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
  }
}
if(error < -1.5)
{
  Vgs = Vgs-2 ;
  DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
  if(Vgs < 2570 )
  {
    Vgs = 2570 ;
    DAC= 0.8291*Vgs - 1.0357 ;
  }
}
dac.setVoltage(DAC, false);
//////////
if(now-past>sample1)
{
  past = now ;
  Serial.print("DATA,TIME, ");
  Serial.print(Vgs);
  Serial.print(",");
  Serial.print(Resistance);
  Serial.print(",");
  Serial.print(Ampt);
  Serial.print(",");
}

```



```
Serial.print(V1);  
Serial.print(",");  
Serial.print(now) ;  
Serial.print(",");  
Serial.println(Displacement);  
row++;  
y++;  
}  
}
```

รูปที่ จ.10 โค้ดโปรแกรมการควบคุมไมโครแอสซัวเอเคอร์



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วีรพงศ์ ลบตุ้ม เกิดเมื่อวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2534 จังหวัดชลบุรี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

