

การสร้างและวิเคราะห์คุณลักษณะของไมโครแอสซัวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน



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 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NICKEL ELECTROTHERMAL MICRO
ACTUATOR

Mr. Ittipol Charoenbunyarit



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างและวิเคราะห์คุณลักษณะของไมโครแอกซ์เว
	เตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน
โดย	นายอิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กุณขิณี มณีรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระยุทธ ศรีธรรมาภิชา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศักนันทน์ สรุงบุญมี)

อิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ์ : การสร้างและวิเคราะห์คุณลักษณะของไมโครแอกชูเอเตอร์
 นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน (FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NICKEL
 ELECTROTHERMAL MICRO ACTUATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.
 อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, 142 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนากระบวนการสร้างแอกชูเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนด้วยเทคนิค
 LIGA ซึ่งมีราคาถูกและระยะเวลาในการสร้างรวดเร็ว กระบวนการสร้างประกอบด้วยวิธีโฟโตลิโธกรา
 ฟิเพื่อสร้างลวดลายแม่พิมพ์และกระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อเคลือบโลหะ ในการศึกษานี้ได้นำ
 สารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตมาใช้ เพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างในการสร้างชิ้นงาน
 แอกชูเอเตอร์ ในส่วนของความแม่นยำและความสม่ำเสมอในการสร้างนั้นไม่พบความแตกต่างของ
 ทั้งสองสารละลาย แต่พบว่าความเร็วในการเคลือบด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีค่ามากกว่า
 หลังจากนั้นนำแอกชูเอเตอร์มาทำการทดสอบสมบัติทางวัสดุ โดยทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของ
 โครงสร้างผลึกแอกชูเอเตอร์นิกเกิล พบว่าสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีระนาบผลึก (220) และ
 นิกเกิลซัลเฟตมีระนาบผลึก (111) การหาจุดหลอมเหลวพบว่าทั้งสองสารละลายให้ค่าอุณหภูมิ
 ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตให้ค่าความหยابผิวสูงกว่าแต่มีความแข็ง
 น้อยกว่าซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างในงานวิจัยนี้ หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบสมรรถนะแอกชูเอ
 เตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนซึ่งพบว่าเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 3, 4 และ 5 แอมแปร์ ที่
 ระยะห่างระหว่างแขนเล็กและใหญ่ขนาด 200 ไมโครเมตร จะให้ระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขน
 มากที่สุด จากการศึกษาพบว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 4 แอมแปร์ จะให้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขน
 แอกชูเอเตอร์เท่ากับ 142 ไมโครเมตร ที่เวลา 30 วินาที ในส่วนของการทดสอบเชิงพลวัตพบว่า
 แอกชูเอเตอร์จะไม่ตอบสนองกับความถี่ที่มากกว่า 5 เฮิรตซ์ ขึ้นไป และการทดสอบแรงที่เกิดขึ้นที่
 ปลายแขนแอกชูเอเตอร์ พบว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 4 แอมแปร์ จะวัดค่าแรงเฉลี่ยได้มากที่สุดอยู่ที่
 4.7 มิลลินิวตัน ที่เวลา 30 วินาที

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5670471321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: NICKEL SULFAMATE / NICKEL SULFATE / ELECTRO-THERMAL ACTUATOR / XRD TECHNIQUE / STA TECHNIQUE / PHOTOLITHOGRAPHY / ELECTROPLATING

ITTIPOL CHAROENBUNYARIT: FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NICKEL ELECTROTHERMAL MICRO ACTUATOR. ADVISOR: ASST. PROF. ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., 142 pp.

This research aims to develop an electrothermal nickel actuators using LIGA technique. The fabrication consists of a photolithography and an electrochemical process. The electrolyte solutions of nickel sulfate and nickel sulfamate have been used to examine the difference in nickel's properties. In terms of precision and uniformity in creating the nickel structures, no significant difference between both solution was found. However, it was found that the deposition rate of nickel coated with the nickel sulfamate solution was faster. Using XRD technique, nickel actuators from nickel sulfamate and nickel sulfate showed a (220) and (111) crystalline preference orientation, respectively. Both solutions resulted in nickel structures with the same melting temperature of 1000°C. They were found that nickel sulfamate provided rougher surface and less hardness so it would be appropriate in this handling application. The performance test was performed by applying current at 3, 4 and 5 A. It was found that the gap 200 μm between small and large arms provided the largest displacement. In this study, the current at 4 A provided the displacement around 142 μm after applying for 30 s. For dynamic test, the actuator could not respond to frequencies higher than 5 Hz. The force test showed that, when applying current at 4 A, the tip of actuator provided the force around 4.55 mN after applying current for 30 s.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและความเมตตาในทุกด้านจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ "ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ" ท่านได้เสียสละเวลาส่วนตัวมามอบความรู้ต่างๆในสายงานวิจัยนี้ ความคิดเห็นและคำแนะนำที่มีประโยชน์อย่างมาก ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ได้มอบโอกาสครั้งสำคัญให้ผู้วิจัยได้เข้ามาทำงานวิจัยนี้พร้อมทั้งเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษาระดับปริญญา มหาบัณฑิต

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช ที่ให้คำแนะนำและการสังเกตการทำงานเพื่อแก้ไขจุดบกพร่องที่ผู้วิจัยได้มองข้ามไป รวมถึงโอกาสที่ได้ให้เข้ามาทำการศึกษาวิจัยในแลปนี้ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือการทดสอบจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และนักวิทยาศาสตร์ประจำส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้การสนับสนุน ขอขอบพระคุณ คุณจิระประภา เนียมปาน นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องแลปการทำเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การช่วยเหลือในการทดลองได้อย่างมาก ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

การทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและนาโนเทคโนโลยีแห่งนี้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ผู้วิจัยได้รับความสุข ความเอื้อเฟื้อ และคำแนะนำมากมายจากเพื่อนและน้องในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณพี่จารุบุตรแห่งแลปแมคคาทรอนิกส์ ดิกฮันส์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและความรู้ในการใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าและโปรแกรมควบคุม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างมาก รวมถึงน้องภาศรุต น้องธัญพร น้องณภัทร วิศวกรรมนาโนรุ่นที่ 7 ที่ช่วยเหลือในการทดลองต่างๆ

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ นายพิมล เจริญบุญญาฤทธิ และนางสุพร เจริญบุญญาฤทธิ บิดา-มารดาของผู้วิจัยที่ได้เลี้ยงดูและสนับสนุนในทุกๆด้าน รวมถึงกำลังใจที่สำคัญเป็นแรงผลักดันให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จตามที่ได้ตั้งใจไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.1.1 หลักการทำงานทั่วไปของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน.....	1
1.1.2 การประยุกต์ใช้งานของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน.....	2
1.1.3 การสร้างแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน.....	2
1.1.4 ปัญหาเกี่ยวกับแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนในปัจจุบัน.....	3
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม	6
2.1 หลักการทำงานทั่วไปของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน	6
2.2 การสร้างแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน	14
2.3 การศึกษาสมบัติของนิเกิลที่สร้างมาจากกระบวนการชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	21
2.4 สรุปการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	36
บทที่ 3 กระบวนการสร้างแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน.....	38

3.1	กระบวนการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกล	38
3.1.1	การสร้างรูปแบบของกลไกแอกซ์ฮูเอเตอร์	39
3.1.2	วิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสง (Photolithography)	40
3.1.3	กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electroplating)	42
3.2	การตรวจสอบขนาดของกลไก	44
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเคลือบผิว	46
3.4	ผลของความหยาบของสแตนเลสต่อการหลุดออกของนิกเกิล	47
3.5	สรุปผล	50
บทที่ 4	สมบัติทางวัสดุของนิกเกิล	52
4.1	การวัดความหยาบของผิว	53
4.2	การตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	57
4.3	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน	61
4.4	การทดสอบความแข็งด้วยเทคนิควิกเกอร์	66
4.5	สรุปผล	70
บทที่ 5	การทดสอบสมรรถนะของกลไกแอกซ์ฮูเอเตอร์นิกเกิลไฟฟ้าเชิงความร้อน	73
5.1	การวัดอุณหภูมิแอกซ์ฮูเอเตอร์นิกเกิล	74
5.2	การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ	79
5.3	การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต	87
5.4	การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์	94
5.4.1	การหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับคานนิกเกิลโดยใช้ทฤษฎีการโก่งตัวของคาน	94
5.4.2	การวัดแรงที่ปลายแขนนิกเกิลแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่กระทำต่อคานนิกเกิล	99
5.4.3	การวัดความล้าของปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่กระทำอย่างต่อเนื่อง	104
5.6	สรุปผล	105

บทที่ 6 สรุปงานวิจัย	111
รายการอ้างอิง	117
ภาคผนวก ก การทดสอบคุณสมบัติของนิกเกิล	121
ภาคผนวก ข วิธีการทดสอบสมรรถนะแอกซ์ชั้วเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน	127
ภาคผนวก ค ตารางค่าจากกราฟ	133
ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างแอกซ์ชั้วเอเตอร์	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	142



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สรุปการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	29
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของนิกเกิล.....	39
ตารางที่ 3.2	สรุปพารามิเตอร์ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	43
ตารางที่ 3.3	ผลการวัดค่าเฉลี่ยของขนาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยใช้สารละลายนิกเกิล ซัลฟาเมต	45
ตารางที่ 3.4	ผลการวัดค่าเฉลี่ยของขนาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยใช้สารละลายนิกเกิล ซัลเฟต.....	45
ตารางที่ 3.5	สรุปขั้นตอนในกระบวนการสร้าง	49
ตารางที่ 4.1	ค่าความหยาบของผิวนิกเกิลที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลาย.....	56
ตารางที่ 4.2	ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต	68
ตารางที่ 4.3	ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต	69
ตารางที่ 5.1	ผลของการวัดอุณหภูมิสูงสุดด้วยแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 1.....	79
ตารางที่ 5.2	ผลของการวัดอุณหภูมิสูงสุดด้วยแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 2	79
ตารางที่ 5.3	ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยังของคานานิกเกิล	99

สารบัญญภาพ

รูปที่ 1.1 กลไกการทำงานของแอคชูเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้.....	3
รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายแอคชูเอเตอร์ในงานของ Katerina Ivanova et al.(2006) (ก) ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ในบรรยากาศทั่วไป, (ข) ขยายผ่าน SEM ในสภาวะสุญญากาศ	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแอคชูเอเตอร์ในงาน B.Solano et al.(2007) (ก) โครงสร้างรูปตัว U, (ข) รูปแบบแอคชูเอเตอร์ที่นำมาทดสอบ, (ค) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนเข้าหากัน.....	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะแอคชูเอเตอร์ของ N.Chronis et al.(2005) (ก) รายละเอียดของแอคชูเอเตอร์ทั้งหมด, (ข) รูปแบบแอคชูเอเตอร์ที่พร้อมใช้งาน, (ค) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนที่ออกจากกัน	9
รูปที่ 2.4 ลักษณะแอคชูเอเตอร์ของงานวิจัย Hongyun So et al.(2013) (ก) รายละเอียดของแอคชูเอเตอร์, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขน, (ค) ลักษณะการเคลื่อนที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์, (ง) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนที่.....	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะแอคชูเอเตอร์ของ Yong zhu et al.2012 (ก) รายละเอียดของแอคชูเอเตอร์รูปตัว Z, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง Z.....	11
รูปที่ 2.6 ลักษณะแอคชูเอเตอร์ในงานของ Timothy moulton et al.2001 (ก) ไดอะแกรมการทำงานของ ETC actuation, (ข) ลักษณะการเติมสาร Doping, (ค) การเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์ hot-arm-cold-arm ทั่วไป, (ง) การเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์เติมสาร doping เพิ่มเข้าไป	12
รูปที่ 2.7 ลักษณะของแอคชูเอเตอร์ S.T.Todd et al.2008 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของคานสองชั้น, (ข) กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับการโก่งงอของคานสองชั้น.....	13
รูปที่ 2.8 ลักษณะของแอคชูเอเตอร์ Ho-Yin Chan et al.2003 (ก) รายละเอียดของแอคชูเอเตอร์แบบเสาเดี่ยว, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์แบบเสาเดี่ยว	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะของแอคชูเอเตอร์ Trinh Chu Duc et al.2008 (ก) รายละเอียดของแอคชูเอเตอร์เชิงความร้อนผสมกับ Sensing Piezoreistors, (ข) ลักษณะการทำงานของไมโครกริปเปอร์	14

รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการสร้างแอคซ์เอเตอร์ในงาน Bong-Seok Kim et al.2012 (ก) ไดอะแกรมการสร้างชิ้นงาน แบบ Micromachining, (ข) ลักษณะของชิ้นงานนิกเกิล(รูปบน) และซิลิคอน(รูปล่าง) 15

รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างแอคซ์เอเตอร์ H.Lorenz et al (ก) การใช้ฟิล์มโฟโวลติซิสในการลามิเนต, (ข)ไดอะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA..... 16

รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างแอคซ์เอเตอร์ของ Wenmin Qu et al.1999 (ก) ตรวจสอบชิ้นงานหลังจากทำการสร้างด้วย SEM, (ข)ไดอะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA 17

รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการสร้างแอคซ์เอเตอร์ (ก) ไดอะแกรมการสร้างด้วยเทคนิค LIGA แบบใช้โฟลีโอไมด์ของ A. Bruno Frazier et al.1993, (ข) ไดอะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA แบบเคลือบนิกเกิลสองชั้นของ Yoshitaka Sawa et al.2008..... 18

รูปที่ 2.14 ผลการศึกษาของโดย S. Basrou et al.2010 (ก) แสดงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อ Intrinsic stress, (ข) แสดงผลของความหนาของชั้นแม่พิมพ์ที่มีต่อ Intrinsic stress, (ค) แสดงผลของ ส่วนประกอบคลอไรด์ ที่มีต่อ Intrinsic stress 19

รูปที่ 2.15 ผลการศึกษาของ A.M.Rasshidi et al.2010 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายที่มีผลต่อขนาดของเกรน, (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อขนาดของเกรน, (ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงสารละลายซัลฟิวเรทที่มีผลต่อขนาดของเกรน 20

รูปที่ 2.16 ผลการศึกษาของ M.Saitou et al.2008 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาของฟิล์มที่ถูกเคลือบกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยมีอุณหภูมิสารละลายที่แตกต่างกัน, (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความสามารถในการรับไอออนโดยมีอุณหภูมิสารละลายที่แตกต่างกัน..... 21

รูปที่ 2.17 ผลการศึกษาของ T.Fritz et al.2001 (ก) ลักษณะของผิวเกรนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันไป, (ข) ลักษณะของระนาบผลึกที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างโดยการใช้เทคนิค XRD 24

รูปที่ 2.18 ผลการศึกษาของ T.Fritz et al.2002 (ก) ลักษณะของระนาบผลึกที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยการใช้เทคนิค XRD, (ข) ผลของค่าความแข็งแบบวิกเกอร์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป 24

รูปที่ 2.19 ผลการศึกษาของ T. Fritz et al.2003 (ก) ไดอะแกรมการทดสอบหาค่ามอดูลัสของ ยังแบบ Laser acoustic, (ข) ไดอะแกรมการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังแบบ Resonant frequency, (ค) ตรวจสอบลักษณะของ Electrostatic actuators ด้วย SEM.....	25
รูปที่ 2.20 ผลการศึกษาของ J.K.Luo et al.2004 (ก) ภาพตัดขวางของคานานิกเกิลและภาพจาก SEM ที่แสดงคานานิกเกิลที่ถูกทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีนิกเกิล, (ข) ผลของค่ามอดูลัส ของยังกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดๆที่อุณหภูมิสารละลาย 60 องศาเซลเซียส	25
รูปที่ 2.21 ผลการศึกษาของ Lyndon S et al.2001 (ก) ไดอะแกรมการทดสอบการโก่งงอของ คาน(ข) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มาจาก สารละลายนิกเกิลซัลเฟตและซัลฟาเมต	26
รูปที่ 2.22 ผลการศึกษาของ THOMAS E et al.2002 (ก) ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างรูปค้อน, (ข) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มาจากสารละลาย นิกเกิลซัลฟาเมต, (ค) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต	27
รูปที่ 2.23 ผลการศึกษาของ K.J. Hemker et al.2001 (ก) รูปทางซ้ายเป็นการเคลือบโลหะใน กระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบปกติและรูปทางขวาเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบมาก่อนที่จะมา ทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี, (ข) ค่ามอดูลัสของยังที่มีระนาบผลิกนิกเกิลแตกต่างกันไป	28
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมกระบวนการสร้างชิ้นงานทั้งหมด	38
รูปที่ 3.2 หน้ากากที่เป็นแบบของกลไกแอคชูเอเตอร์.....	39
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในกระบวนการลิโทกราฟีแบบฉายแสงยูวี (ก) เครื่องรีดแผ่น, (ข) เครื่องฉายแสงยูวี... ..	41
รูปที่ 3.4 เตาให้ความร้อน	42
รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองกระบวนการไฟฟ้าเคมี	43
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี	44
รูปที่ 3.7 รายละเอียดของขนาดที่ต้องทำการวัด.....	44
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่ใช้วัดเพื่อหาค่าเฉลี่ย สีเหลี่ยมคือช่องว่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่	45
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ อัตราการเคลือบผิว ของ นิกเกิลในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต	47

รูปที่ 3.10 (ก) ชิ้นงานไม่สามารถหลุดออกมาได้หลังจากทำการแช่ NaOH, (ข) การวัดค่า Roughness (Ra), (ค) ลักษณะแผ่นสแตนเลสที่มี Ra < 0.5 μm	48
รูปที่ 4.1 ผิว निकเกิดที่สร้างมาจากสารละลาย निकเกิดซัลฟาเมตเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์	54
รูปที่ 4.2 ผิว निकเกิดที่สร้างมาจากสารละลาย निकเกิดซัลเฟตเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์	55
รูปที่ 4.3 กราฟของโครงสร้างผลึก निकเกิดที่สร้างจากสารละลาย निकเกิดซัลเฟตของการทดสอบ XRD.....	58
รูปที่ 4.4 กราฟของโครงสร้างผลึก निकเกิดที่สร้างจากสารละลาย निकเกิดซัลฟาเมตของการทดสอบ XRD.....	59
รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึก निकเกิดที่เป็นเอกลักษณ์ที่ของการทดสอบ XRD (ก) ระบุผลึกที่มาจากสารละลาย निकเกิดซัลเฟต (ข) ระบุผลึกที่มาจากสารละลาย निकเกิดซัลฟาเมต	60
รูปที่ 4.6ก-ค ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของ निकเกิดที่สร้างจากสารละลาย निकเกิดซัลเฟต.....	64
รูปที่ 4.7ก-ค ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของ निकเกิดที่สร้างจากสารละลาย निकเกิดซัลฟาเมต	65
รูปที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กดทดสอบต่อพื้นผิวเอียงของรอยบุ่ม	67
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งที่หัวเพชรกดทดสอบบนชิ้นงาน निकเกิด.....	68
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งที่ใช้เทอโมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ निकเกิดแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน.....	75
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงแนวโน้มของอุณหภูมิที่เทอโมคัปเปิลใช้วัดในแต่ละตำแหน่งภายใน 30 วินาที (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3.....	76
รูปที่ 5.3 การวัดอุณหภูมิด้วยเทอโมสแกน (ก) วิธีกำจัดอุปกรณ์ด้วยแสงอินฟราเรด (ข) ตำแหน่งที่ยิงแสงอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิ	78
รูปที่ 5.4 วิธีการยึดแอกซ์เวเตอร์สำหรับการทดสอบ	80
รูปที่ 5.5 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของกลไกเมื่อมีการขยายตัวทางความร้อน	81
รูปที่ 5.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอกซ์เวเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่กระแสไฟฟ้า 3A	83

รูปที่ 5.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอกซ์ฮูเอเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่ กระแสไฟฟ้า 4A	84
รูปที่ 5.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอกซ์ฮูเอเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่ กระแสไฟฟ้า 5A	85
รูปที่ 5.9 กราฟแนวโน้มการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์นิกเกิลสูงสุดในแต่ละขนาด gap....	86
รูปที่ 5.10 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า 5A	86
รูปที่ 5.11ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 0.1 Hz (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 5 วินาที (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 5 วินาที	90
รูปที่ 5.12ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 0.5 Hz (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 1 วินาที (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 1 วินาที	91
รูปที่ 5.13ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 1 Hz (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 0.5 วินาที, (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 0.5 วินาที.....	92
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ใน 1 วงรอบทั้งสองตัวตัวอย่างที่กระแสไฟฟ้า 4A (ก) 0.1 Hz (ข) 0.5 Hz (ค) 1 Hz	93
รูปที่ 5.15 แสดงลักษณะการโก่งตัวของคาน	95
รูปที่ 5.16 ตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทินแกน X.....	96
รูปที่ 5.17 วิธีการทดสอบและการเตรียมอุปกรณ์ (ก) ภาพจริงในการทดสอบ, (ข) ไดอะแกรมการ ทดสอบ	97
รูปที่ 5.18 ขนาดของคานนิกเกิลที่จะใช้ทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์	98
รูปที่ 5.19 วิธีการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ	100
รูปที่ 5.20 กราฟของแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์เทียบกับเวลา	102
รูปที่ 5.21 (ก) ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์กดคานนิกเกิลให้ขยับลง (ข) แสงอินฟราเรดวัดการ เคลื่อนที่ของคานนิกเกิล.....	103
รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบความล้าของแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ในเวลา 6 ชั่วโมง (ก) ที่ กระแสไฟฟ้าขนาด 3A, (ข) ที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การพัฒนาเทคโนโลยีของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีแนวโน้มในการออกแบบและผลิตให้มีขนาดเล็กลง เพื่อช่วยลดพื้นที่การใช้งานและช่วยลดต้นทุนในการผลิตให้ลดลงได้อย่างมาก ซึ่งอุตสาหกรรมหลักที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร นั้นคือ อุตสาหกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีทางระบบไฟฟ้าเครื่องกลระดับจุลภาคได้เข้ามามีส่วนสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ซึ่งเทคโนโลยีทางระบบไฟฟ้าเครื่องกลระดับจุลภาคนั้นประกอบไปด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อนและกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit Technology) เช่นเดียวกันกับการผลิตวงจรรวม อิเล็กทรอนิกส์ โดยประเภทการใช้งานที่เป็นที่นิยมในงานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลายคือ ไมโครแอกชูเอเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการยึดจับวัตถุที่มีขนาดเล็กและกระตุ้นระบบให้เปลี่ยนไปจากเดิม ลักษณะการทำงานของแอกชูเอเตอร์แบ่งออกได้อีก 5 ประเภทคือ การใช้ไฟฟ้าเชิงสถิตในการกระตุ้น (Electrostatic) การใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในการกระตุ้น (Electromagnetic) การแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า (Piezoelectric) การใช้การไหลเป็นตัวกระตุ้น (Fluid) การใช้อุณหภูมิในการกระตุ้น (Thermal) สิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ของกลไกขึ้น

แบบที่เป็นที่นิยมในงานวิจัยและพัฒนามากที่สุดคือ แอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน เนื่องจากเป็นหลักการที่ไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้โดยง่าย มีการผสมผสานหลักการทางวิศวกรรมเครื่องกลหลากหลายรูปแบบ อาทิเช่น การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่ของกลไก Four-bar linkage การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ผลในทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นต้น และให้ความเสถียรในการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หลักการของแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันทางไฟฟ้า ทำให้เกิดค่าการขยายตัวทางความร้อน (Thermal expansion) ระหว่างโครงสร้างแขนที่ต่างกันหรือโครงสร้างของแต่ละชั้นที่ต่างกัน

1.1.1 หลักการทำงานทั่วไปของแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน

การทำงานของแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันมีอยู่ 3 แบบ หลักๆที่เป็นที่นิยมในการนำมาพัฒนาในงานวิจัยคือ การใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิด การใช้ความต้านทานที่แตกต่างกันบนวัสดุชนิดเดียวกัน และการออกแบบโครงสร้างของแอกชูเอเตอร์ให้ส่วนที่ถูกระตุ้น

มีขนาดที่ไม่สมมาตรกัน ตัวอย่างในงานที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดของ S.T.Todd et al.(2008)[17] ได้ใช้ความแตกต่างของค่าการขยายตัวทางความร้อนในวัสดุที่แตกต่างกัน (bimorph actuator) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ ในส่วนการออกแบบโครงสร้างของแอกชูเอเตอร์ให้ไม่สมมาตรกันนั้นทาง B.Solano et al.(2007)[16] ได้มีการใช้แนวคิดในการออกแบบให้ขนาดของโครงสร้างเกิดความแตกต่างกันส่งผลให้ความต้านทานแตกต่างกันด้วยเช่นกัน ซึ่งแสดงอยู่ในแบบของ hot-arm-cold-arm ทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนขึ้นเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้า อีกเทคนิคนั้นในงานของ T.Moulton et al.(2001)[7] ได้เติมสารที่เป็นโลหะเพิ่มเข้าไปในวัสดุหรือ doping เพื่อให้เกิดความแตกต่างของความต้านทานภายในวัสดุเดียวกันมากขึ้น เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปก็จะเกิดการขยายตัวทางความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย

1.1.2 การประยุกต์ใช้งานของแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน

จากหลักการทำงานและรูปแบบของแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน พบว่าได้มีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยหลากหลายสาขาที่นอกเหนือจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรืออุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ คืองานด้านชีววิทยาและการแพทย์ ดังตัวอย่างในงานของ Ho-Yin Chan et al.(2003)[12] ได้สร้างไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยใช้โพลิเมอร์เป็นตัวหุ้มปลายที่จับไว้เพื่อนำไปใช้ในการจับเซลล์ทางชีววิทยาในของเหลวที่อยู่ในจานเพาะเชื้อที่มีของเหลวเป็นตัวกลาง เช่นเดียวกับ B. Solano et al.(2007)[16] ได้นำไปจับเซลล์ทางชีววิทยา โดยใช้ SU-8 polymer เป็นโครงสร้างหลักเพราะคุณสมบัติของมันสามารถปรับการทำงานเข้ากับส่วนประกอบทางชีววิทยาได้ดี

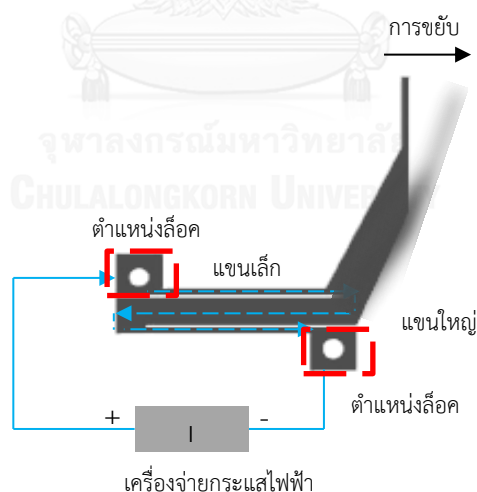
1.1.3 การสร้างแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน

ลักษณะการสร้างกลไกขนาดเล็กในระดับไมโครสเกลนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะนำไปใช้และรูปแบบของไมโครแอกชูเอเตอร์ว่าเป็นลักษณะใดและจะนำไปใช้งานแบบไหน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่เป้าหมายในการวิจัยและพัฒนางานสร้างคือการลดต้นทุนการสร้างแต่ยังคงผลลัพธ์ที่ดีและแม่นยำ B.Solano et al.(2007)[16] ได้ใช้วิธีการ Surface micromachining โดยมีการสร้างโครงสร้างเป็นสามชั้นบนแผ่น PCB ซึ่งในการสร้างนี้จะใช้ SU-8 เป็นโครงสร้างหลักโดยจะไม่มีโครงสร้าง Sacrificial layer เพื่อลดความเค้นตกค้าง ซึ่งคุณภาพของชิ้นงานจะมากขึ้นขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของกลไกที่ได้ทำการออกแบบมา H.Lorenz et al.(1996)[2] ได้ใช้เทคนิค LIGA ในการสร้างแอกชูเอเตอร์ออกมา โดยใช้ฟิล์มโฟโตลิธิสชนิดลบซึ่งมีราคาถูกและใช้งานง่ายมาเคลือบผิวเพื่อเตรียมสร้างลวดลายแล้วทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีต่อไป

1.1.4 ปัญหาเกี่ยวกับแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนในปัจจุบัน

การศึกษางานทางด้านแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบมาก สามารถที่จะนำไปใช้ในงานสาขาอื่นๆได้อย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับ แต่แอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนที่ถูกออกแบบมาทำงานวิจัยนั้นเน้นที่การทำงานและความสวยงามของลวดลายรูปแบบของกลไก ซึ่งก่อให้เกิดความซับซ้อนของกลไกการทำงาน ค่าใช้จ่ายของการใช้เทคโนโลยีในการสร้างที่มีราคาสูงเนื่องจากความซับซ้อนของกลไกที่ถูกออกแบบ รวมถึงความซับซ้อนของขั้นตอนในการสร้างชิ้นงานแต่ละตัวที่ต้องใช้หลายเทคนิคช่วยในการสร้าง จึงเป็นเรื่องยากสำหรับผู้ไม่มีทุนในการวิจัยที่มากพอที่จะทำการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งจากที่ได้กล่าวไปแล้วถึงหลักการทำงานว่าเมื่อมีการกระตุ้นการทำงานด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความต้านทานภายในโครงสร้างนั้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะการกระดกที่แขนโดยในปัจจุบันจะเน้นไปที่การใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อย แต่ให้การกระดกที่มากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้นำรูปแบบแอกซ์เอเตอร์มาจากโครงการพัฒนาการกลไกจับยึดชิ้นส่วนขนาดเล็กด้วยแอกซ์เอเตอร์ทางความร้อนของ นายนิรันดร์ จันดาเบา นายสมัชญ์ แสงโชติ และนายธนพล อนุชิตวรวงศ์ ซึ่งมีโครงสร้างแขนเล็กกับแขนใหญ่และหลักการทำงานที่ไม่ซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กลไกการทำงานของแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้

จากรูปที่ 1.1 คือ กลไกการทำงานของแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน โดยเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ตำแหน่งในรูปจะเห็นเป็นเส้นทางของกระแสไฟฟ้า เมื่อผ่านแขนเล็กซึ่งมีพื้นที่น้อยกว่าจึงมีความต้านทานที่สูง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนขึ้นภายในโครงสร้างทำ

ให้แอกซ์เวเตอร์เกิดการขยับ เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาพารามิเตอร์ของการสร้างแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนให้ขนาดของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ โดยสามารถสร้างได้อย่างง่าย ราคาไม่แพง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสามารถหาได้ทั่วไป รวมทั้งสามารถสร้างได้ครั้งละจำนวนมาก ซึ่งในช่วงของการสร้างกลไกแอกซ์เวเตอร์นั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องควบคุมและทดลองหาค่าที่เหมาะสมให้กับการสร้างแอกซ์เวเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งรายละเอียดเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงความร้อนได้เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ รวมถึงการหาคุณลักษณะของกระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับนิกเกิล และการหาแรงที่เกิดขึ้นของปลายแอกซ์เวเตอร์จากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปให้เกิดการกระดกที่ปลาย ซึ่งเมื่อทราบขนาดของแรงที่เกิดขึ้นแล้วจึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการยึดจับชิ้นงานให้เหมาะสมได้ ด้วยเหตุผลทั้งหมดที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อพัฒนาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้าง ได้แก่ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และวัดคุณลักษณะทางวัสดุของโครงสร้างนิกเกิล
- เพื่อศึกษาคุณลักษณะของกลไกที่มีขนาดแตกต่างกัน ด้วยการทดสอบการตอบสนองทางสถิติและทางพลวัต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- หาพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการโฟโวลีโทกราฟีและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี
- เปรียบเทียบคุณสมบัติจากการสร้างโดยการใช้สารอิเล็กโทรไลต์ 2 ตัว
- ทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของกระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับนิกเกิล
- ทำการทดสอบสมรรถนะการกระดกของกลไกแอกซ์เวเตอร์ของขนาดช่องว่างระหว่างแขนใหญ่และแขนเล็กที่แตกต่างทั้งสี่แบบ โดยการทดสอบแบบสถิติและแบบพลวัต
- ทำการทดสอบแรงที่ปลายของนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน

1.4 ระเบียบขั้นตอนของงานวิจัย

- ทำการศึกษากระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนด้วยวิธีต่างๆในงานวิจัยที่ผ่านมาและวิธีการทดสอบสมรรถนะของกลไกด้วยวิธีต่างๆ
- ออกแบบกระบวนการสร้างจากการศึกษางานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาให้ได้ตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ
- ทดลองสร้างเพื่อพัฒนาพารามิเตอร์ในกระบวนการลิโทกราฟีและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถนำมาใช้เป็นค่ามาตรฐานในการสร้างรุ่นต่อไป
- เมื่อได้พารามิเตอร์ในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีตามที่ต้องการแล้วจึงนำมาเปรียบเทียบผลการสร้างกลไกจากสารอิเล็กทรอนิกส์ 2 ชนิด ซึ่งก็คือ สารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลเฟต
- ออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับทดสอบสมรรถนะของกลไกแอกซ์เวเตอร์
- ทำการทดสอบสมรรถนะด้วยวิธีการตอบสนองเชิงสถิติแล้ววิเคราะห์ผลจากการทดสอบเพื่อหาระยะกระดกที่เกิดขึ้นมากที่สุด
- ทำการทดสอบสมรรถนะด้วยวิธีการตอบสนองเชิงพลวัตแล้ววิเคราะห์ผลจากการทดสอบเพื่อศึกษาการตอบสนองที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ค่าต่างๆ
- ทำการทดสอบคุณลักษณะทางวัสดุจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีสำหรับนิกเกิล
- ทำการทดสอบแรงที่ปลายของชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์ด้วยหลักการการโก่งตัวของคาน
- วิเคราะห์ผลและสรุปผลงานวิจัยพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ
- จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การพัฒนาวิธีการต่างๆในงานวิจัยนี้เป็นการผสมผสานของทฤษฎีงานวิจัยที่ผ่านมากับอุปกรณ์สมัยใหม่ที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้และสะดวกในการใช้งาน ซึ่งถือเป็นรากฐานการพัฒนาในการสร้างกลไกแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบต่างๆในอนาคต ซึ่งสิ่งที่เป็นเป้าหมายหลักของการพัฒนา คือ ความสะดวก รวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการผลิต วัสดุสามารถหาได้ทั่วไป ซึ่งผู้ที่สนใจในงานลักษณะนี้สามารถนำไปต่อยอดในระดับที่สูงขึ้นไปอีกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

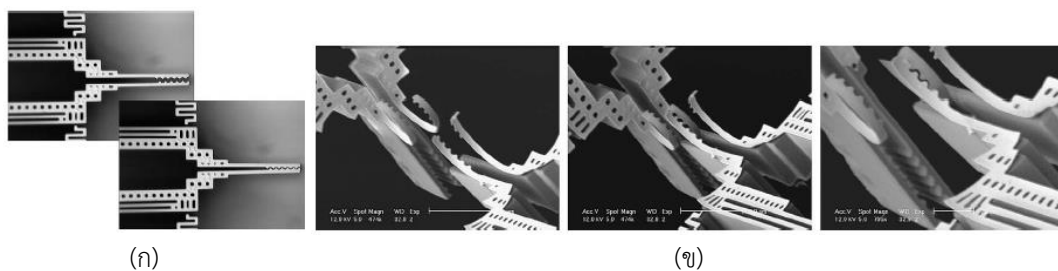
ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับหลักการการทำงานของไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในแต่ละรูปแบบ เทคนิคการสร้างชิ้นงานในระดับไมโครสเกลแบบต่างๆ รวมถึงวิธีการทดสอบทางวัสดุและทางกลสำหรับชิ้นงานระดับไมโครสเกลในงานวิจัยที่หลากหลายเพื่อต่อยอดและพัฒนาไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในระดับที่สูงขึ้นต่อไป

2.1 หลักการทำงานทั่วไปของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน

การทำงานของแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อนนั้นมีอยู่ 2 แบบ หลักที่เป็นที่นิยมในการนำมาพัฒนาในงานวิจัยคือ การใช้วัสดุที่แตกต่างกันสองชนิดและการใช้ความต้านทานที่แตกต่างกันบนวัสดุชนิดเดียวกันโดยการออกแบบโครงสร้างของแอกซ์เอเตอร์ให้ส่วนที่ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้ามีขนาดที่แตกต่างกัน ตัวอย่างที่งานวิจัยที่ผ่านมาของ Katerina Ivanova et al. 2006[15] ได้พูดถึงการออกแบบไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน คือการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ให้เกิดความร้อนซึ่งความร้อนที่ได้เกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้าภายในไมโครแอกซ์เอเตอร์เนื่องจากพื้นที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ขึ้นมาด้วย ซิลิคอน และทำการทดลองในห้องแล็บที่ปรับเป็นแบบสุญญากาศ จุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถยึดจับและวางวัตถุที่มีขนาดระดับไมโครสเกลได้และเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ทำด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

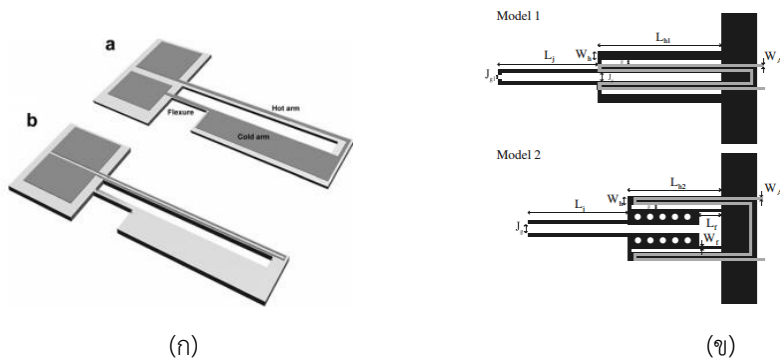
วิธีการทดลองทำโดยการปล่อยศักย์ไฟฟ้าที่ 4.5-5 V ที่กระแส 50-60 mA ซึ่งคำนวณได้พลังงานไฟฟ้าเป็น 240 mW แล้วบันทึกไว้พบว่าเป็นช่วงที่ แอกซ์เอเตอร์สามารถเคลื่อนตัวได้ จนกระทั่งเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไป 7 V พบว่าชิ้นงานเกิดความร้อนที่สูงอย่างเห็นได้ชัดจนทำให้ชิ้นงานไหม้ แต่อย่างไรก็ตามที่แขนจับของแอกซ์เอเตอร์ก็สามารถเปิดปิดได้ด้วยเวลาเพียง 1 วินาที แสดงในรูปแบบที่ 2.1(ก-ข)

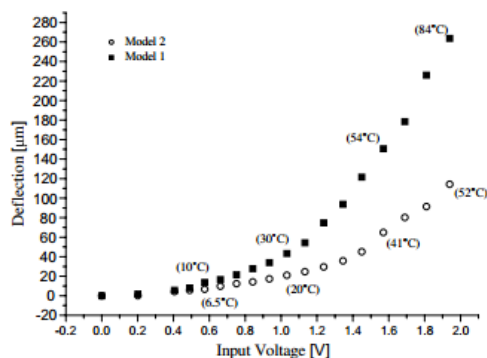
ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การออกแบบของไมโครแอกซ์เอเตอร์เชิงความร้อน ด้วยแขนจับสองแขนที่เป็นตัวรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนโดยตรงเพื่อให้เกิดการโก่งตัวนั้น เป็นการออกแบบที่เหมาะสมและผลการทดลองกับแบบจำลองก็มีความสอดคล้องกัน โดยสภาวะทางไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งานแอกซ์เอเตอร์จับวางชิ้นงานคือ 5V ที่กระแส 50 mA แขนแอกซ์เอเตอร์จะเปิดได้กว้าง 5 ไมโครเมตร ซึ่งการทดลองนี้ในสภาวะอากาศทั่วไปและห้องสุญญากาศพบว่าสามารถยึดจับชิ้นงานได้เหมือนกัน



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายแอดซิวเอเตอร์ในงานของ Katerina Ivanova et al.(2006) (ก) ส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ในบรรยากาศทั่วไป, (ข) ขยายผ่าน SEM ในสภาวะสุญญากาศ

ส่วนใหญ่รูปแบบของแอดซิวเอเตอร์เชิงความร้อนจะมีลักษณะที่โครงสร้างคล้ายกันคือบริเวณที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีขนาดเล็กและใหญ่แตกต่างกัน เพราะง่ายต่อการออกแบบและสามารถขยับโครงสร้างจริงๆ เนื่องจากการขยายตัวทางความร้อน โดยงานวิจัยของ B.Solano et al.2007[16] ได้ออกแบบและสร้างแอดซิวเอเตอร์เชิงความร้อนเพื่อใช้จับเซลล์ในทางชีววิทยา ซึ่งรูปแบบแอดซิวเอเตอร์เป็นลักษณะรูปตัว U หรือที่เรียกว่า U-Shaped แสดงในรูป 2.2ก จะเห็นว่าโครงสร้างที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเป็นแขนเล็กและแขนใหญ่หรือที่เรียกว่า Hot-arm และ Cold arm ตามลำดับ ทำให้ความต้านทานภายในโครงสร้างเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแตกต่างกันจึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างต่างกันส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างให้มีการขยับขึ้น ซึ่งในการงานวิจัยนี้มีการพัฒนาเกี่ยวกับโครงสร้างให้มีการขยายตัวทางความร้อนได้ดีขึ้นจากเดิมที่เป็นรูปตัวยูปกติ ด้วยการกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนผิวของแขนเล็กและแขนใหญ่ออกเพื่อให้มีการนำความร้อนภายในโครงสร้างที่ดีส่งผลให้ระยะกระดกเพิ่มมากขึ้นใช้โพลิเมอร์ที่เป็น SU-8 มาเคลือบเพื่อนำไปใช้งานกับเซลล์ในห้องแล็บและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่สูงกว่า ซิลิคอนโลหะบางชนิด และทำการออกแบบแขนที่แตกต่างออกไปแสดงในรูป 2.2ข เพื่อดูประสิทธิภาพการทำงานเมื่อมีการปรับปรุงแอดซิวเอเตอร์โดยการกำจัดสิ่งปนเปื้อนแสดงในรูป 2.2ค

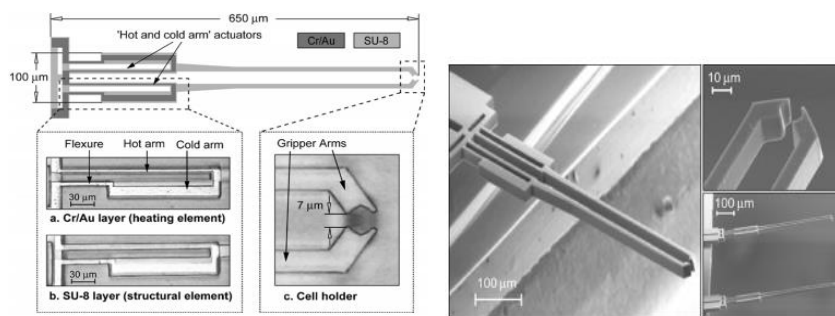




(ค)

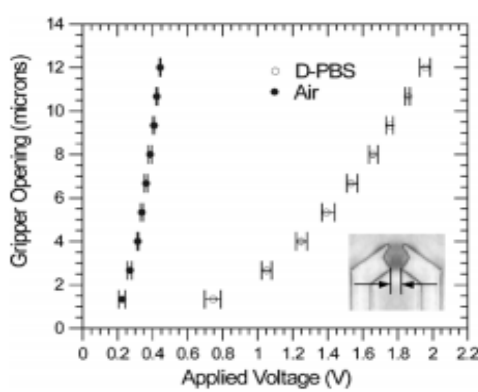
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแอคซิวเอเตอร์ในงาน B.Solano et al.(2007) (ก) โครงสร้างรูปตัว U, (ข) รูปแบบแอคซิวเอเตอร์ที่นำมาทดสอบ, (ค) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนเข้าหากัน

จากการศึกษาพบว่า model 1 จะมีระยะกระดกมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งแอคซิวเอเตอร์นี้เมื่อให้กระแสไฟฟ้าขนาด 5-40 mA เข้าไป บริเวณปลายแขนที่จับวัตถุจะเปิดออกถ้าต้องการจับวัตถุก็เพียงปิดกระแสไฟฟ้า โดยเซลล์ที่จะไปจับมีขนาด 2-150 ไมโครเมตร อุณหภูมิที่ป้อนเข้าไปไม่ควรเกิน 80 องศาเซลเซียส จะทำให้แอคซิวเอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานที่ดี และในงานวิจัยของ N.Chronis et al.2005[14] ก็เป็นอีกรูปแบบที่ใกล้เคียงกันสำหรับแอคซิวเอเตอร์เชิงความร้อนที่ใช้หลักการของความแตกต่างของขนาดโครงสร้างบริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากรูปที่ 2.3ก-ข รูปแบบแอคซิวเอเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ได้กล่าวมานั้นหมายความว่าลักษณะโครงสร้างที่เป็นแขนเล็กหรือ Hot-arm และแขนใหญ่หรือ Cold-arm เป็นที่นิยมสำหรับการใช้งานแอคซิวเอเตอร์เชิงความร้อนการทดสอบจับเซลล์ที่อยู่ในสารละลาย D-PBS และอากาศ นั้นใช้แอคซิวเอเตอร์จุ่มลงไปจับเซลล์ ซึ่งผลการวัดสมรรถนะของระยะกระดกเบื้องต้นแสดงอยู่ในรูปที่ 2.3ค พบว่าในสารละลายจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าในอากาศแขนจับถึงจะสามารถเปิดออกมาได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในอากาศมีมากกว่าในสารละลายเพราะฉะนั้นจึงขยายตัวได้เร็วกว่า



(ก)

(ข)

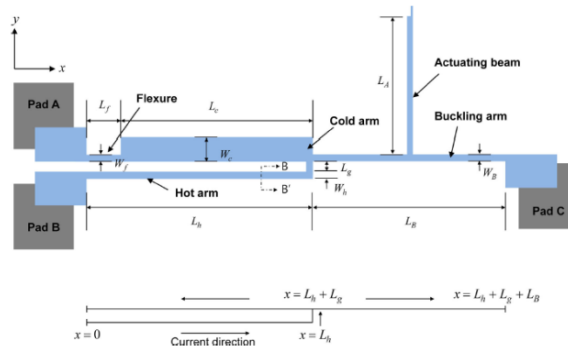


(ค)

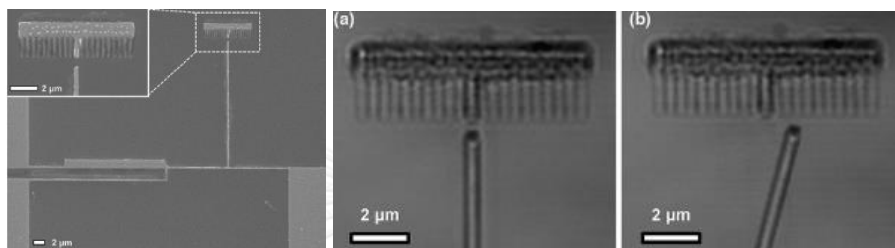
รูปที่ 2.3 ลักษณะแอกชูเอเตอร์ของ N.Chronis et al.(2005) (ก) รายละเอียดของแอกชูเอเตอร์ทั้งหมด, (ข) รูปแบบแอกชูเอเตอร์ที่พร้อมใช้งาน, (ค) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนที่ออกจากกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

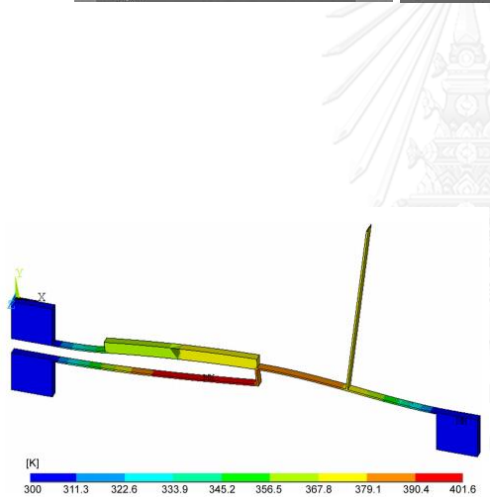
สำหรับการออกแบบแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนในงานวิจัยของ Hongyun So et al.2013[25] ได้ออกแบบโครงสร้างที่รับกระแสไฟฟ้าเป็นแบบ U-Shaped แบบทั่วๆไป โดยโครงสร้างแอกชูเอเตอร์จะต่างออกไปตรงที่ไม่มีแขนสองที่ใช้ในการจับวัตถุแต่จะมีเป็นเสาที่ไว้เคลื่อนที่ไปผลักดันวัตถุแทนแสดงดังรูปที่ 2.4ก-ข โดยเน้นไปที่การใช้งานพลังที่ต่ำแต่สามารถให้เสาสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้มากที่สุด จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำนายลักษณะการกระจายตัวของความร้อนในการที่จะไปผลักดันเสาให้เคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.4ค-ง ซึ่งผลที่ได้พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามากที่สุดที่จ่ายให้กับแอกชูเอเตอร์แล้วให้ผลการเคลื่อนที่จริงเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกต้องอยู่ที่ 150 mV ถ้าเกินกว่านั้นแนวโน้มความถูกต้องก็จะลู่ออก โดยให้การเคลื่อนที่ของเสาจริงอยู่ที่ 1.2 μm และแบบจำลองซึ่งวัดได้ 1.31 μm ต่างกัน 8.4%



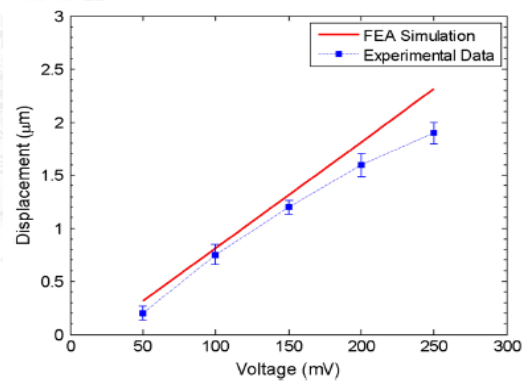
(ก)



(ข)



(ค)

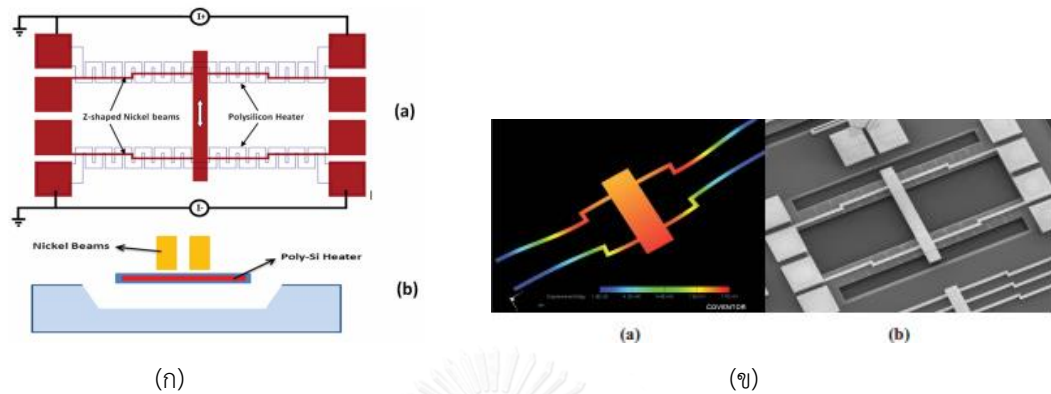


(ง)

รูปที่ 2.4 ลักษณะแอกัวเตอร์ของงานวิจัย Hongyun So et al.(2013) (ก) รายละเอียดของแอกัวเตอร์, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขน, (ค) ลักษณะการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทำไฟไนต์เอลิเมนต์, (ง) กราฟความสัมพันธ์ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะที่แขนเคลื่อนที่

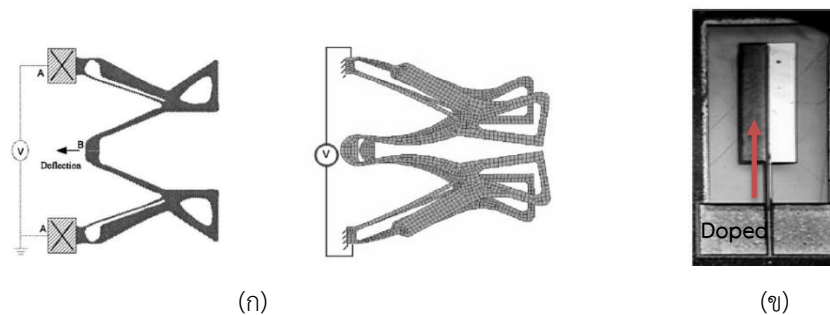
งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแอกัวเตอร์เชิงความร้อนมีหลากหลายแบบแต่หลักการการทำงานนั้นไม่ต่างกันอย่างเช่น ซึ่ง Yong zhu et al.2012[24] ได้ออกแบบแอกัวเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้สองทิศทางด้วยโครงสร้างตัว Z ดังแสดงในรูป 2.5ก-ข จากรูปเห็นได้ว่า แอกัวเตอร์ที่มีคานเป็นรูปตัว Z จะทำงานด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าไปที่คานจากนั้นจะเกิดการขยายตัวทางความร้อนของคาน Z เนื่องจากจะเกิดความร้อนสูงเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านด้านบนของ polysilicon heater ซึ่งมีค่า

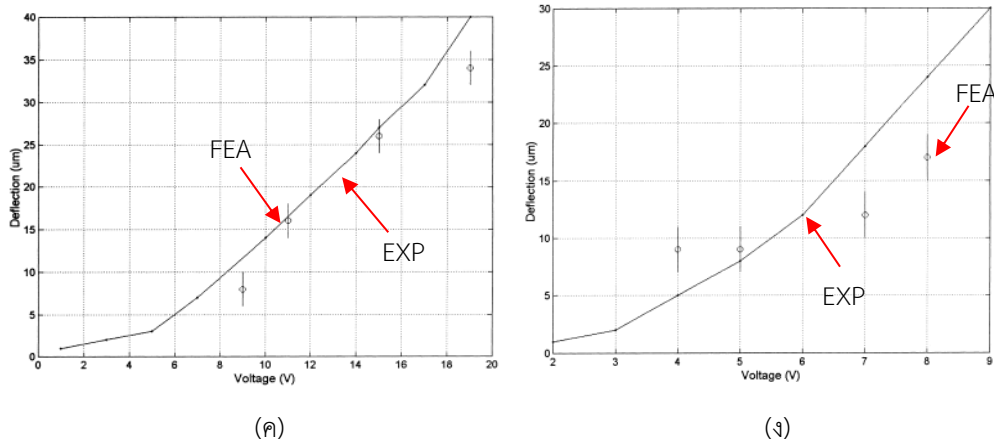
ความต้านทานทางความร้อนที่สูงทำให้เกิดความร้อน ให้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามต้องการ โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ -13 mA ถึง 13 mA ทำให้มีการเคลื่อนที่อยู่ในช่วง $-11.6 \text{ }\mu\text{m}$ ถึง $12.8 \text{ }\mu\text{m}$



รูปที่ 2.5 ลักษณะแอกชูเอเตอร์ของ Yong zhu et al.2012 (ก) รายละเอียดของแอกชูเอเตอร์รูปตัว Z, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง Z

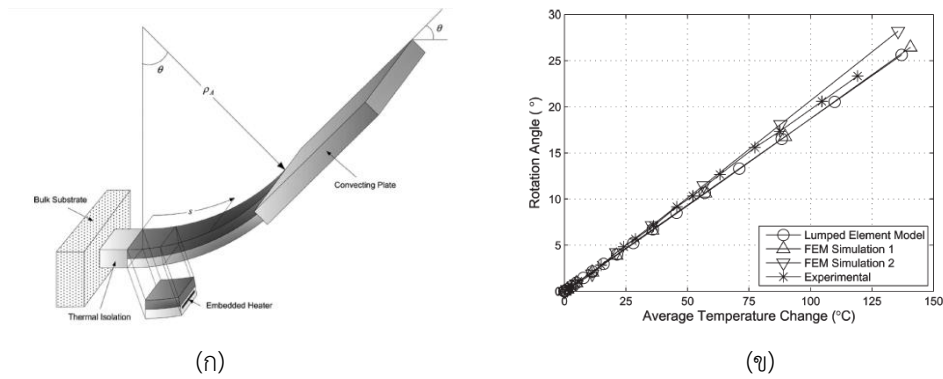
การเพิ่มความต้านทานภายในโครงสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์ก็เป็นอีกเทคนิคที่สามารถช่วยให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนมากขึ้นส่งผลให้มีระยะกระดกที่มากขึ้น โดยที่งานวิจัยของ Timothy moulton et al.2001[7] พูดยถึงการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยใช้ซิลิคอนเป็นฉนวนหุ้มแผ่นรองรับ(substrate) ซึ่งงานวิจัยนี้พิเศษอยู่ตรงที่บริเวณแขนที่จับสองแขนจะมีฝั่งหนึ่งที่เคลือบซิลิคอนแบบเดิมอยู่แล้วกับอีกฝั่งที่ทำการ Doping หรือการเคลือบสารเคมีบนวัสดุเพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.6ก-ง สามารถช่วยในการสร้างการกระจายตัวทางความร้อนบนชิ้นงานที่รับกระแสไฟฟ้าโดยตรงให้เป็นแบบการกระจายไม่สม่ำเสมอเพื่อเพิ่มการขยายตัวทางความร้อนหรือการขยายตัวทางความร้อน ทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งตัว ซึ่งได้นำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์





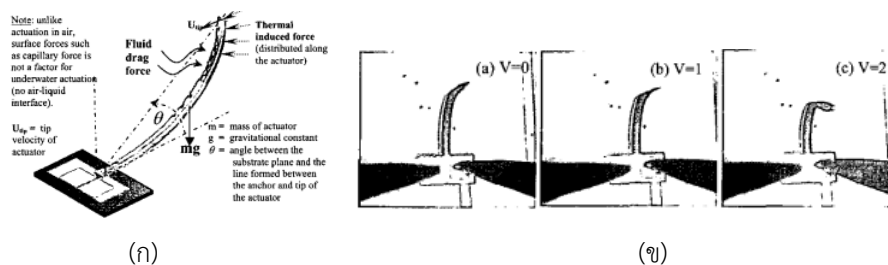
รูปที่ 2.6 ลักษณะแอกชูเอเตอร์ในงานของ Timothy moulton et al.2001 (ก) โดอะแกรมการทำงาน ของ ETC actuation, (ข) ลักษณะการเติมสาร Doping, (ค) การเคลื่อนที่ของแอกชูเอเตอร์ hot-arm-cold-arm ทั่วไป, (ง) การเคลื่อนที่ของแอกชูเอเตอร์เติมสาร doping เพิ่มเข้าไป

หลักการของไมโครแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนแบบใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันก็เป็นอีกเทคนิคที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้ซึ่งในงานวิจัยของ S.T.Todd et al.2008[17] ดังแสดงในรูปที่ 2.7ก-ข ได้ใช้ความแตกต่างของค่าการขยายตัวทางความร้อนในวัสดุที่มีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนภายในคานสองชั้น (Bimorph actuator) จะมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานภายในชิ้นงานที่มีความต้านทานและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันเพราะฉะนั้นจึงเกิดการขยายตัวทางความร้อน แต่ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบเพิ่มเติมเป็น Electrothermomechanical lumped element model หรือ ETM-LEM จะเป็นออกแบบที่ช่วยในการทำนายการโก่งตัวของแอกชูเอเตอร์คานสองชั้นที่ถูกป้อนด้วยพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น กระแสไฟฟ้า และโวลต์ ซึ่งในส่วนของ LEM จะเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าและความร้อนโดยมีตัวให้ความร้อนติดอยู่กับแอกชูเอเตอร์ที่เป็นแบบคานสองชั้น (Bimorph actuator) ซึ่งจะช่วยในการรักษาสมดุลทางความร้อนและแบ่งลักษณะการไหลตัวของความร้อนและการนำความร้อนในแต่ละฝั่งให้ไม่เกินกว่าอุณหภูมิสูงสุดที่แอกชูเอเตอร์ทนได้ ซึ่งผลการทดลองก็พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของคานและอุณหภูมิเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นแบบเชิงเส้น

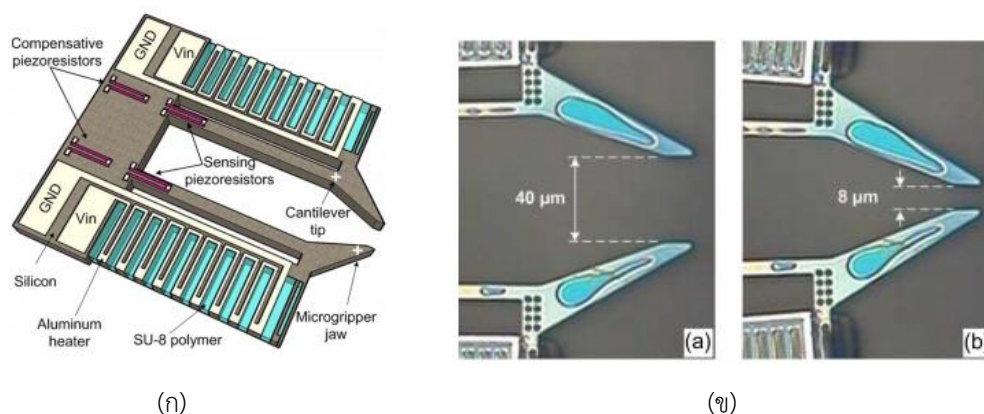


รูปที่ 2.7 ลักษณะของแอกชูเอเตอร์ S.T.Todd et al.2008 (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของคานสองชั้น, (ข) กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับการโก่งงอของคานสองชั้น

นอกจากนี้ยังมีรูปแบบที่หลากหลายที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงอีก Ho-Yin Chan et al.2003[12] ได้สร้างแอกชูเอเตอร์เชิงความร้อนโดยใช้โพลิเมอร์เป็นตัวหุ้มที่จับไว้เพื่อนำไปใช้ในการจับเซลล์ทางชีววิทยาในของเหลวที่อยู่ในจานเพาะเชื้อที่มีของเหลวเป็นตัวกลางคล้ายคลึงกับกับ B. Solano et al.2007[16] แต่ใช้ลักษณะเป็นแขนเดี่ยวงอจับ โดยใช้ SU-8 polymer เป็นโครงสร้างหลักเพราะคุณสมบัติของมันสามารถปรับการทำงานเข้ากับส่วนประกอบทางชีววิทยาได้ดีและสามารถทำงานได้ด้วยการกระตุ้นอุณหภูมิที่ต่ำ โดยที่การสร้างในงานวิจัยนี้จะไม่มีการใช้ Sacrificial layer เพื่อลดความต้านทานที่ฝั่ง cold-arm ส่งผลให้มีค่าการกระดกที่สูงมากขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่น้อยลง และเมื่อมีการจับเซลล์ที่มีขนาดเล็กก็ย่อมต้องมีการควบคุมแรงและตำแหน่งในการจับเซลล์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8ก-ข โดยทาง Trinh Chu Duc et al.2008[19] ได้ทำการออกแบบและสร้าง แอกชูเอเตอร์เชิงความร้อน ให้มีระบบเซ็นเซอร์แบบ Piezoresistive force sensing cantilever beams เพื่อช่วยในการจับวัตถุขนาดเล็กให้มีความแม่นยำพร้อมทั้งความเสถียรภาพและการควบคุมแรงในการจับวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.9ก-ข



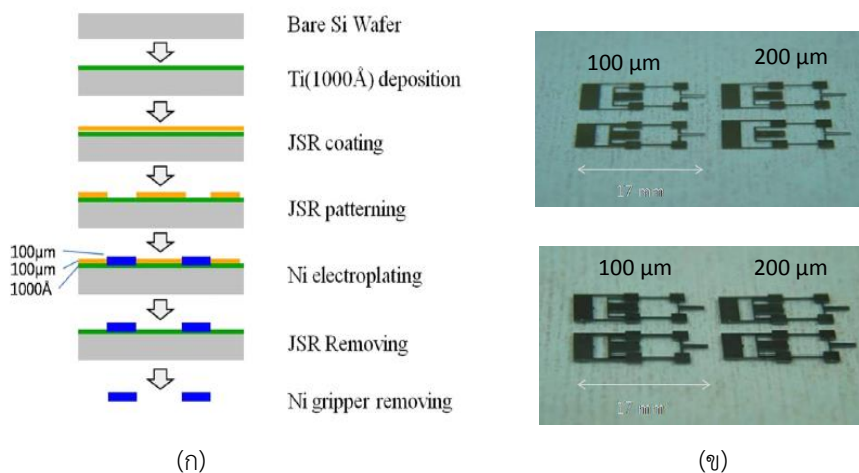
รูปที่ 2.8 ลักษณะของแอกชูเอเตอร์ Ho-Yin Chan et al.2003 (ก) รายละเอียดของแอกชูเอเตอร์แบบเสาเดี่ยว, (ข) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอกชูเอเตอร์แบบเสาเดี่ยว



รูปที่ 2.9 ลักษณะของแอกซ์เวเตอร์ Trinh Chu Duc et al.2008 (ก) รายละเอียดของแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนผสมกับ Sensing Piezoreistors, (ข) ลักษณะการทำงานของไมโครกริปเปอร์

2.2 การสร้างแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน

ลักษณะการสร้างกลไกขนาดเล็กในระดับไมโครสเกลนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะที่จะนำไปใช้และรูปแบบของไมโครแอกซ์เวเตอร์ว่าเป็นลักษณะใดและจะนำไปใช้งานแบบไหน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การวิจัยและพัฒนาการสร้างเพื่อขึ้นงานแอกซ์เวเตอร์ให้มีขนาดที่แม่นยำและประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดโดยใช้เทคโนโลยีสมัยของระบบเครื่องกลไฟฟ้า จุลภาคเข้ามาช่วย โดยงานวิจัยของ Bong-Seok Kim et al.2012[23] ได้กล่าวถึงการสร้างและวิเคราะห์ผลจากคุณสมบัติไมโครแอกซ์เวเตอร์สำหรับแขนกลในการจับวัตถุขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมา โดยการสร้างนี้จะยึดหลักที่รูปร่างชิ้นงานที่ออกมาและราคาไม่สูงมาก ซึ่งวัสดุสองชนิดที่ถูกใช้ในการสร้างนี้คือ ซิลิคอน(Si) และ นิกเกิล(Ni) มาทำกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยการปลูกฟิล์มไทเทเนียมและเคลือบด้วย JSR แล้วจึงทำการสร้างรูปแบบชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าเคมี สุดท้ายจึงกัดฟิล์มที่เหลือออกเพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยความหนาที่ต้องการสำหรับสร้างนี้คือ 100 μm วิธีการสร้างนั้นแสดงไว้ในรูปของไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.10ก-ข แล้วจะได้รูปร่างหลังจากสร้างโดยใช้ ซิลิคอนและนิกเกิล จะได้เป็นความหนาที่ 100, 200 μm



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการสร้างแอกชูเอเตอร์ในงาน Bong-Seok Kim et al.2012 (ก) ไดอะแกรมการสร้างชิ้นงานแบบ Micromachining, (ข).ลักษณะของชิ้นงานนิกเกิล(รูปบน) และซิลิคอน(รูปล่าง)

งานวิจัย H.Lorenz et al.1996[2] ได้นำเทคโนโลยีในการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกลมาสร้างเป็นส่วนประกอบขนาดเล็กของ เฟือง เกียร์ หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการสร้างแม่พิมพ์บนแผ่นราบเรียบที่เรียกว่า negative dry film resist mould (Riston) ง่ายต่อการใช้งานและสามารถสร้างเป็นชิ้นงานสามมิติได้ ซึ่งเทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้และรู้จักกันเป็นอย่างดีคือ LIGA ในปัจจุบันการสร้างชิ้นงานโครงสร้างขนาดเล็กที่มีหลายๆชั้นหรือชั้นเดียว แม้กระทั่งโครงสร้างที่มีมุมมีความชันเยอะ จะใช้วิธีการบวนการไฟฟ้าเคมีและ การใช้แผ่นฟิล์มพิมพ์ ลวดลายโครงสร้างลงบนแผ่นรองรับนั้นๆดังตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นเฟืองขนาดเล็ก

กระบวนการสร้างพื้นฐานที่ใช้ dry film ในการสร้างพิมพ์ลวดลายบนโครงสร้างระดับไมโครนั้นมีอยู่ 4 ขั้นตอนคือ ดังแสดงในรูปที่ 2.11ก-ข

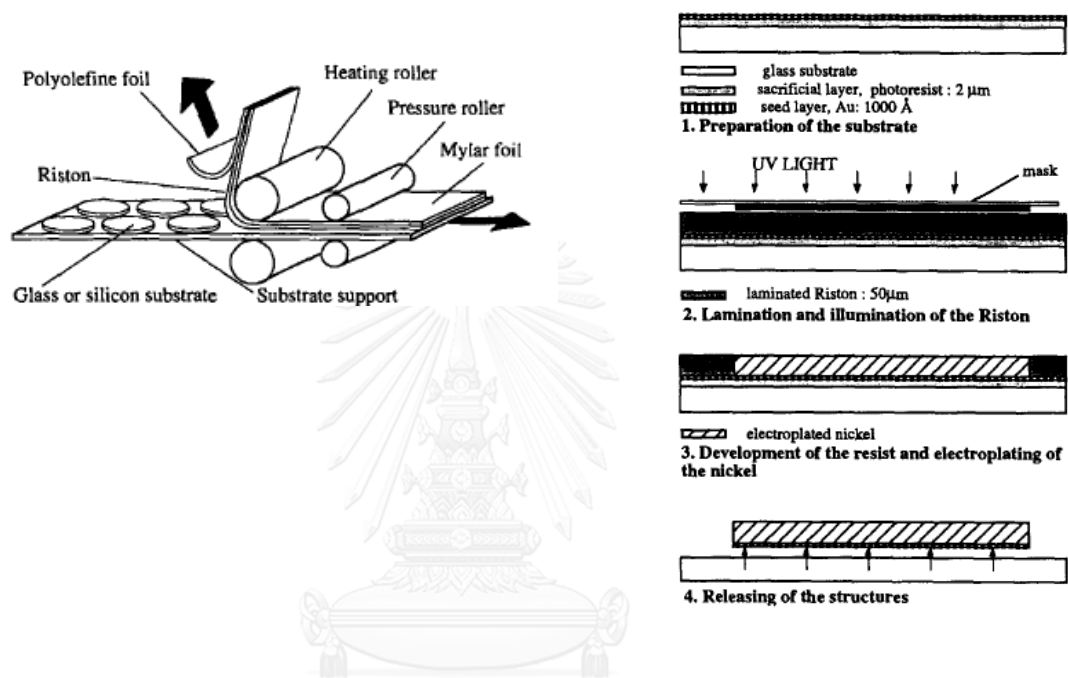
ขั้นตอนที่ 1 : เลือกใช้ฐานรองรับ(substrate) ที่เป็นแก้วหรือซิลิคอนที่ผ่านการออกซิไดซ์ มาเคลือบกับแผ่นโฟโตลิโซซชนิดบวกเพื่อสร้าง sacrificial layer

ขั้นตอนที่ 2 : ทำการลอกแผ่นโพลีโอเลฟินออกซึ่งเป็นแผ่นที่กั้นฟิล์ม Riston จากนั้นเคลือบ Riston ที่มี ด้วยความร้อน 110 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องลามิเนต จากนั้นแผ่น Riston จะถูกฉายแสงยูวีลงไปตาม mask

ขั้นตอนที่ 3 : กัดผิวที่ไม่ถูกแสงออกด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส แล้วนำเข้าสู่กระบวนการเคลือบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าเคมีโดยใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

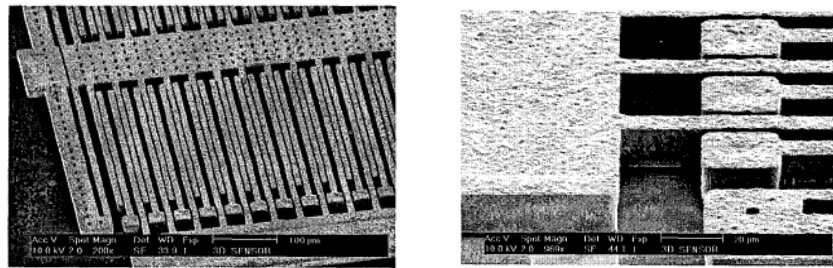
ขั้นตอนที่ 4 : นำชิ้นงานออกจากแบบที่ผ่านการเคลือบนิกเกิลด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 1.5% แล้วจึงนำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตนอีกที

ผลจากการสร้างพบว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นมีรูปร่างและขนาดโดยรอบมีความใกล้เคียงกับที่ ออกแบบไว้สามารถสร้างส่วนที่เป็นมุมลึกหรือที่มีความชันสูงออกมาได้เป็นอย่างดีเพราะฉะนั้นวิธี negative dry film resist mould นี้จึงเป็นอีกทางเลือกใหม่สำหรับนวัตกรรมในการสร้างโครงสร้าง ระดับจุลภาคที่ รวดเร็ว ง่ายต่อการทำและราคาถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องสร้างชิ้นงานที่มีหลายชั้น และเป็นแบบสามมิติ



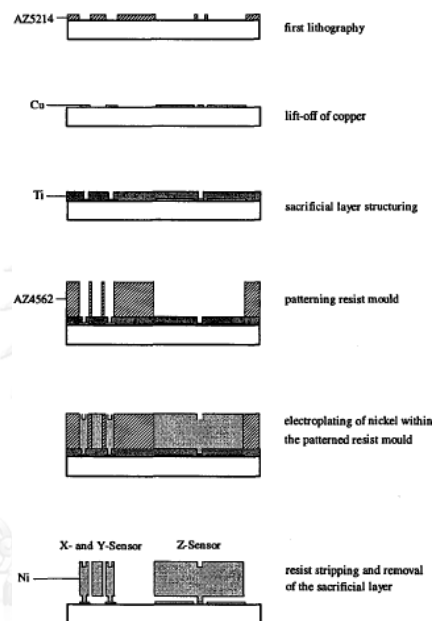
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการสร้างแอดซิวเอเตอร์ H.Lorenz et al (ก) การใช้ฟิล์มโฟโตลิซิสในการลามิเนต, (ข) ไดอะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA

งานวิจัยของ Wenmin Qu et al.1999[3] จะทำการสร้าง 3D-Accelarometer แสดงดังรูปที่ 2.12ก ด้วยเทคนิควิธีการสร้างชิ้นงานบนผิวแผ่นรองรับ(Substrate)โดยใช้วัสดุที่มีต้นทุนไม่แพง ซึ่งเทคนิคที่ใช้คือ UV-LIGA เพื่อทำลวดลายลงบนผิวและจากนั้นจึงทำการสร้างโครงสร้างขึ้นโดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกลที่ประหยัดที่สุด ซึ่งในขั้นตอนการ สร้างนั้นจะใช้เป็นโฟโตลิซิสแบบของเหลว AZ 4562 ซึ่งจะต้องนำมาเคลือบเป็นฟิล์มโฟโตลิซิสก่อน จากนั้นจึงทำการฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากที่เป็นแบบลงบนแผ่นรองรับ(Substrate) เพื่อที่จะได้เคลือบ ให้ได้ความหนาที่มาก จากนั้นนำทองแดง มาทำ Liftoff ที่ผิว แล้วใช้ทั้งสแตมมาเคลือบทับอีกชั้นเป็น Sacrificial layer แล้วจึงนำสารละลาย Developer มากัดผิวที่เป็นลวดลายออกให้เป็นร่องแม่พิมพ์ เตรียมไปทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.12ข



(ก)

(ข)



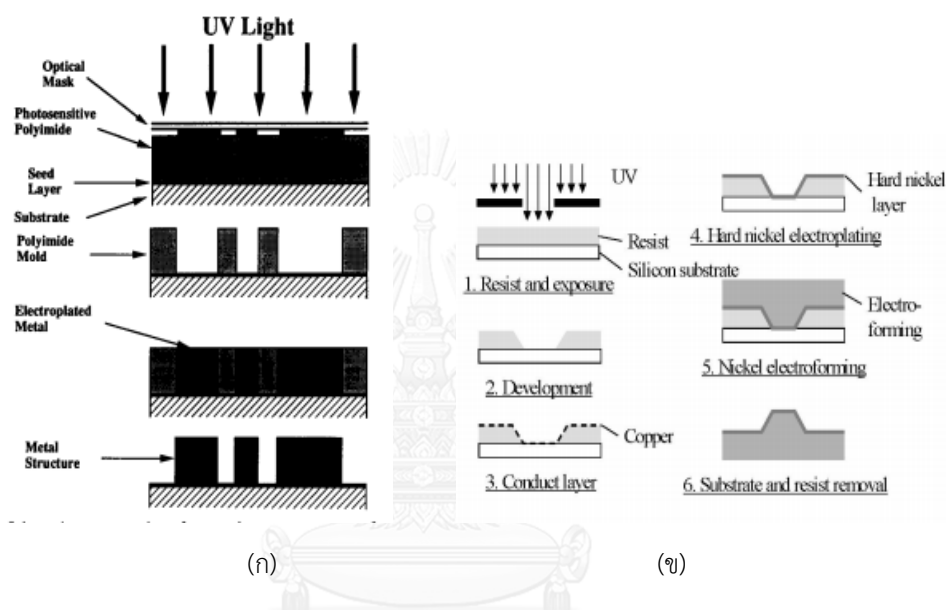
(ค)

รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสร้างแอกซ์เวเตอร์ของ Wenmin Qu et al.1999 (ก) ตรวจสอบชิ้นงานหลังจากทำการสร้างด้วย SEM, (ข) ไดอะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA

A. Bruno Frazier et al.1993[1] ก็ได้ทำการสร้างด้วยเทคนิคง่าย ๆ และประหยัดเช่นเดียวกันคือ UV-LIGA เพื่อสร้างโครงสร้างขนาดจุลภาคโดยใช้โฟโตลิซิสแบบ Polyimide มาเคลือบทับ Seed layer บนแผ่นรองรับ(Substrate) แล้วทำการฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากที่เป็นแบบของโครงสร้างจุลภาค จากนั้นนำสารละลายมากัดบริเวณที่เป็นแบบออกไปให้เป็นแม่พิมพ์แล้วจึงทำการเคลือบโลหะต่างแล้วได้ตามต้องการ และเคลือบผิวโลหะสองชั้นเพื่อเพิ่มความแข็งของวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.13ก

งานวิจัยของ Yoshitaka Sawa et al.2008[20] ได้นำโฟโตลิซิสมาเคลือบผิวของแผ่นซิลิคอนแล้วนำหน้ากากที่เป็นแบบมายิงแสงยูวีผ่านไปลงไป จากนั้นเอาสารละลายกัดบริเวณที่ไม่โดนแสงออก จากนั้นจึงเอาฟิล์มคอปเปอร์มาเคลือบทับลงบนแม่พิมพ์ แล้วจึงทำการเคลือบฟิล์มนิกเกิลก่อนทำการ

การชุบโลหะทางไฟฟ้าเคมีโดยการจุ่มลงในสารประกอบออร์แกนิกที่สามารถลดความเค้นระหว่างผิวแผ่นรองรับ (Substrate) กับชิ้นงานได้เพื่อให้ชิ้นงานสามารถหลุดออกมาได้ง่าย หลังจากทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นเวลา 1 นาที แล้วจากนั้นนำไปจุ่มลงในกรดไนตริก 10% เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดฟิล์มที่เป็นออกไซด์นิกเกิลและผิวที่ขรุขระก่อนที่จะนำไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีที่ด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจึงได้ผิวที่มีความแข็งและความความเค้นระหว่างชิ้นงานกับแผ่นรองรับ (Substrate) ลดลง แสดงดังรูปที่ 2.13ข

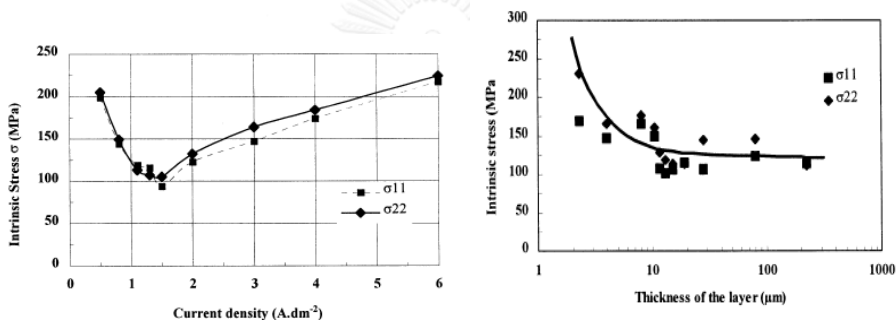


รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการสร้างแอกซ์เวเตอร์ (ก) โต๊ะแกรมการสร้างด้วยเทคนิค LIGA แบบใช้โฟลีโอไมด์ของ A. Bruno Frazier et al.1993, (ข) โต๊ะแกรมในการสร้างด้วยเทคนิค LIGA แบบเคลือบนิกเกิลสองชั้นของ Yoshitaka Sawa et al.2008

เมื่อทราบถึงเทคนิคการสร้างที่เป็นที่นิยมสำหรับการสร้างชิ้นงานที่มีสเกลระดับไมโครเมตรแล้ว ส่วนประกอบในแต่ละขั้นตอนก็มีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากส่วนประกอบหรือตัวแปรในแต่ละขั้นตอนสามารถพัฒนาการสร้างชิ้นงานให้ดีขึ้นและกำหนดขอบเขตการสร้างให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดย S. Basrou et al.2010[21] ได้พิจารณาถึง ความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่เกิดขึ้นในช่วงของการทำ LIGA กับ Nickel electroplating ซึ่งความเค้นตกค้างนี้มีผลอย่างมากกับสมรรถนะทางกลของไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นมา โดยใช้ X-ray วิเคราะห์ผล ซึ่งวิธี LIGA มีอยู่สองแบบคือใช้ X-ray lithography และ UV lithography ขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้ โดยความเค้นตกค้างนี้จะเกิดในช่วงกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพราะฉะนั้นเราจึงสนใจพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ

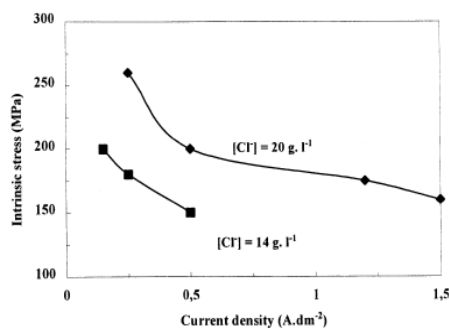
กระบวนการไฟฟ้าเคมี เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความหนาแน่นในแต่ละชั้นบนฐานรองรับ และวัสดุของแผ่นรองรับ

รูปที่ 2.14ก แสดงค่า intrinsic stresses ของนิกเกิลบนคอปเปอร์ substrate เทียบกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าพบว่า ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 1.5 A/dm^2 เป็นค่าที่ ค่า intrinsic stresses มีค่าน้อยที่สุด จากรูปที่ 2.14ข แสดงค่า intrinsic stresses กับความหนาแน่นของชั้นนิกเกิลบน substrate สังเกตได้ว่าค่า intrinsic stresses จะมีมากในช่วงที่ความหนาแน่นของชั้นต่ำกว่า $10 \mu\text{m}$ และที่ความหนาแน่นของชั้นนิกเกิลมากกว่า $80 \mu\text{m}$ จะมี intrinsic stresses เท่ากันที่ 100 MPa จากรูปที่ 2.14ค จะพิจารณาโดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต แล้วเปรียบเทียบ intrinsic stresses กับ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เห็นได้ชัดว่ายิ่งมีความเข้มข้นสารละลายคลอไรด์ยิ่งทำให้เกิด intrinsic stresses มากขึ้น



(ก)

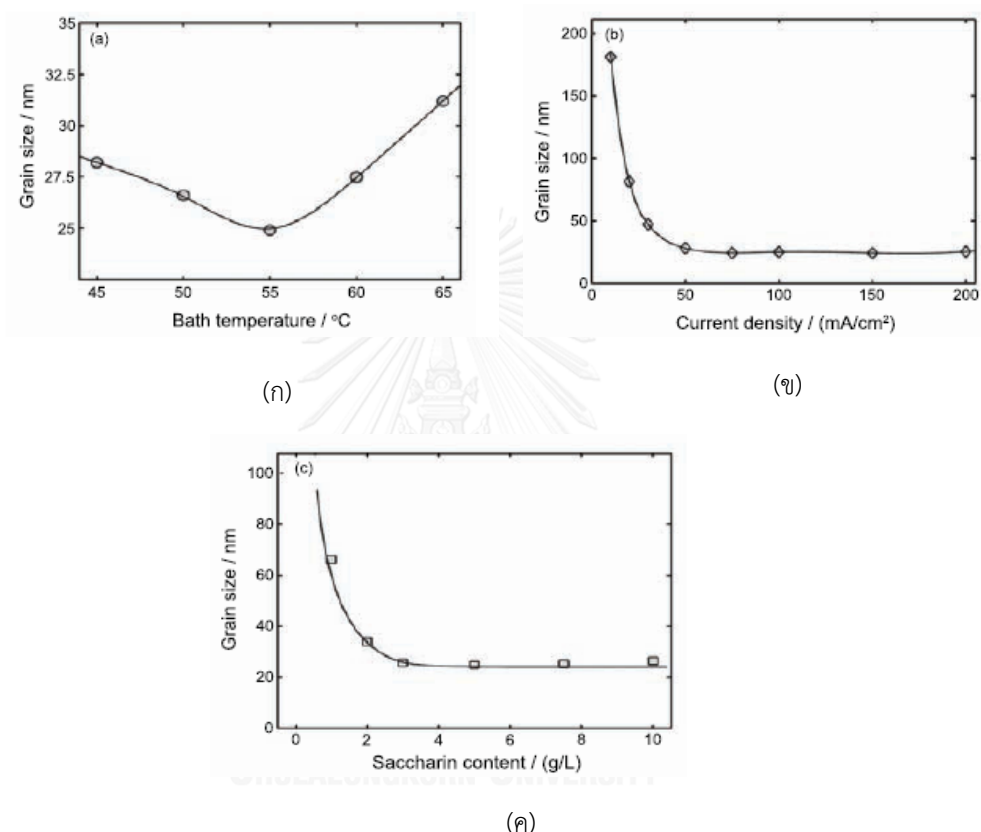
(ข)



(ค)

รูปที่ 2.14 ผลการศึกษาของโดย S. Basrou et al.2010 (ก) แสดงผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อ Intrinsic stress, (ข) แสดงผลของความหนาแน่นของชั้นแม่พิมพ์ที่มีต่อ Intrinsic stress, (ค) แสดงผลของส่วนประกอบคลอไรด์ ที่มีต่อ Intrinsic stress

งานวิจัยของ A.M. Rasshidi et al.2010[22] นี้จะพูดถึงการพัฒนากระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อใช้สร้าง nanocrystalline ของนิกเกิลที่เคลือบให้ดีขึ้น ในการทดลองจะเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังนี้ สารละลายนิกเกิลซัลเฟต 30g/l นิกเกิลคลอไรด์ 30g/l และกรดบอริก 30g/l ในส่วนของแท่งแอโนดจะใช้แผ่นนิกเกิล 99.99% ฟังแคโทดจะใช้เป็นแผ่นคอปเปอร์ที่ผ่านการอบมาและขัดด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อให้ผิวเรียบ

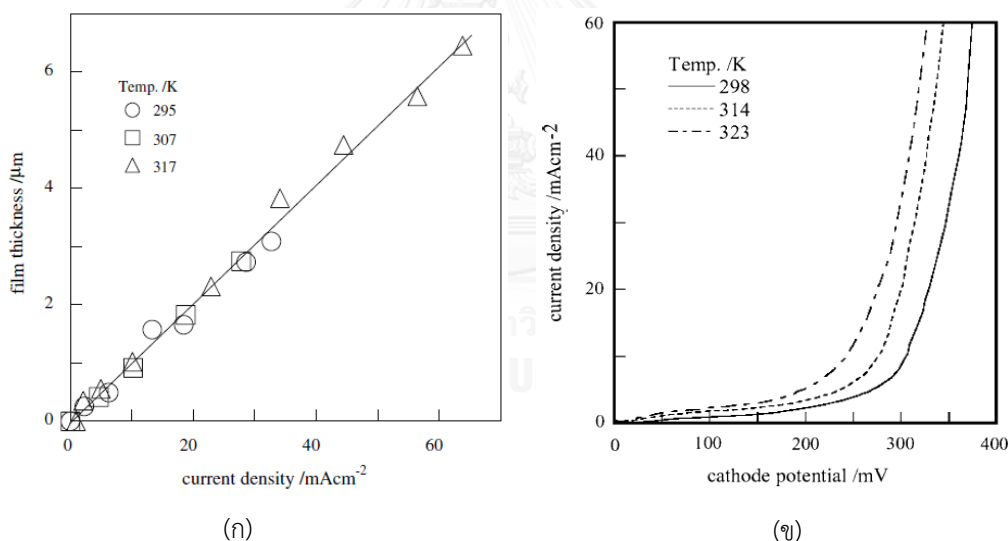


รูปที่ 2.15 ผลการศึกษาของ A.M.Rasshidi et al.2010 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายที่มีผลต่อขนาดของเกรน, (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อขนาดของเกรน, (ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงสารละลายซัคคารินที่มีผลต่อขนาดของเกรน

รูปที่ 2.15ก-ค สรุปได้ว่าขนาดของเกรนของนิกเกิลที่เคลือบจะลดลงเมื่อให้ความร้อนที่ 55 °C ขึ้นไป เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามากกว่า 75mA/cm² พร้อมกับการเพิ่มความเข้มข้นของ saccharin เป็น 3g/l จะช่วยลดขนาดเกรนเฉลี่ยและความหนาของนิกเกิลที่เคลือบลงได้ จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) 75 – 100 mA/cm² ความเข้มข้นของ saccharin 3g/l ขึ้นไปและอุณหภูมิ ต้อง

เป็น 55°C ซึ่งผลของอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการทำไฟฟ้าเคมีนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะสร้างชิ้นงานมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

M.Saitou et al.2008[18] ได้ทำการศึกษาผลของการชุบโลหะทางไฟฟ้าเคมีด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตดังแสดงในรูปที่ 2.16ก ซึ่งแสดงผลในกราฟความหนาของฟิล์มนิกเกิลเมื่อถูกเคลือบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเวลา 300 วินาที ที่อุณหภูมิของสารละลายคือ $295, 307, 317^{\circ}\text{C}$ และในรูปที่ 2.16ข จะบอกถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแคโทดหรือประสิทธิภาพที่ทำให้มีความสามารถในการรับไอออนได้ดีในแต่ละอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งผลการศึกษานั้นจะเห็นว่าสามารถเลือกความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการนำไปใช้ซึ่งการที่จะพัฒนาการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีให้ได้ชิ้นงานที่ดีอาจจะต้องศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะส่งผลต่อหลายอย่างเช่น ความเร็วในการเคลือบโลหะ สมบัติทางกล ขนาดเกรน เป็นต้น ซึ่งเป็นงานวิจัยเพิ่มเติมจากงานของ Y.TSURU et al.1999[4]



รูปที่ 2.16 ผลการศึกษาของ M.Saitou et al.2008 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาของฟิล์มที่ถูกเคลือบกับการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยมีอุณหภูมิสารละลายที่แตกต่างกัน, (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับไอออนโดยมีอุณหภูมิสารละลายที่แตกต่างกัน

2.3 การศึกษาสมบัติของนิกเกิลที่สร้างมาจากกระบวนการชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

สมบัติทางวัสดุของชิ้นงานนิกเกิลในระดับไมโครสเกลนั้นเป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะทำให้ทราบถึงคุณลักษณะเฉพาะตัวจุดเด่นและจุดอ่อนที่เกิดขึ้นกับนิกเกิลที่สร้างมาจากการชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้า

เคมี ซึ่งจะทำให้สามารถนำข้อมูลนี้มาช่วยในการพิจารณารูปแบบและการนำไปใช้งานให้ตรงกับความสามารถที่ชิ้นงานนั้นจะสามารถทำได้ สำหรับโลหะนิกเกิลหรือโลหะใดๆนั้นมีการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุหลายอย่าง เช่น ความแข็ง ความเหนียว โมดูลัสของยัง ลักษณะผิว เป็นต้น แต่ละสมบัติก็มีเทคนิคที่แตกต่างกันไป ในงานวิจัยของ T.Fritz et al.2001[8] ได้กล่าวถึงการศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างนิกเกิลในระดับไมโครสเกลโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ไปที่ชิ้นงานนิกเกิลที่ผ่านการชุบโลหะด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งได้ทำการหาเอกลักษณ์ภายในโครงสร้างที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและแผ่นรองรับที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.17ก-ข ซึ่งเป็นข้อมูลจากการทำวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งบอกถึงเอกลักษณ์โครงสร้างสำหรับชิ้นงานนั้นๆในรูปดรชนีมิลเลอร์ แล้วใช้เครื่อง SEM ส่องดูผิวหลังจากสร้างชิ้นงานขึ้นมา

งานต่อมาของ T.Fritz et al.2002[9] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชุบโลหะหรือเคลือบโลหะนิกเกิลว่าให้ผลอย่างไรต่อสมบัติทางวัสดุของชิ้นงานนิกเกิลซึ่งได้มีการทดสอบหาค่าโมดูลัสของยัง รูปลักษณะของผิวนิกเกิล และความแข็งของชิ้นงาน โดยการศึกษาเอกลักษณ์ของชิ้นงานนิกเกิลนั้นในแต่ละความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปจะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) แสดงดังรูปที่ 2.18ก-ข การหาความแข็งสำหรับชิ้นงานนิกเกิลในขนาดไมโครสเกลในงานวิจัยนี้คือการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness) ซึ่งจะแสดงค่าความแข็งเทียบกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปโดยค่าความแข็งแบบวิกเกอร์แสดงในหน่วย HV

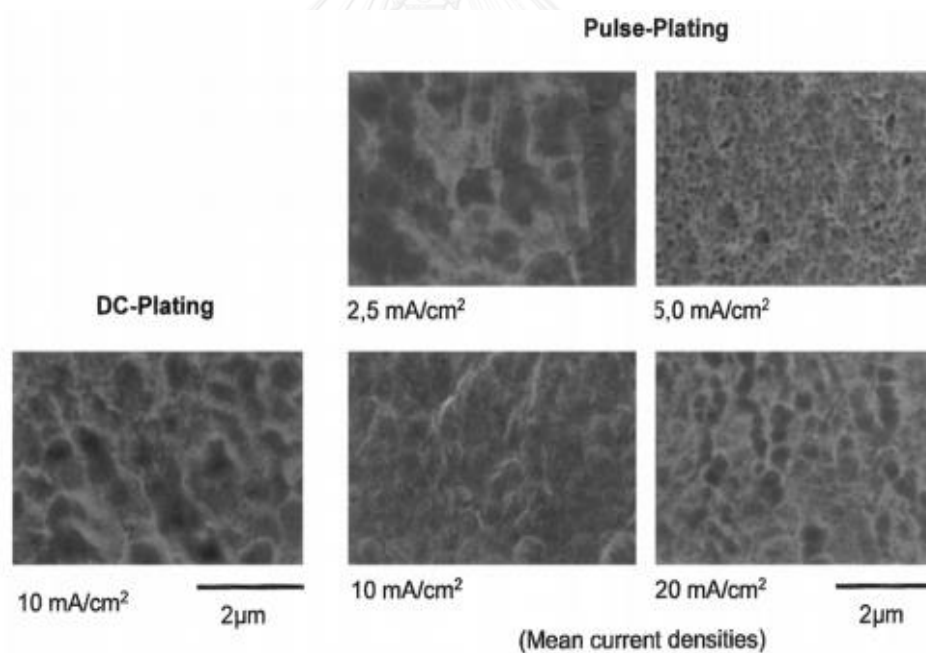
การหาค่าโมดูลัสของยังนั้นระบุไว้ในอีกงานวิจัยที่ร่วมกับ T. Fritz et al.2003[11] ได้ใช้วิธี laser-acoustic method และ resonance frequency measurements of laterally and vertically swinging cantilever แสดงดังรูปที่ 2.19ก-ค ซึ่งพบว่าให้ค่าโมดูลัสของยังที่ใกล้เคียง ซึ่งเป็นวิธีการที่ซับซ้อนและต้องใช้อุปกรณ์หลายตัวในการวัดและวัดได้เฉพาะบางชิ้นงานเท่านั้น แต่ในงานวิจัยของ J.K.Luo et al.2004[13] ได้นำเสนอการหาค่าโมดูลัสของยังที่ง่ายกว่าโดยใช้ฟิล์มนิกเกิลที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้หลักการโค้งตัวของคานแล้ววัดค่าการโค้งตัวของคาน จากนั้นนำไปเข้าสู่หาค่าโมดูลัสของยัง โดยแรงที่ใส่เข้าไปเพื่อให้คานโค้งลง จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า DekTak 8 machine เป็นเครื่องทดสอบความแข็งระดับไมโครสเกลพร้อมกับวัดการเคลื่อนที่ของปลายฟิล์มหรือการโค้งตัวที่จะทดสอบและเครื่องนี้จะให้แรงอยู่ในช่วง 1-50 μN ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงกับระยะการโค้งตัวแสดงอยู่ในรูปที่ 2.20ก-ข

งานของ Lyndon S et al.2001[5] ได้ศึกษาหาคุณสมบัติทางกลสำหรับชิ้นงานระดับไมโครสเกลที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างกันโดยการทดสอบจะใช้หลักการการโค้งตัวของคาน ซึ่งตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติที่ทดสอบด้วยสองสารละลายแสดงดังรูปที่ 2.21ก-ข

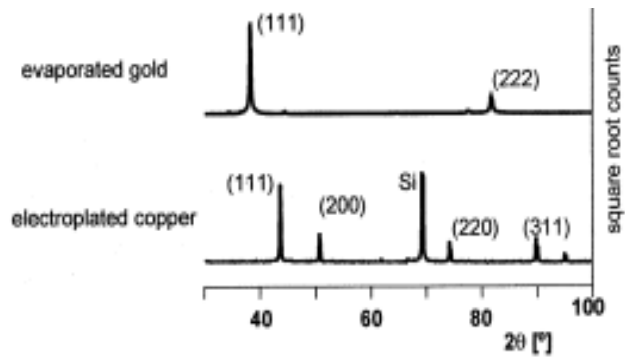
การหาคุณสมบัติทางวัสดุหรือทางกลนั้นมีหลายวิธีโดยงานวิจัยของ THOMAS E et al.2002[10] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลและคุณลักษณะของโครงสร้างของชิ้นงานในระดับ

จุลภาคที่สร้างด้วยวิธี LIGA ซึ่งในกระบวนการไฟฟ้าเคมีได้ใช้สารละลายสองตัวในการสร้างคือนิกเกิลซัลฟามेटและซัลเฟต เพื่อนำมาทดสอบหาคุณสมบัติทางกลที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลาย โดยการทดสอบทางกลนี้ได้สร้างชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปค้อนจากทั้งสองสารละลายดังแสดงในรูปที่ 2.22ก โดยนำมาอบที่อุณหภูมิต่าง 1 ชั่วโมง แล้วจึงมาทดสอบแรงดึงเพื่อที่จะหาค่ามอดูลัสของยัง ความเค้นจุดคราก ความเค้นสูงสุด เป็นต้น และทดสอบความแข็ง โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 2.22ข-ค ซึ่งงานวิจัยของ K.J. Hemker et al.2001[6] ก็ใช้หลักการเดียวกันแต่เพิ่มการอบให้กับแม่พิมพ์ก่อนที่จะทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี จากนั้นจึงนำไปทำการตรวจสอบคุณลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD สุดท้ายจึงนำไปทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.23ก-ข

จากที่ได้อธิบายกล่าวมาเกี่ยวกับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของแอคชูเอเตอร์ การสร้างแอคชูเอเตอร์ การทดสอบสมบัติทางวัสดุ และสมรรถนะการทำงานของแอคชูเอเตอร์ในรูปแบบต่างๆ ทางผู้วิจัยจึงได้สรุปภาพรวมรายละเอียดที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1

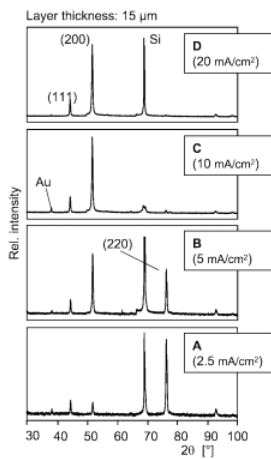


(ก)

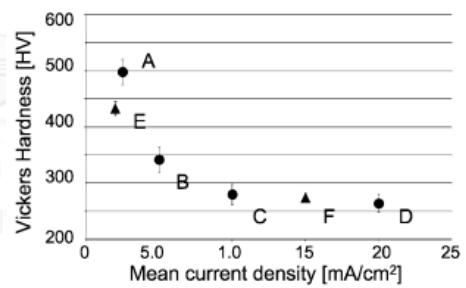
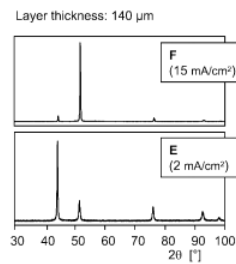


(ข)

รูปที่ 2.17 ผลการศึกษาของ T.Fritz et al.2001 (ก) ลักษณะของผิวเกรนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกันไป, (ข) ลักษณะของระนาบผลึกที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างโดยการใช้เทคนิค XRD

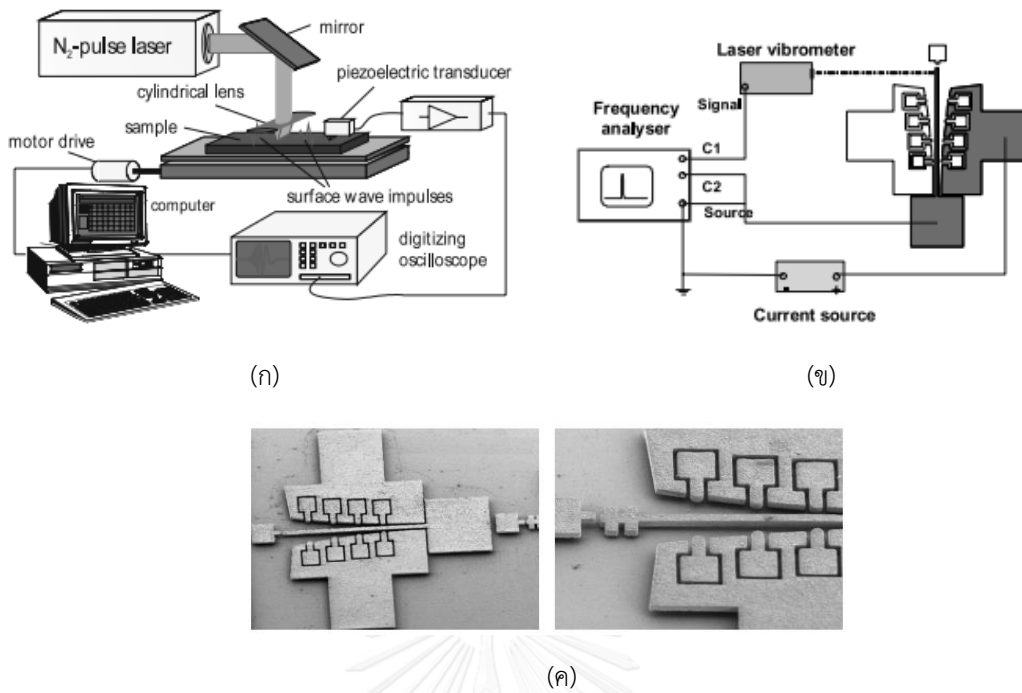


(ก)

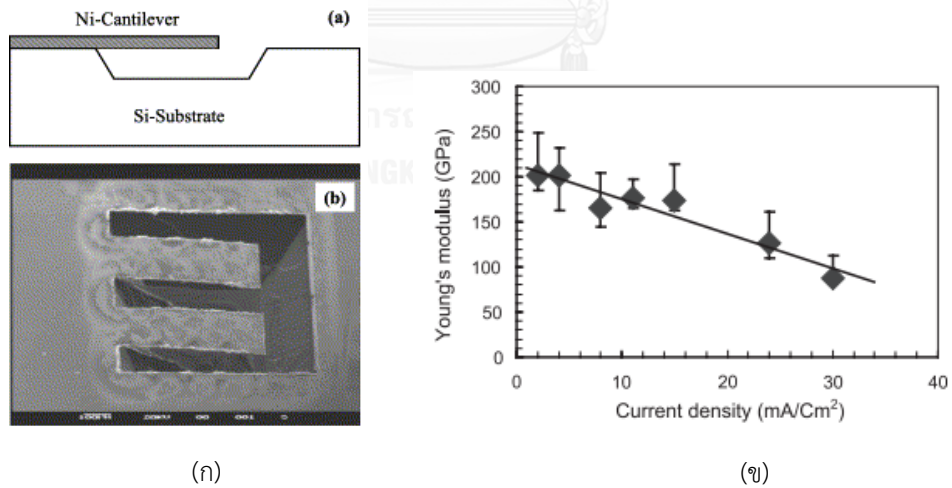


(ข)

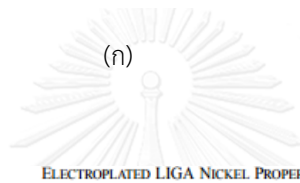
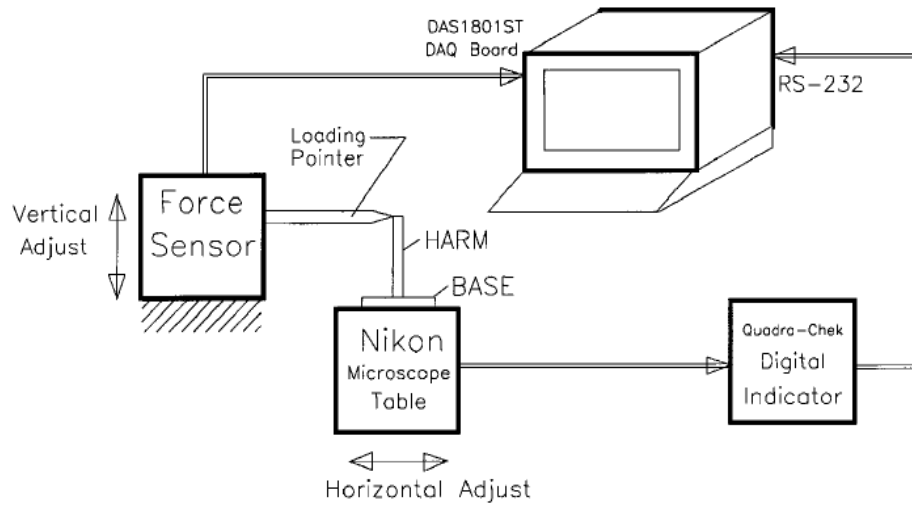
รูปที่ 2.18 ผลการศึกษาของ T.Fritz et al.2002 (ก) ลักษณะของระนาบผลึกที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยการใช้เทคนิค XRD, (ข) ผลของค่าความแข็งแบบวิกเกอร์กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.19 ผลการศึกษาของ T. Fritz et al.2003 (ก) ไดอะแกรมการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังแบบ Laser acoustic, (ข) ไดอะแกรมการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังแบบ Resonant frequency, (ค) ตรวจสอบลักษณะของ Electrostatic actuators ด้วย SEM



รูปที่ 2.20 ผลการศึกษาของ J.K.Luo et al.2004 (ก) ภาพตัดขวางของคานานิกเกิลและภาพจาก SEM ที่แสดงคานานิกเกิลที่ถูกทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีนิกเกิล, (ข) ผลของค่ามอดูลัสของยังกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดๆ ที่อุณหภูมิสารละลาย 60 องศาเซลเซียส

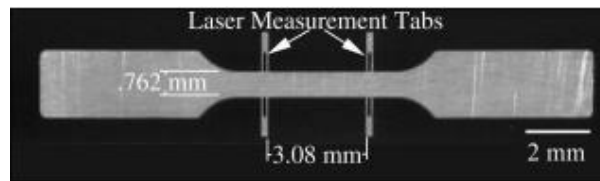


ELECTROPLATED LIGA NICKEL PROPERTIES

Reference	Bath	Current Density (mA/cm ²)	Test Type	Specimen Cross Section	Grain Size (μm)	Elastic Modulus (GPa)	Vickers Hardness	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
Mazza [6]	Sulf	10	Tensile (L)	20 x 120-200 μm	40-100 (columnar)	202	--	405	782
Sharpe [23,24]	Sulf	--	Tensile (L)	200 x 200 μm	(columnar)	176	183-254	323	555
Buchheit [7]	Sulf	20 and 50	Tensile (L) Comp. (ll)	160 μm (L) D= 1.6 mm, h= 1 mm (ll)	2-3 μm (lenticular)	160	200-300	277(T) 270(C)	--
Christenson [5]	Sulf	20-70	Tensile (L)	--	--	160	173-257	275-441	--
Greek [22]	--	--	Tensile (L)	14 x 6 μm	--	231	--	1550	2470
Present study	Watts	30	Bending (ll)	160 x 160 μm	<1 μm (random)	214	400	--	2100 (σ _R)
Present study	Sulf	30	Bending (ll)	160 x 160 μm	<1 μm (columnar)	125	400	--	1600 (σ _R)

(ข)

รูปที่ 2.21 ผลการศึกษาของ Lyndon S et al.2001 (ก) ได้อะแกรมการทดสอบการโค้งงอของคาน(ข) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและซัลฟามेत



(ก)

Number of Tests	Sample	Elastic Modulus (GPa)	Proof Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain to Failure	Nanohardness		
						Number of tests	VHN	Modulus (GPa)
3	as-deposited*	155 ± 11	305 ± 12	562 ± 9.2	0.124 ± 0.005	10	213 ± 28.6	177 ± 8.7
2	as-deposited	136	327	556	0.093	—		
2	300 °C	138	328	545	0.126	10	189 ± 18.0	169 ± 11.2
2	400 °C*	124	274	486	0.158	10	195 ± 11.1	175 ± 9.0
1	450 °C	139	310	503	0.136	10	194 ± 21.7	168 ± 9.6
2	500 °C*	121	230	489	0.246	10	166 ± 12.9	179 ± 9.0
1	550 °C	166	245	479	0.220	10	173 ± 9.6	165 ± 9.2
2	600 °C	94	189	473	0.276	10	162 ± 12.1	161 ± 10.1
2	700 °C	88	95	470	0.277	10	127 ± 11.7	159 ± 10.0

*Samples from a separate deposition run.

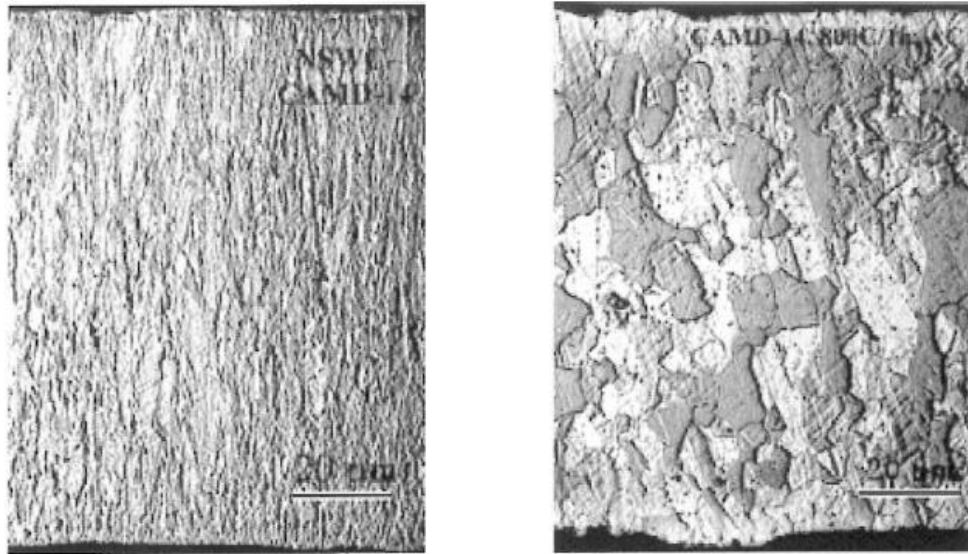


(ข)

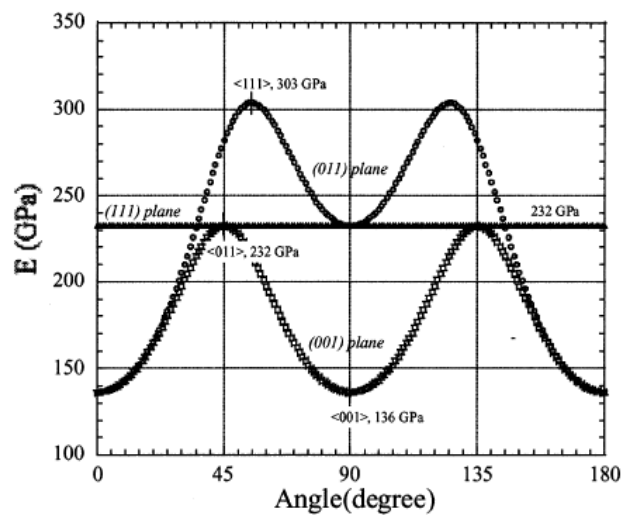
Number of Tests	Sample	Elastic Modulus (GPa)	Proof Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Strain to Failure	Nanohardness		
						Number of tests	VHN	Modulus
2	as-deposited	163	592	942	0.055	10	362 ± 8.7	161 ± 6.5
1	300 °C	152	655	903	0.055	10	360 ± 21.2	154 ± 7.2
2	400 °C	162	630	863	0.066	10	343 ± 10.5	196 ± 9.0
1	450 °C	158	435	720	0.19	10	251 ± 19.3	169 ± 9.1
2	500 °C	140	281	619	0.276	10	194 ± 13.0	173 ± 7.6
2	550 °C	221	270	621	0.277	9	218 ± 7.0	160 ± 7.7
2	600 °C	178	214	567	0.277	10	164 ± 6.4	116 ± 9.0
2	700 °C	73	102	462	0.274	9	177 ± 9.3	163 ± 8.0

(ค)

รูปที่ 2.22 ผลการศึกษาของ THOMAS E et al.2002 (ก) ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างรูปค้อน, (ข) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต, (ค) ผลของคุณสมบัติของนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.23 ผลการศึกษาของ K.J. Hemker et al.2001 (ก) รูปทางซ้ายเป็นการเคลือบโลหะในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบปกติและรูปทางขวาเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบมาก่อนที่จะมาทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี, (ข) ค่ามอดูลัสของยังที่มีระนาบผลึกนิกเกิดแตกต่างกันไป

ตารางที่ 2.1 สรุปการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[1].(Bruno Frazier and Allen 1993)	ใช้หลักการ LIGA ซึ่งประกอบด้วย โฟโวลติโทกราฟีและกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้โพลิเอไมด์มาสร้างเป็นแม่พิมพ์	สร้างแม่พิมพ์ด้วยโฟโวลติโทกราฟีโพลิเอไมด์และทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยโลหะโครเมียม, ทองแดง และนิกเกิล ตามลำดับ	ได้เฟืองที่มีความสูง 50 μm และมีช่องว่างระหว่างเฟืองและแกนอยู่ 2 μm ทำให้สามารถหมุนรอบได้	สร้างชิ้นงานรูปแบบต่างในระดับไมโครสเกลได้อย่างง่ายและลดต้นทุนการสร้าง
[2].(Lorenz, Paratte et al. 1996)	ใช้หลักการ LIGA ซึ่งประกอบด้วย โฟโวลติโทกราฟีและกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้โฟลิซิสแบบแผ่นในการสร้าง	แผ่นรองรับเป็นกระจกสไลด์และมีแผ่นโฟลิซิสไวแสงชนิดลบช่วยเคลือบผิวพร้อมทั้งโลหะทองเคลือบเป็นด้วยอีกชั้น จากนั้นจึงทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยนิกเกิล	มีโลหะนิกเกิลมาเกาะที่เฟืองขนาดเล็กเกินกว่าแบบที่วางไว้อยู่ 20 μm	สร้างชิ้นงานรูปแบบต่างในระดับไมโครสเกลได้อย่างง่ายและลดต้นทุนการสร้าง
[3].(Qu, Wenzel et al. 1999)	ใช้หลักการ LIGA ซึ่งประกอบด้วย โฟโวลติโทกราฟีและกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้เทคนิค liftoff เข้ามาช่วยในการสร้างลวดลาย	แผ่นรองรับเป็นซิลิคอนและมีโฟโวลติซิสชนิด AZ5421 ช่วยเตรียมความหนาสำหรับสร้างลวดลายพร้อมทำ lift off ด้วยทองและเคลือบไทเทเนียมก่อนทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยนิกเกิล	สามารถสร้างชิ้นงานสามมิติด้วยความหนาถึง 100 μm และมี aspect ratio 10:1	สร้างกลไกระดับไมโครสเกลบนบอร์ดไอซีหรือบนชิพคอมพิวเตอร์ได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ
[4].(Tsuru, Nomura et al. 2000)	ศึกษาส่วนผสม คอโรด์, โบรไมด์ และไอโอดีนไอออนในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตที่ส่งผลกับ internal stress ของแผ่นรองรับโดยการนำสายไฟความต้านทานไปติดที่แผ่นทำหน้าที่เป็น strain gauge	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	- สารละลายที่มีคอโรด์และโบรไมด์ไอออนที่ความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 M จะมี internal stress 140-170 MPa - สารละลายไอโอดีนที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.1M จะทำให้มี internal stress สูงกว่าคอโรด์และโบรไมด์ ทุกความเข้มข้น	ใช้ปรับแต่งสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[5].(Stephens, Kelly et al. 2001)	ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลเช่นมอดูลัสของยังของชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลเฟตในกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีการโค้งตัวของคาน	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	มอดูลัสของยังที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีค่า 185GPa และที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีค่า 93GPa	หาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสเกลโดยเปรียบเทียบสารละลายที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีของโลหะนิกเกิลได้
[6].(Hemker and Last 2001)	ทำการสร้างชิ้นงานนิกเกิลตัวอย่างด้วยเทคนิค LIGAขึ้นมาเพื่อนำเข้าเครื่องทดสอบแรงดึงของชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค	- เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล - ขนาด 3mm x 1mm	ค่ามอดูลัสของยัง 180 ± 24 GPa	เป็นตัวเลือกในการหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสเกล
[7].(Moulton and Ananthasurush 2001)	เป็นกลไกที่ถูกจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันออกไปในหลายๆแบบพร้อมกับเพิ่มเทคนิคที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Doping) ที่ดีเพื่อช่วยให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนได้ดีขึ้น	- โครงสร้างใช้เป็นซิลิคอนและบางส่วนถูกเคลือบด้วยสารโบรอนเพิ่มคุณสมบัติทางไฟฟ้า - สเกลอยู่ในระดับไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร	แอคชูเอเตอร์ที่ทำงานด้วยวิธีทั่วไปแบบความแตกต่างของโครงสร้างค่าระยะกระดกที่ได้จะใกล้เคียงกับผลของแบบจำลอง คือ 14V จะให้ระยะกระดกที่ 23 μ m แต่แอคชูเอเตอร์ที่เคลือบโบรอนเข้าไปจะได้ระยะกระดกที่มากกว่าแบบจำลองและแบบแอคชูเอเตอร์ทั่วไป คือ 8V จะให้ระยะกระดกที่ 23 μ m	ใช้เป็นกลไกในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[8].(Fritz, Mokwa et al. 2001)	ใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาคุณลักษณะของโครงสร้างผลึกนิกเกิล จากการทำการกระบวนการไฟฟ้าเคมี	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิลบนแผ่นรองรับที่เป็นทองและทองแดง	เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าขนาด $2\text{mA}/\text{cm}^2$ ระบายผลึกจะแสดงที่(110) และถ้าเพิ่มเป็น $20\text{mA}/\text{cm}^2$ ระบายผลึกจะแสดงที่(100) โดยเมื่อเคลือบนิกเกิลลงบนแผ่นรองรับที่เป็นทองที่มีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงๆจะทำให้ผิวมีความละเอียดมากขึ้น	เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุที่มีโครงสร้างมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใดๆในกระบวนการไฟฟ้าเคมี
[9].(Fritz, Cho et al. 2002)	- ใช้เทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึก - วัดความแข็งด้วยวิธีการทดสอบแบบวิกเกอร์ - วัดค่ามอดูลัสของยังแบบ Loading กับ Unloading	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	ความแข็งแรงขึ้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยที่ $2\text{mA}/\text{cm}^2$ แต่วัสดุจะเปราะแต่มีค่ามอดูลัสยังและความแข็งที่สูง สำหรับ $15\text{mA}/\text{cm}^2$ วัสดุจะเหนียวและมีค่ามอดูลัสของยังกับค่าความแข็งที่ต่ำ	เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุที่มีโครงสร้างมาจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใดๆในกระบวนการไฟฟ้าเคมี
[10].(Buchheit, Michael et al. 2002)	ทำการหาค่ามอดูลัสของยัง โดยการสร้างชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปค้อนด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยการอบเพื่อนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงดึง	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $40\text{mA}/\text{cm}^2$ ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี สำหรับการทดลองนี้โดยได้ค่ามอดูลัสของยังอยู่ที่ 160 GPa, Tensile strength อยู่ที่ 560MPa และ Yield strength อยู่ที่ 300MPa ที่อุณหภูมิการอบมากกว่า 400 องศาเซลเซียส	หาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสเกล
[11].(Fritz, Griepentrog et al. 2003)	หาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานระดับไมโครสเกล สองวิธีเปรียบเทียบกับวิธี.Laser acoustic และ Reasonance frequency	เคลือบโลหะด้วยนิกเกิล	ทั้งสองวิธีให้ผลเหมือนกัน โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $2\text{mA}/\text{cm}^2$ จะได้มอดูลัสของยังที่ 205 GPa และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $20\text{mA}/\text{cm}^2$ ค่ามอดูลัสของยังจะเหลือ 165 GPa	หาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสเกล

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[12].(Chan and Li 2003)	เป็นแอคชัวเอเตอร์เชิงความร้อนแบบเสาเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นคอมพ็อดรอฟที่ถูกระตุ้นด้วยการขยายตัวทางความร้อนเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า	- โพลีเมอร์พาราไลน์ ซี, แพลทตินัม และไทเทเนียม - ความยาวxความกว้างxความหนา คือ (2mm) x (100 μ m) x (0.6 μ m)	ที่ความต่างศักย์ 3V กระแสไฟฟ้า 33mA จะทำให้แอคชัวเอเตอร์องได้เต็มที่ 90 องศา โดยมีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส	ใช้จับเซลล์ทางชีววิทยา
[13].(Luo, Flewitt et al. 2004)	หาค่ามอดูลัสของยังที่ง่ายโดยใช้ฟิล์มนิกเกิลที่ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยใช้หลักการโก่งตัวของคาน	เคลือบโลหะด้วยนิกเกิล	ค่ามอดูลัสของยังคือ 205 GPa ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2mA/cm ² เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 30mA/cm ² ทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลงเป็น 85 GPa เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงจะทำให้ความหนาแน่นของการเกาะตัวของไอออนลดลง	หาค่ามอดูลัสของยังสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กระดับไมโครสเกล
[14].(Chronis and Lee 2005)	ไมโครแอคชัวเอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ เนื่องจากการขยายตัวความร้อนที่แตกต่างกันของโลหะกับโพลีเมอร์ SU-8 โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า	- โครงสร้างทั้งหมดเป็นโครเมียมและทอง - หุ้มโครงสร้างทั้งหมดด้วยโพลีเมอร์ SU-8 แบบบาง - ความยาว 650 μ m, ความกว้าง 100 μ m	ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2V ปลายแขนไมโครแอคชัวเอเตอร์ทั้งสองฝั่งจะถ่างออกจากกันได้ 12 μ m	ใช้จับเซลล์ทางชีววิทยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 μ m อุณหภูมิที่แขนแอคชัวเอเตอร์ไม่เกิน 32 องศาเซลเซียส
[15].(Ivanova, Ivanov et al. 2006)	เกิดการขยายตัวทางความร้อนเพื่อให้ไมโครแอคชัวเอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่มีโครงสร้างที่ขนาดแตกต่างกัน	โครงสร้างทั้งหมดเป็นซิลิคอน - ความยาวของโครงสร้างที่แตกต่างกันคือ 275 μ m - ความยาวของแขนจับคือ 20 μ m	ที่กระแสไฟฟ้า 50mA และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5V ปลายแขนไมโครแอคชัวเอเตอร์ทั้งสองฝั่งสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันได้	ใช้หยิบจับชิ้นงานขนาดเล็ก

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[16].(Solano and Wood 2007)	เกิดการขยายตัวทางความร้อนเพื่อให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นรูปตัว U	- โครงสร้างทั้งหมดเป็นทอง - ปลายแขนที่ใช้จับวัตถุหุ้มด้วยโพลีเมอร์ SU-8 - ความยาว 3.5mm, ความกว้าง 1.5mm, ความหนา 30 μ m	ที่กระแสไฟฟ้า 4mA และความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.94V ปลายแขนไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองฝั่งจะขยับเข้าหากันได้มากที่สุด 262 μ m	ใช้จับเซลล์ทางชีววิทยาที่มีความหนาเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-150 μ m อุณหภูมิที่แขนแอกซ์เวเตอร์ไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส
[17].(Todd and Xie 2008)	เป็นแอกซ์เวเตอร์ที่มีวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อนที่แตกต่างกันประกบอยู่ด้วยกันเพื่อให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในวัสดุแล้วเกิดการเคลื่อนที่โดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่แอกซ์เวเตอร์	- อะลูมิเนียมและซิลิคอน - ความยาวแอกซ์เวเตอร์คานสองชั้นคือ 170 μ m และ - ความยาวแผ่นที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนให้เลื่อนขึ้นลงคือ 1mm - ความหนาแอกซ์เวเตอร์คานสองชั้นคือ 1.75 μ m	ที่ความต่างศักย์วิกฤตเป็นจุดที่ค่าจากการสร้างแบบจำลองและค่าจากการทดลองจริงมีแนวโน้มเหมือนกันเป็นครั้งสุดท้ายก่อนที่ผลจะลู่ออก มีค่า 6.8V ซึ่งทำให้คานซึ่งเป็นแอกซ์เวเตอร์แบบสองวัสดุงอขึ้นมาได้ 5.5 μ m	ใช้วัดค่าความดันหรือแรงที่คานแบบสองวัสดุถูกกระทำ
[18].(Saitou, Oshiro et al. 2008)	ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตโดยใช้ Butler-Volmer equation	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	พิจารณาสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตที่อุณหภูมิ 293-323K ยิ่งอุณหภูมิสารละลายสูงจะทำให้อัตราการเคลือบของนิกเกิลมากขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรง	ใช้เป็นข้อมูลในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นนิกเกิลซัลฟาเมต
[19].(Duc, Lau et al. 2008)	เป็นการผสมผสานสองหลักการของแอกซ์เวเตอร์คือเกิดการขยับด้วยการขยายตัวทางความร้อนของโครงสร้างแบบแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนและถูกควบคุมแรงใน การ จับ sensing piezoresistors	- โครงสร้างเป็นซิลิคอนและโพลีเมอร์ - ความยาว,ความกว้างและความหนาของไมโครกริปเปอร์คือ 100 μ m, 28 μ m, และ 30 μ m	ที่ความต่างศักย์ 4.5V ไมโครกริปเปอร์สามารถเคลื่อนเข้ามาด้วยระยะ 32 μ m โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 176 องศาเซลเซียส ค่าแรงที่น้อยที่สุดที่สามารถจับได้อยู่ที่ 770nN ด้วย Sensing piezoresistors	ใช้จับวัตถุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 8-40 μ m

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[20].(Sawa, Yamashita et al. 2008)	ใช้หลักการ LIGA ซึ่งประกอบด้วย โฟโวลติโทกราฟีและกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยการเคลือบนิกเกิลสองชั้น	ใช้ซิลิคอนเป็นแผ่นรองรับและใช้ฟิล์มทองแดงเคลือบเป็นตัวนำจากนั้นเคลือบด้วยฟิล์มนิกเกิลอย่างหนา ก่อนทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี	ได้แม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10µm มีความลึก 30µm และมีความแข็งอยู่ที่ 580HV	สร้างแม่พิมพ์สามมิติรูปแบบต่างๆในระดับไมโครสเกลและเพิ่มความแข็งแรงให้กับแม่พิมพ์
[21].(Basroui and Robert 2000)	X-ray-Analysis วิเคราะห์ค่า intrinsic stressที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฟฟ้าเคมี	โครงสร้างที่ถูกวิเคราะห์คือ ซิลิคอน และทองแดง	<ul style="list-style-type: none"> - ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.5A.dm² จะเกิด intrinsic stress ต่ำสุด - ที่ความหนาของชั้นผิวที่มากกว่า 80µm จะได้ intrinsic stress ที่คงที่ 100MPa - สารละลายโรดในสารละลายยิ่งมากแปรผันตรงกับ intrinsic stress 	ใช้เป็นข้อมูลเพื่อพัฒนาการสร้างให้ได้ตามเป้าหมาย
[22].(Rashidi and Amadeh 2010)	ใช้ SEM ในการศึกษาขนาดเกรนที่เกิดขึ้นจากการสร้างด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีและเทคนิค XRD ศึกษาเอกลักษณ์ของโครงสร้างที่มาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี	เคลือบด้วยโลหะนิกเกิล	<ul style="list-style-type: none"> - ที่อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 mA/cm² พร้อมกับสารละลายซัลฟารินจะช่วยลดขนาดเกรนให้เล็กลง - ระบุผลึกที่ (111) และ(200) 	ใช้พัฒนาผิวให้มีการเรียงตัวที่ดีขึ้น
[23].(Kim, Park et al. 2012)	สร้างชิ้นงานด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยโลหะสร้างเป็นลวดลายบนผิว แล้วจึงนำไปทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี	- ใช้แผ่นรองรับเป็นซิลิคอนแล้วเคลือบผิวด้วยโลหะไทเทเนียม จากนั้นจึงทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยโลหะนิกเกิล	สร้างชิ้นแอคซัวเตอร์ได้ง่าย รวดเร็ว และลดต้นทุนการสร้าง	สร้างชิ้นงานแอคซัวเตอร์ในระดับไมโครสเกล

ผู้แต่ง	หลักการ	วัสดุ/ขนาด	สมรรถนะ	การนำไปใช้ประโยชน์
[24].(Zhu, Moheimani et al. 2012)	เกิดการขยายตัวทางความร้อนเพื่อให้ไมโครแอกซ์แอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่แป้นที่เชื่อมกับไมโครแอกซ์แอเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นรูปตัว Z พร้อมกับโพลิซิลิคอนที่ทำหน้าที่เก็บความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาเพื่อควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง Z ในแนวตั้ง	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างทั้งหมดเป็นนิกเกิล - ความยาวและความกว้างของโครงสร้าง Z คือ 500μm และ 8μm - ความยาวและความกว้างของโพลิซิลิคอนที่เป็นฮีตเตอร์ คือ 2mm และ 30μm 	ที่กระแสไฟฟ้า -13mA ถึง +13mA ไมโครแอกซ์แอเตอร์จะให้การเคลื่อนที่ในสองทิศทาง อยู่ในช่วง - 11.6 μ m ถึง + 12.8 μ m และมีค่า Bandwidth อยู่ที่ 49 Hz	ใช้เป็นตัวต้นแบบสำหรับการศึกษากonstruktion การเคลื่อนที่แบบสองทิศทางในอุปกรณ์หรือเครื่องจักรอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
[25].(So and Pisano 2015)	เกิดการขยายตัวทางความร้อนเพื่อให้ไมโครแอกซ์แอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ไมโครแอกซ์แอเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นรูปตัว U	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างทั้งหมดเป็นนิกเกิล - ความยาวของโครงสร้าง 50μm - ความยาวของแขนสัมผัส 22μm - ความกว้างของโครงสร้าง 2.6μm - ความหนาของโครงสร้าง 600μm 	ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 150mV ปลายแขนไมโครแอกซ์แอเตอร์จะขยับออกจากตำแหน่งเดิมได้ 1.2 μ m ต่างจากผลการสร้างแบบจำลองซึ่งมีค่า 1.31 μ m 8.4% ถ้าให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเกินกว่านี้คำตอบจะลู่ออก	ใช้ผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กหรือใช้ร่วมกับการทำงานของกลไกในระดับนาโนเมตร

2.4 สรุปการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

หลักการทำงานของกลไกแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนคือการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างแอกซ์เอเตอร์ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกแบบโครงสร้างที่เป็นที่นิยมสำหรับแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนอยู่ 3 แบบ คือ การออกแบบให้โครงสร้างมีขนาดที่แตกต่างกันในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน การนำวัสดุสองชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมาประกบกันสร้างเป็นแอกซ์เอเตอร์ และการเพิ่มความต้านทานให้กับวัสดุภายในโครงสร้างเพื่อเพิ่มการขยายตัวทางความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนที่โครงสร้างมีขนาดแตกต่างกัน โดยออกแบบให้บริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเป็นลักษณะแขนเล็กและแขนใหญ่ จากนั้นทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวิธีการสร้างแอกซ์เอเตอร์ให้สะดวก รวดเร็ว และประหยัด พบว่าเทคนิคที่เป็นที่นิยมในการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกลคือ เทคนิค LIGA เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน รวดเร็ว และประหยัด ซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างแม่พิมพ์โดยพบว่าการใช้ฟิล์มโฟโตลิโธซิสนั้นจะสะดวก ประหยัด และเมื่อฉายแสงยูวีผ่านหน้ากากลงไปบนฟิล์มโฟโตลิโธซิสจะเกิดลวดลายได้อย่างรวดเร็ว และกระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทำการเคลือบโลหะลงไปบนแม่พิมพ์ที่สร้างไว้ โดยนิยมใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าปัจจัยหลักในการยึดเกาะของโลหะจะอยู่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งไม่ควรที่จะสูงเกินไปเพราะจะทำให้ชิ้นงานมีค่าความเค้นระหว่างชิ้นงานกับผิวแผ่นรองรับที่สูงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอได้ และถ้าต่ำเกินไปก็จะทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก เพราะฉะนั้นจึงควรเลือกค่าที่ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการสร้าง และยังพบว่าการเคลือบผิวเป็นแบบสองชั้นก็จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอแต่ก็เป็นเรื่องยากในการจัดตำแหน่งการฉายแสงยูวีผ่านกากให้ลงไปบนลวดลายเดิมที่สร้างไว้โดยเฉพาะอย่างยิ่งลวดลายที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครสเกลอาจจะต้องใช้เครื่องมือในการช่วยจัดตำแหน่งการวางของหน้ากากให้ตรงกับลวดลายเดิม ในส่วนของการทดสอบสมบัติทางวัสดุและทางกลสำหรับชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้นมานั้น พบว่างานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เทคนิคหลากหลายเพื่อทดสอบสมบัติทางวัสดุของชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมนำมาทำการทดสอบชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์และสามารถนำมาปรับใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่สามแบบด้วยกัน อย่างแรกคือการวัดค่าความแข็งซึ่งจะใช้เทคนิควิกเกอร์ในการวัดเนื่องจากหัวเพชรที่ใช้กดลงไปบนผิวชิ้นงานมีขนาดที่เล็กซึ่งพอเหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครสเกล ทำให้ได้ความแม่นยำในการวัดดีกว่าเทคนิคอื่น อย่างที่สองคือ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของชิ้นงานซึ่งจะใช้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการทดสอบ โดยจะแสดงผลออกมาเป็นระนาบผลึกในรูปของดรอสซี่มิลเลอร์ที่มีการสะท้อนออกมาได้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้ทราบถึงเอกลักษณ์ของชิ้นงานที่ถูกสร้างออกมาด้วยส่วนประกอบทางเคมีและพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป และอย่างที่

สามคือการวัดมอดูลัสของยัง ด้วยวิธีการโก่งตัวของคานซึ่งทำการกระตุ้นแอกซ์เวเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีการขยับไปกระทำกับแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะยื่นออกมาเป็นคานแล้ววัดการเคลื่อนที่ของฟิล์มเพื่อนำไปคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังต่อไป หรือสามารถวัดด้วยการใส่การสั่นสะเทือนไปที่แอกซ์เวเตอร์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์แล้วจึงสามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังออกมาได้ และอีกวิธีที่นำมาทำการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังคือการสร้างชิ้นงานให้เป็นรูป dog-bone แล้วนำไปดึงด้วยเครื่อง Universal test จนขาดออกจากกัน ก็จะทำให้ได้ค่ามอดูลัสของยังออกมา เพราะฉะนั้นจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ก็พบว่าสามารถนำมาเป็นแนวคิดในการปรับใช้ให้เข้ากับงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี



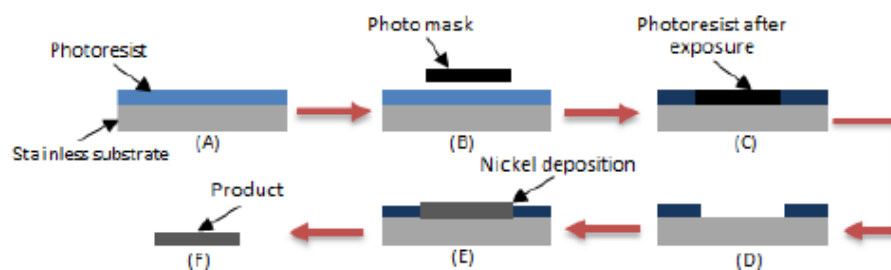
บทที่ 3

กระบวนการสร้างแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน

บทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์ในขั้นตอนต่างๆซึ่งใช้เทคนิคในการผลิตระดับไมโครสเกลโดยวัสดุที่จะนำมาใช้สร้างเป็นชิ้นงานคือ นิกเกิล เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งการสร้างที่ผ่านมามีขั้นตอนที่ซับซ้อนและต้องใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ร่วมด้วย จึงส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูงตามขึ้นไปสำหรับการผลิตชิ้นงานระดับไมโครสเกล ด้วยข้อจำกัดในส่วนนี้ทำให้ต้องมีการพัฒนาวิธีการสร้างให้สะดวกรวดเร็วและราคาไม่แพง โดยรูปแบบแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้ใช้หลักการความแตกต่างของโครงสร้างแขนเล็กและแขนใหญ่หรือ Hot-arm-Cold-arm เป็นโลหะนิกเกิล โดยเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่แอกซ์เอเตอร์จะทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างผลักดันให้แอกซ์เอเตอร์เกิดการขยับ

3.1 กระบวนการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกล

การสร้างชิ้นงานขนาดเล็กระดับไมโครสเกลในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค LIGA ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนการสร้างไม่แพง รวมทั้งนิยมนำไปใช้ในงานวิจัยและงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไมโครเซ็นเซอร์ ไอซี ไมโครแอกซ์เอเตอร์ เป็นต้น โดยเทคนิค LIGA นี้ประกอบไปด้วยสองขั้นตอนใหญ่ๆคือ วิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสง และกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งขั้นตอนในการสร้างของงานวิจัยชิ้นนี้จะเน้นไปที่ความสะดวกรวดเร็วไม่ซับซ้อนและราคาไม่แพง โดยแสดงตามลำดับขั้นตอนการสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1



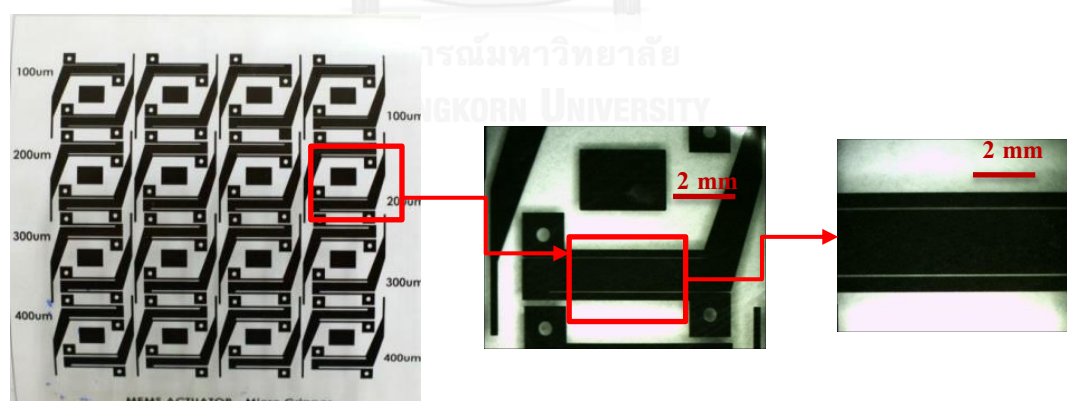
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมกระบวนการสร้างชิ้นงานทั้งหมด

3.1.1 การสร้างรูปแบบของกลไกแอคชูเอเตอร์

ส่วนสำคัญในการกำหนดรูปแบบและขนาดของกลไกแอคชูเอเตอร์ที่จะใช้สร้างซึ่งจะถูกนำไปใช้ในวิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสง จึงต้องกำหนดรูปแบบของลวดลายบนหน้ากากซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 ให้มีความแม่นยำมากที่สุดเนื่องจากสามารถส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดของชิ้นงานหลังจากทำการสร้างขึ้นมาได้ โดยหน้ากาก ที่ออกแบบมานี้ ได้ถูกส่งไปผลิตที่บริษัทที่มีเครื่องพิมพ์ที่มีความแม่นยำในการผลิตสูง เมื่อนำหน้ากากที่ได้จากการผลิตมาวัดขนาดลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยพิจารณาที่ขนาดช่องว่างระหว่างขาเล็กและขาใหญ่ และความกว้างของแขนเล็กพบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างขาเล็กและขาใหญ่มีค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ ± 10 ไมโครเมตร และที่ความกว้างของแขนเล็กมีค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ ± 10 ไมโครเมตร เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของนิกเกิล

Property	Value	Property	Value
Mass Density	8.908 g/cm ³	Specific heat	26.07 J/mol K
Young's modulus	209 GPa	Thermal conductivity	90.9 W/m K
Sher modulus	76 GPa	Thermal expansion	13.4 $\mu\text{m}/\text{m K}$
Poisson ratio	0.31	Electrical resistivity	69.3 n Ωm



รูปที่ 3.2 หน้ากากที่เป็นแบบของกลไกแอคชูเอเตอร์

3.1.2 วิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสง (Photolithography)

กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสงเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญในการสร้างรูปร่างกลไกที่มีขนาดเล็กมากสำหรับกระบวนการผลิตในระดับไมโครสเกล โดยใช้แผ่นฟิล์มที่เรียกว่าโฟโตลิซิส ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มที่เคลือบด้วยสารที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือ แหล่งกำเนิดแสงที่สว่างมาก โฟโตลิซิสแบ่งได้สองประเภทคือ ชนิดบวก(Positive) และ ชนิดลบ (Negative) ทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกันตรงที่ถ้าเป็นชนิดบวก เมื่อมีการกัดลอกโฟโตลิซิสด้วยสารละลายที่เรียกว่า Developer โฟโตลิซิสที่ได้รับแสงหลังจากทำการฉายแสง UV ผ่านหน้ากาก จะถูกล้างออก และถ้าเป็นชนิดลบบริเวณที่ไม่ได้รับแสงหรือทึบแสง (ส่วนใหญ่จะเป็นลวดลายที่ต้องการ) หลังจากทำการฉายแสงผ่านหน้ากาก แล้วบริเวณทึบแสงนั้นถูกล้างออก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เป็นชนิดลบ โดยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสงมีดังนี้

- การเตรียมผิวสำหรับสร้างชิ้นงาน

แผ่นสแตนเลสถูกเลือกมาใช้เป็นผิวในการสร้างแบบเพื่อเตรียมที่จะเคลือบด้วยแผ่นโฟโตลิซิสชนิดลบ โดยก่อนที่จะนำมาใช้งานต้องขัดผิวสแตนเลสให้สะอาดมันวาวเพื่อลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลที่เคลือบกับผิวสแตนเลส ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระดาษทรายน้ำ เบอร์ 320, 800, 1200 ตามลำดับ ขัดผิวไปในทางเดียวกันจนผิวสแตนเลสมันวาวซึ่งค่าความหยาบของผิว (Ra) ที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.5 ไมโครเมตร หลังจากขัดเรียบร้อยแล้วจึงนำไปล้างด้วยอะซิโตนและน้ำสะอาด

- การเคลือบฟิล์มโฟโตลิซิสบนแผ่นสแตนเลส

เนื่องจากฟิล์มโฟโตลิซิสเป็นโพลิเมอร์ที่ไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตเมื่อถูกแสงที่มีความเข้มมากพอที่จะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของโพลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปและสามารถทำละลายได้โดยง่าย ซึ่งในงานวิจัยใช้เป็น โฟโตลิซิสชนิดลบ โดยต้องติดฟิล์มไม่ให้มีฟองอากาศ จากนั้นนำไปเข้าเครื่องรีดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส **ดังแสดงในรูปที่ 3.3ก** เป็นจำนวน 4 รอบ เพื่อให้ฟิล์มโฟโตลิซิสเคลือบติดแน่นสนิทกับแผ่นสแตนเลสที่ขัดผิวเรียบ หลังจากรีดเสร็จแต่ละรอบควรพักไว้ 1 นาที เนื่องจากความร้อนจากการรีดยังคงสะสมอยู่มากซึ่งจะส่งผลทำให้ฟิล์มโฟโตลิซิสละลายได้รวมถึงจำนวนรอบด้วยที่ไม่ควรจะมีเกิน 4 รอบ สิ่งที่ต้องพึงระวังคือโฟโตลิซิสเป็นโพลิเมอร์ที่ไวต่อแสงมาก เพราะฉะนั้นควรดำเนินการสร้างในห้องที่มืด

- การพิมพ์ลายจากหน้ากากกันแสง

หน้ากากกันแสงคือ แบบของกลไกแอคชัวเอเตอร์บนแผ่นใสบาง โดยส่วนที่เป็นลักษณะทึบคือ ลายของชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์ ดังนั้นเมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ลงบนโฟโตลิซิสชนิดลบแล้ว นำไปจุ่มสารละลาย developer ส่วนที่ไม่โดนแสงจะหลุดออกไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทาง คุณสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ โดยนำหน้ากากมาประกบบนโฟโตลิซิสแล้ววางคว่ำหน้าเพื่อรับ แสงยูวี ในการศึกษานี้ได้ทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องฉายแสงดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งมี หลอดยูวีขนาด 10 วัตต์ จำนวน 4 หลอด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการฉายแสงพบว่า เวลา 25 วินาที จะได้ลวดลายของชิ้นงานบนแผ่นโฟโตลิซิสที่เคลือบแผ่นสแตนเลสได้อย่างชัดเจนที่สุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในกระบวนการลิโทกราฟีแบบฉายแสงยูวี (ก) เครื่องรีดแผ่น, (ข) เครื่องฉายแสงยูวี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

- การทำละลายฟิล์มโฟโตลิซิสหลังจากทำการฉายแสง

สารละลาย Developer ที่ใช้ทำละลายฟิล์มโฟโตลิซิสหลังจากทำการฉายแสงยูวีคือ สารละลาย โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เมื่อนำแผ่นสแตนเลสที่เคลือบโฟโตลิซิสมาจุ่มในสารละลาย 20 นาที หลังจากนั้นนำแผ่นสแตนเลสขึ้นมาควรทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดบนผิวแบบที่โฟโตลิซิสที่หลุดออกไป อีกครั้ง ก่อนนำไปให้ความร้อนเนื่องจากอาจจะยังมีเศษของโฟโตลิซิสเหลืออยู่ซึ่งเมื่อให้ความร้อนไป ชิ้นส่วนนั้นจะจับตัวเป็นก้อนไปขวางทางบนแบบแอคชัวเอเตอร์ส่งผลให้การสร้างชิ้นงานเกิดความ ล้มเหลวในขั้นตอนการทำการเคลือบนิกเกิลด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี จากนั้นนำไปให้ความร้อนบน เตาให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อไล่ความชื้นภายใน แผ่นสแตนเลสออกให้หมด ในระหว่างการให้ความร้อนควรห่ออะลูมิเนียมฟอยด์หุ้มไว้หนึ่งชั้นเพื่อกัน ความร้อนที่ผ่านมาที่แผ่นชิ้นงานไม่ให้สูง



รูปที่ 3.4 เตาให้ความร้อน

3.1.3 กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electroplating)

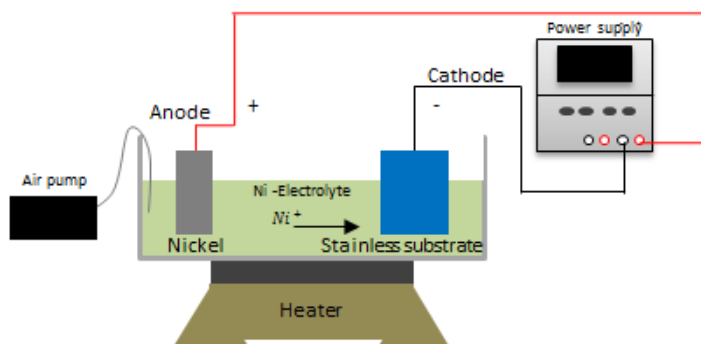
ขั้นตอนการเคลือบโลหะให้ได้ตามขนาดที่ต้องการเนื่องจากการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ นั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผล เช่น ความสมบูรณ์ของชิ้นงาน ความกว้างของแขนเล็ก ระยะห่างระหว่าง แขนใหญ่และแขนเล็ก และความหนาของกลไก

หลังจากทำละลายโพโตลิซิสเรียบร้อยแล้ว จะนำแผ่นสแตนเลสที่เป็นลวดลายของชิ้นงานมาเคลือบ ด้วยไอออนนิกเกิลลงระหว่างช่องว่างของแบบหล่อโพโตลิซิสตามลวดลายของหน้ากาก จากนั้นจะ นำไปทำการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น ตัวกลางเพื่อให้เกิดการออกซิเดชันและรีดักชันของสองขั้วไฟฟ้า โดยฝั่งแอโนด คือ แท่งนิกเกิล และขั้ว แคโทดคือ แผ่นสแตนเลสที่มีลวดลายของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลอง เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการสร้างชิ้นงานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สองตัว คือ สารละลายนิกเกิล ซัลฟาเมต และสารละลายนิกเกิลซัลเฟต โดยส่วนผสมของสารละลายนิกเกิลซัลเฟตนั้นเป็นส่วนผสมที่ พร้อมใช้ในการชุบโลหะทั่วไป และส่วนผสมของสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตเป็นส่วนผสมที่ใช้ในงาน อุตสาหกรรม

การกำหนดขนาดกระแสไฟฟ้า ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า อัตราการเคลือบของนิกเกิล ($\mu\text{m/hr}$) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (mA/cm^2) ซึ่งจากการ ทดลองพบว่าค่าอัตราการเคลือบนิกเกิลของสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและสารละลายนิกเกิลซัลเฟ ตคือ $0.6 (\mu\text{m/hr})/(\text{mA/cm}^2)$ และ $0.48 (\mu\text{m/hr})/(\text{mA/cm}^2)$ ตามลำดับ เพราะฉะนั้นอัตราการ เคลือบนิกเกิลของสารละลายทั้งสองจึงไม่เท่ากัน สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้ความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้าที่ 6.88 mA/cm^2 ในส่วนของเครื่องสูบอากาศนั้นใช้ในการกวนสารละลาย รวมทั้ง อุณหภูมิของเตาความร้อนควรตั้งที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอออนของนิกเกิลวิ่งมาเกาะตัวที่ แผ่นสแตนเลสได้ดีขึ้นและเป็นระเบียบ แต่ไม่ควรให้เกิน 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้ชิ้นงาน

เกิดการสะสมความร้อนไว้โดยระบายออกไปไม่ทัน ทำให้เมื่อถึงขั้นตอนในการกัดโพตัสซั่มครั้งสุดท้าย ชิ้นงานที่ถูกเคลือบไม่สามารถหลุดออกมาได้ จึงเกิดการเคลือบติดกับผิวสแตนเลสจนไม่หลุดออกจากผิวสแตนเลส

ขั้นตอนสุดท้ายคือการทำละลายแบบหล่อโพตัสซั่ม หลังจากได้ชิ้นงานจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี จะนำไปทำการล้างโพตัสซั่มที่เหลือออกโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทิ้งไว้ 10 นาที ชิ้นงานนิกเกิลก็จะหลุดออกมาพร้อมกับแบบหล่อโพตัสซั่ม จึงได้ทำการสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สำหรับตัวอย่างชิ้นงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ 3.2 สรุปพารามิเตอร์ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี

พารามิเตอร์	การปรับค่า	จุดประสงค์
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	6.88 mA/cm ²	เพื่อให้ได้นิกเกิลเกาะตัวอย่างช้าๆ เพื่อความสมบูรณ์ของชิ้นงาน [21]
อุณหภูมิสารละลาย	30 C ^o	ช่วยลดขนาดเกรนของผิวสแตนเลสที่เกิดขึ้น เพื่อให้ผิวมีความละเอียด [22]
เวลาในการทดลอง	24 h	เพื่อให้ได้ความหนา 100 μm



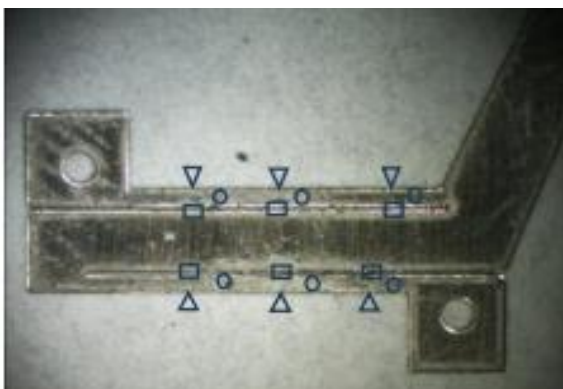
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานหลังจากทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี

3.2 การตรวจสอบขนาดของกลไก

การตรวจสอบขนาดกลไกตามแบบบนหน้ากากกันแสงทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นเป้าหมายที่ต้องการคือ ขนาดช่องว่างระหว่างโครงสร้างเล็กและโครงสร้างใหญ่ ซึ่งมีขนาดที่ออกแบบไว้คือ 100, 200, 300, 400 ไมโครเมตร ความกว้างของโครงสร้างขนาดเล็กสองด้านที่มีขนาด 500 ไมโครเมตร และขนาดความหนาอยู่ที่ประมาณ 80-120 ไมโครเมตร แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.7 โดยกำหนดเป็นค่ากลางคือ 100 ไมโครเมตร สิ่งที่วัดทั้งหมดนี้มีความสำคัญเนื่องจากมีผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแอคซิวเอเตอร์ ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดแสดงดังในรูปที่ 3.8 โดยผลการวัดขนาดของชิ้นงานจากการสร้างที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 3.3 ก-ข โดยทำการวัดขนาดทุกชิ้นงานที่สร้างขึ้นมานำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละแบบ และค่าการกระจายตัวของข้อมูล



รูปที่ 3.7 รายละเอียดของขนาดที่ต้องทำการวัด



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งที่ใช้วัดเพื่อหาค่าเฉลี่ย สีเหลี่ยมคือช่องว่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ สามเหลี่ยมคือความหนา และวงกลมคือความกว้างของแกน

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดค่าเฉลี่ยของขนาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟต

Designed gap (μm)	Averaged Actual gap (μm)	Standard deviation of gap (μm)	Designed width (μm)	Averaged Actual width (μm)	Standard deviation of width (μm)	Designed Thickness (μm)	Averaged Actual thickness (μm)	Standard deviation of thickness (μm)
100	83	10	500	543	10	100	98	7
200	164	16		551	8		99	4
300	260	17		561	12		98	4
400	359	14		574	23		103	4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดค่าเฉลี่ยของขนาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟต

Designed gap (μm)	Averaged Actual gap (μm)	Standard deviation of gap (μm)	Designed width (μm)	Averaged Actual width (μm)	Standard deviation of width (μm)	Designed Thickness (μm)	Averaged Actual thickness (μm)	Standard deviation of thickness (μm)
100	152	9	500	427	12	100	81	5
200	240	9		436	11		79	4
300	352	6		447	7		80	5
400	471	16		431	15		77	4

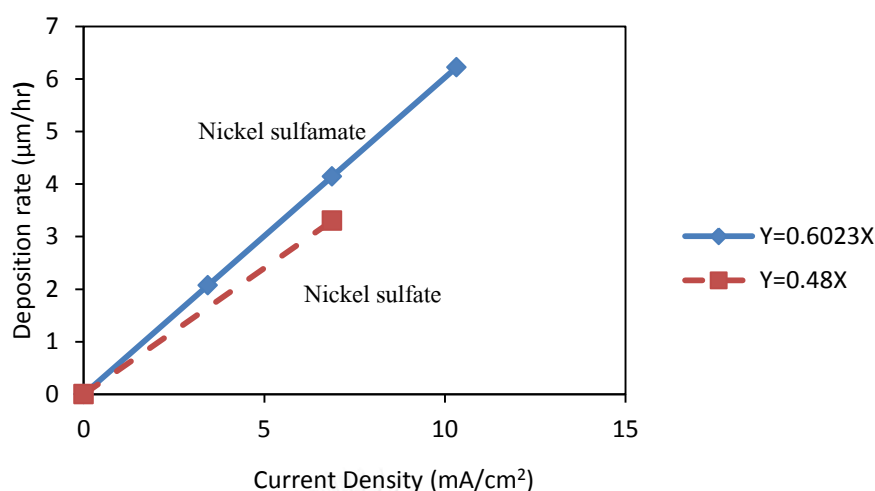
จากการตรวจสอบขนาดกลไกพบว่าการใช้สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะให้ความสม่ำเสมอของช่องว่างระหว่างโครงสร้างอยู่ในช่วง ± 17 ไมโครเมตร ความกว้างของกลไกมีค่า ± 23 ไมโครเมตร ความหนาของกลไกมีค่า ± 7 ไมโครเมตร ในขณะที่การใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะให้ความสม่ำเสมอของช่องว่างระหว่างโครงสร้างอยู่ในช่วง ± 16 ไมโครเมตร ความกว้างของกลไกมีค่า ± 12 ไมโครเมตร ความหนาของกลไกมีค่า ± 5 ไมโครเมตร ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสองส่วนแสดงให้เห็นได้ชัดว่าการใช้สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและซัลเฟตในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะให้ผลความแม่นยำที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากแม่พิมพ์ที่สร้างด้วยวิธีลิโทกราฟีนั้นไม่สามารถควบคุมขนาดได้ โดยมีความไม่สม่ำเสมอของหน้ากัก ± 10 ไมโครเมตร และความไม่สม่ำเสมอของแบบหล่อโฟโตลิธิส ± 20 ไมโครเมตร ให้ความแม่นยำมีโอกาสแตกต่างจากแบบได้อ่างน้อย ± 30 ไมโครเมตร และมีความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมาก เมื่อมองภาพรวมของผลการสร้างทั้งหมดโดยความแม่นยำนิยามเป็นความแตกต่างระหว่างขนาดเฉลี่ยของโครงสร้างจริงกับแบบตั้งนั้นเมื่อมีความแตกต่างน้อยกว่าจะหมายถึงมีความแม่นยำมากกว่า สำหรับความสม่ำเสมอนิยามว่าเป็นความผันแปรมาตรฐานของค่าที่วัดได้ ดังนั้นหากมีความผันแปรมาตรฐานที่ต่ำกว่าจะหมายถึงมีความสม่ำเสมอที่ดี

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนนี้อาจจะเกิดจากการกระจายตัวของกระแสไอออนนิกเกิลจากขั้วแอโนดที่ส่งไปยังขั้วแคโทดไม่สม่ำเสมอ อุณหภูมิของสารละลายไม่สม่ำเสมอ โครงสร้างของแบบหล่อโฟโตลิธิสไม่แม่นยำ และการลอกกลายจากหน้ากักไปบนโฟโตลิธิสที่เคลือบบนแผ่นสแตนเลส เป็นต้น ดังนั้นจึงสรุปได้เพียงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนสำหรับการใช้สารละลายทั้งสองชนิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเคลือบผิว

ในการทดลองด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีของนิกเกิลได้ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยจ่ายไปตรงพื้นที่ที่เป็นเป้าหมายที่ถูกเคลือบเท่ากับ 29.06 ตารางเซนติเมตร ซึ่งนิยามว่าเป็น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ อัตราการเคลือบของโลหะนิกเกิลที่พื้นที่เป้าหมายต่อเวลาที่ใช้ในการจ่ายกระแส โดยจะทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่ถูกเคลือบซึ่งก็คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ทั้งหมด 3 ค่า คือ 3.44, 6.88 และ 10.32 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วจึงนำกลไกที่ได้มาวัดหาค่าความเฉลี่ยความหนาที่เกิดขึ้นจากการเคลือบของนิกเกิล ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และอัตราการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นอัตราการเคลือบผิวก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ในการทดลองนี้ยังพบว่าเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเกินกว่า 10.32 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (จ่ายกระแสเกินกว่า 300 มิลลิแอมแปร์ ใน 24 hour) ลักษณะของกลไกที่ออกมาจะไม่สมบูรณ์ คือ รูปร่างโค้งงอและหักเสียหาย



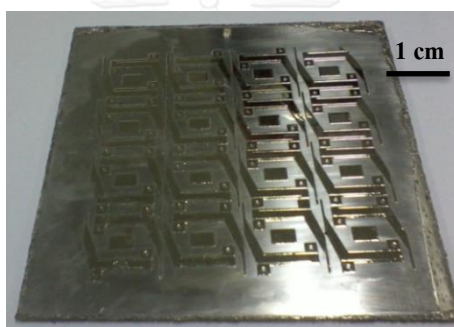
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กับ อัตราการเคลือบผิวของนิกเกิลในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต

3.4. ผลของความหยาบของสแตนเลสต่อการหลุดออกของนิกเกิล

หลังจากการทำกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์ยังคงติดอยู่บนผิวสแตนเลสที่เป็นตัวที่ถูกเคลือบ ซึ่งวิธีที่จะนำชิ้นงานออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้โดยที่ยังคงรูปร่างที่สมบูรณ์ไว้คือนำแผ่นสแตนเลสที่ผ่านการทำการกระบวนการไฟฟ้าเคมี แล้วมาจุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อกัดโพโตลิซิสที่เหลืที่ยังรังบางส่วนของชิ้นงานออกให้หมดทำให้ชิ้นงานสามารถหลุดออกมาได้ แต่ในบางครั้งก็เกิดปัญหาที่ว่าหลังจากกัดโพโตลิซิสขั้นตอนสุดท้ายออกหมดแล้ว แต่ชิ้นงานยังไม่หลุดตามออกมาแสดงดังรูปที่ 3.10ก ซึ่งเมื่อเกิดปัญหานี้้อาจจะต้องอุปกรณ์อย่างเช่น ไซควงปากแบน งัดชิ้นงานออกมาส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายขึ้น เพราะฉะนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากอีกอย่างที่จะต้องหาวิธีในการนำชิ้นงานออกมาให้ได้สมบูรณ์ที่สุดหลังจากการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี สาเหตุนี้เกิดมาจากการยึดติดของโลหะสองชนิด โดยการยึดติดกันระหว่างชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์ที่ถูกเคลือบด้วยนิกเกิลกับแผ่นสแตนเลสเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของพื้นผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง ซึ่งถ้าสามารถลดแรงนี้ลงได้จนถึงจุดหนึ่งจะสามารถหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสได้โดยง่าย

แนวคิดหนึ่งที่สามารถช่วยในการลดแรงยึดเหนี่ยวนี้คือ การปรับความหยาบของผิวสแตนเลสในช่วงก่อนเริ่มทำวิธีลิโทกราฟี โดยการใช้กระดาษทรายน้ำขัดผิวสแตนเลสให้เรียบจนเป็นเงา เพื่อเป็นการลดพื้นที่ที่เป็นหลุมและบ่อทำให้ความขรุขระลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลสลดลงเพราะฉะนั้นแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุทั้งสองก็ควรที่จะลดลงตามลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าเมื่อทำการขัดผิวด้วยกระดาษทรายน้ำแล้วนำไปวัดค่าความขรุขระของผิว

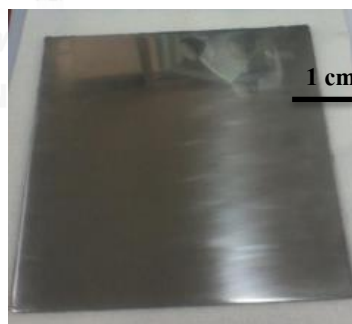
(Roughness, Ra) ของผิวพบว่าที่ความหยาบที่ $Ra > 0.5 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสที่ถูกเคลือบไว้ได้หรือถ้าหลุดออกมาก็หักงอไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อขัดผิวจนได้ความหยาบที่ $Ra < 0.5 \mu\text{m}$ ส่งผลให้ชิ้นงานหลุดออกมาได้โดยง่ายและสมบูรณ์แบบ และอีกปัจจัยที่สำคัญจะส่งผลต่อการหลุดออกของนิกเกิลคือค่า Intrinsic stress ซึ่งเปรียบเสมือนแรงยึดเหนี่ยวของผิวนิกเกิลกับแผ่นรองรับซึ่งถ้าค่านี้มีมากจะทำให้นิกเกิลหลุดออกมาได้ง่ายแต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดโค้งงอขึ้นจากชิ้นงานหลุดออกเนื่องจาก Intrinsic stress ผลักดันออกมาเกินไป แต่ถ้าน้อยเกินไปชิ้นงานก็จะไม่หลุดออกดังแสดงในรูปที่ 3.10ค เช่นเดียวกันกับความหยาบของผิวสแตนเลสที่ส่งผลต่อการหลุดออกของนิกเกิล ซึ่งค่า Intrinsic stress จะเกิดขึ้นในช่วงของการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกพารามิเตอร์ในขั้นตอนของกระบวนการไฟฟ้าเคมีให้เหมาะสมกับงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งแสดงไว้แล้วในตารางที่ 3.3 ที่ผ่านมา



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.10 (ก) ชิ้นงานไม่สามารถหลุดออกมาได้หลังจากทำการแช่ NaOH, (ข) การวัดค่า Roughness (Ra), (ค) ลักษณะแผ่นสแตนเลสที่มี $Ra < 0.5 \mu\text{m}$

จากการทดลองแนวคิดนี้สรุปได้ว่าความเรียบของพื้นผิวสแตนเลสทำให้ความขรุขระของผิวสแตนเลสลดลง ส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลสลดน้อยลงดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจึงลดลงตามไปด้วยทำให้ชิ้นงานหลังจากนำไปจุ่มลงในสารละลายไฮดรอกไซด์ หลุดออกมาได้อย่าง

สมบูรณ์ โดยทางผู้วิจัยได้ใช้กระดาษทรายน้ำเบอร์ 320, 800 และ 1200 ตามลำดับ ขัดผิวสแตนเลสไปในแนวเดียวกัน สามารถสรุปกระบวนการสร้างทั้งหมดได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สรุปขั้นตอนในกระบวนการสร้าง

ขั้นตอน	ค่าพารามิเตอร์	จุดประสงค์
1.ขัด ผิว สแตนเลส ที่เป็น Substrate ด้วยกระดาษทรายน้ำ 320, 800 และ 1200	$Ra \leq 0.5 \mu m$	เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลส
2.ล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายอะซิโตนและน้ำสะอาด	-	เพื่อเตรียมสำหรับเคลือบแผ่นโฟโวลติซิสไม่ให้มีเศษสิ่งสกปรก
3.เคลือบแผ่นโฟโวลติซิสชนิดลบด้วยเครื่องรีดความร้อน	ตั้งอุณหภูมิ $90^{\circ}C$ รีดจำนวน 4 รอบ พักรอบละ 1 นาที	เพื่อให้โฟโวลติซิสติดกับแผ่นสแตนเลสได้แน่นขึ้น
4.ติด mask บนแผ่น photoresist	-	เพื่อเตรียมพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นโฟโวลติซิสที่เคลือบสแตนเลส
5.UV Exposure	25 วินาที	เพื่อพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นโฟโวลติซิสที่เคลือบสแตนเลส
6.กัดแผ่นโฟโวลติซิสส่วนที่ไม่โดนแสงออกด้วยสารละลาย Na_2CO_3	10 นาที	เพื่อกัดโฟโวลติซิสที่ไม่โดนแสงออก
7.ไล่ความชื้นด้วยการใช้เตาอบให้ ความร้อน	ตั้งอุณหภูมิ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 5 นาที	เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ภายในออก
8.กระบวนการไฟฟ้าเคมี	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิสารละลาย เวลาที่ใช้	เพื่อเคลือบนิกเกิลให้ได้ความหนาที่ ต้องการบนแบบโฟโวลติซิส
9.กัดโฟโวลติซิสที่เหลือออกด้วย NaOH	จนกระทั่งชิ้นงานหลุดออกหมด	เพื่อนำชิ้นงานที่สร้างออกมา

3.5 สรุปผล

วิธีการสร้างชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์นั้นมีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของแอกซ์เอเตอร์และรูปแบบโครงสร้างของแอกซ์เอเตอร์ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการสร้างแอกซ์เอเตอร์นั้นจะมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน รวมถึงต้นทุนของอุปกรณ์ที่ใช้ในสร้างก็มีราคาที่สูง ทางผู้วิจัยจึงได้สังเกตเห็นปัญหาถึงความยากในส่วนนี้จึงได้พยายามศึกษาหาวิธีที่จะทำให้การสร้างนิกเกิลแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นเรื่องง่าย ต้นทุนไม่แพง และรวดเร็ว จากงานวิจัย H.Lorenze et al.(1996) พบว่าได้ตอบโจทย์ความต้องการในการสร้างที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยเป็นการสร้างด้วยวิธี LIGA แบบง่าย และวิธีการสร้างก็ไม่ซับซ้อนโดยสามารถนำไปใช้สร้างได้กับชิ้นงานขนาดเล็กและแอกซ์เอเตอร์ทุกรูปแบบ

การสร้างนิกเกิลแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี LIGA โดยเริ่มด้วยกระบวนการลิโทกราฟีแบบฉายแสง ที่มีแผ่นโฟโตลิซิสชนิดลบ เป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการนี้คือ ในระหว่างการทดลองต้องทำในห้องที่ไม่มีแสงเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางโพลีเมอร์ภายในแผ่นซึ่งมีความไวต่อแสง ต้องติดแผ่นโฟโตลิซิสโดยใช้เครื่องรีดด้วยความร้อนทุกครั้งเพื่อให้แผ่นติดแน่นกับแผ่นสแตนเลสที่เป็นจำนวน 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการลอกของแผ่นโฟโตลิซิสเมื่อถูกกัดด้วยสารละลาย เมื่อฉายแสง ยูวีต้องฉายเป็นเวลาทั้งหมด 25 วินาที จะให้แบบของแอกซ์เอเตอร์จากหน้ากากขึ้นลวดลายชัดที่สุดถ้าเกินกว่านี้จะส่งผลให้เวลานำไปกัดกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเพื่อลอกส่วนที่ไม่โดนแสงออกถ้าฉายแสงยูวีเกินกว่า 30 วินาที ขึ้นไป จะทำให้เกิดการหลุดร่อนทั้งชุดที่โดนแสงและไม่โดนแสงเนื่องจากความเสื่อมสภาพของโฟโตลิซิสจากการรับแสงยูวีที่มากเกินไป ในขณะที่เดียวกันถ้าได้รับแสงน้อยกว่านี้จะส่งผลให้ไม่เกิดลวดลายของแอกซ์เอเตอร์บนโฟโตลิซิสทำให้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตไม่สามารถกำจัดโฟโตลิซิสที่ไม่โดนแสงได้ และการกำจัดโฟโตลิซิสที่ไม่โดนแสงด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตนั้นจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที

กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นได้ทำการทดลองใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์สองชนิดเปรียบเทียบกันคือสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตจากการทดลองพบว่าทั้งสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตให้ผลการสร้างที่ไม่แตกต่างกันในเชิงความแม่นยำสำหรับการสร้างเนื่องความคลาดเคลื่อนของการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวิธีลิโทกราฟีแบบฉายแสง โดยนิกเกิลแอกซ์เอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนนี้ที่สร้างนี้มีทั้งหมด 4 แบบ แตกต่างกันคือมีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่อยู่ที่ 100, 200, 300 และ 400 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อมาพิจารณาผลการวัดระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ ความกว้างของแกนเล็ก และความหนาทั้ง 4 แบบ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ $6.88 - 8.6 \text{ mA/cm}^2$ อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 30-35 องศา

เซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบนิเกิล 24 ชั่วโมง เนื่องจากโครงสร้างมีขนาดเล็กใหญ่สลับกันไป และระยะห่างระหว่างแกนเล็กกับแกนใหญ่ จึงต้องใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำและเพื่อให้ไอออนนิเกิลค่อยๆไปเกาะรวมถึงทำให้ intrinsic stress มีค่ามากเพื่อช่วยให้ชิ้นงานนิเกิลหลุดออกมาได้ง่าย

ผลการสร้างจะพบว่าค่าเฉลี่ยของขนาดที่ทำการวัดทั้งสามตำแหน่งของชิ้นงานนิเกิลแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายมากกว่าสารละลายนิเกิลซัลเฟต แต่เนื่องจากแบบที่ถูกลอกออกจากหน้ากากลงบนแผ่นสแตนเลสที่เป็นแผ่นรองรับ (Substrate) ด้วยวิธีลิโทกราฟีก่อนที่นำไปทำการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีนั้น มีความคลาดเคลื่อนของขนาดที่จากแบบจริงทุกโดยมีความไม่สม่ำเสมอในการสร้างอยู่ที่ ± 20 ไมโครเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของทั้งสองสารละลายได้ ทางผู้วิจัยจึงพิจารณาที่ความสม่ำเสมอในการสร้างแทน ซึ่งพบว่าทั้งสองสารละลายไม่มีความสม่ำเสมอในการสร้าง โดยสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะให้ค่าความไม่สม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ อยู่ในช่วง ± 17 ไมโครเมตร ความกว้างของแกนเล็กอยู่ในช่วง ± 23 ไมโครเมตร และความหนาอยู่ในช่วง ± 7 ไมโครเมตร ในขณะที่สารละลายนิเกิลซัลเฟตจะให้ค่าความไม่สม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่อยู่ในช่วง ± 16 ไมโครเมตร ความกว้างของแกนเล็กอยู่ในช่วง ± 15 ไมโครเมตร และความหนาอยู่ในช่วง ± 5 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาดำเนินการที่ทำการวัดจะพบว่าความแตกต่างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการสร้างนิเกิลแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนด้วยสารละลายทั้งสองชนิดนั้นมีค่าน้อย หรือในสารละลายทั้งสองตัวมีความแปรปรวนของขนาดอยู่มากพอ

เมื่อพิจารณาไปที่แม่พิมพ์ของแอกซ์เวเตอร์ที่ถูกลอกออกจากหน้ากากไปบนแผ่นสแตนเลสที่เป็นแผ่นรองรับพบว่ามีความคลาดเคลื่อนหรือค่าความไม่สม่ำเสมอของขนาดแม่พิมพ์ก่อนที่จะนำไปทำการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของลวดลายบนแม่พิมพ์อยู่ในช่วง ± 10 ไมโครเมตรซึ่งใกล้เคียงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดนิเกิลแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน แสดงให้เห็นว่าค่าความไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ ดังนั้นค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของทั้งสองสารละลายได้ ยกเว้นความหนาที่ไม่ขึ้นกับการสร้างแม่พิมพ์เนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเคลือบของนิเกิลในการขั้นตอนการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งขึ้นกับสารละลายที่เป็นตัวพาไอออนให้ไปเกาะบนแม่พิมพ์ แต่ข้อแตกต่างที่สามารถบอกได้สำหรับทั้งสองสารละลายคือ สารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะให้อัตราเร็วในการเคลือบนิเกิลที่มากกว่าสารละลายนิเกิลซัลเฟตที่เวลาเท่ากัน ซึ่งเป็นข้อดีที่เห็นได้ชัดสำหรับการใช้สารละลายนิเกิลซัลฟาเมตในการสร้าง

บทที่ 4

สมบัติทางวัสดุของนิกเกิล

เมื่อทำการสร้างแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนด้วยเทคนิค LIGA แล้ว ทางผู้วิจัยมีความต้องการที่จะศึกษาคุณลักษณะทางวัสดุเพิ่มเติมของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีข้างต้น เนื่องจากการสร้างแอคชัวเอเตอร์ขึ้นมานั้นวัสดุโครงสร้างหลักของแอคชัวเอเตอร์ในงานวิจัยนี้คือโลหะนิกเกิลเพียงอย่างเดียวซึ่งสร้างมาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีหรือการชุบโลหะซึ่งเป็นที่รู้จักกันทั่วไปตามท้องตลาด เพราะฉะนั้นโลหะนิกเกิลที่ถูกเคลือบจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทดลองนี้จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางวัสดุและทิศทางการนำไปใช้งานของแอคชัวเอเตอร์ในรูปแบบนี้ ซึ่งการศึกษาสมบัติทางวัสดุของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนนั้นมีประโยชน์ตรงที่สามารถช่วยในการพิจารณาการนำแอคชัวเอเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติทางวัสดุของนิกเกิลที่เคลือบอยู่บนตัวแอคชัวเอเตอร์ โดยผลที่ได้จากการเลือกงานที่เหมาะสม ช่วยป้องกันการไหม้ของแอคชัวเอเตอร์ลามไปทำงานเป้าหมาย การจับยึดวัสดุที่มีน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนดหลายครั้งทำให้แกนที่จับวัสดุเกิดการล้าขึ้นทำให้แกนที่จับเสียรูปส่งผลให้ชิ้นงานหล่นเสียหายได้ หรือการนำไปใช้งานกับของเหลวในห้องแล็บซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างของเหลวกับแกนที่จับวัสดุได้

การศึกษาคูณสมบัติทางวัสดุของนิกเกิลแอคชัวเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนนั้นจะใช้เครื่องมือการทดสอบทางวัสดุที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนตัวอย่างที่จะนำไปทำการทดสอบทางวัสดุคือชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์ที่มาจากการทำงานกระบวนการไฟฟ้าเคมีหรือรูปแบบอื่นๆ ที่สอดคล้องกับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบซึ่งจากบทที่แล้วทางผู้วิจัยได้ทดลองสร้างแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน 2 แบบ คือ ใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟต และสารละลายนิกเกิลซัลเฟต ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งในการศึกษาคูณสมบัติทางวัสดุนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของนิกเกิลที่มาจากสารละลายทั้ง 2 ชนิด เพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานอื่นๆ ได้หลากหลายมากขึ้น

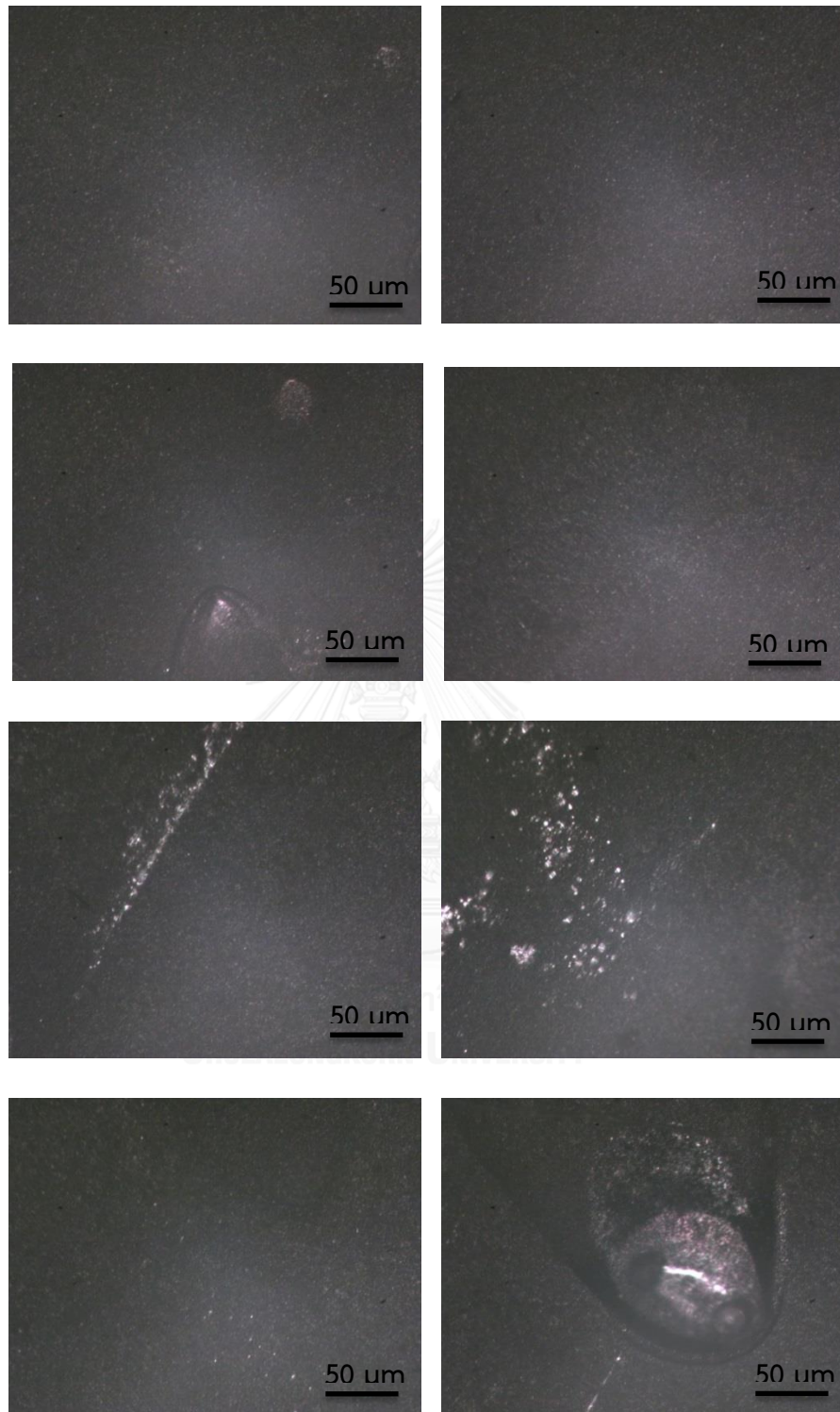
หัวข้อในการทดสอบหาสมบัติทางวัสดุในงานวิจัยนี้จะมีอยู่ 4 แบบ คือ การวัดความหยาบของผิว (Roughness) การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในแอคชัวเอเตอร์ด้วยเครื่องยิงรังสีเอ็กซ์เรย์ (XRD) การทดสอบความแข็งด้วยวิธีวิกเกอร์ (Vicker hardness) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer)

4.1 การวัดความหยาบของผิว

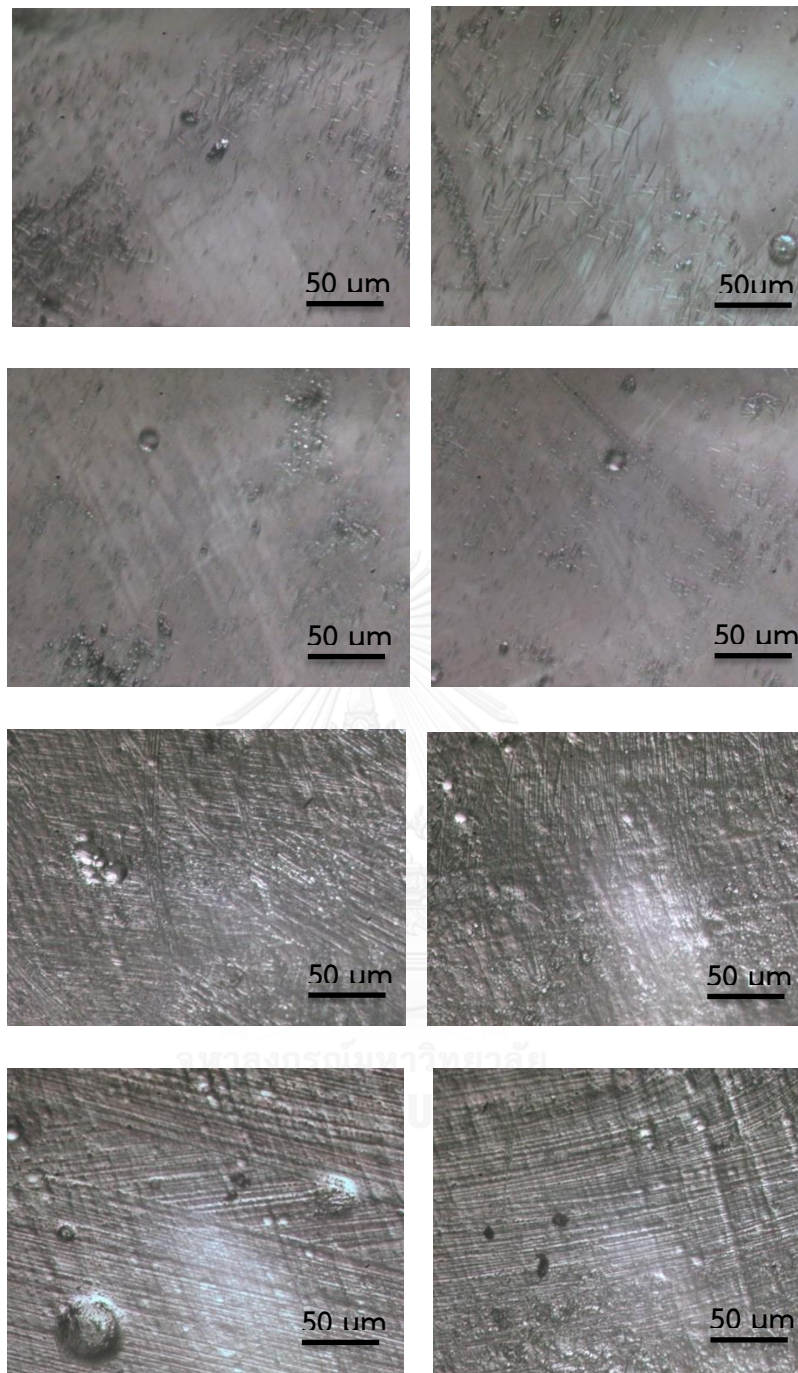
การสร้างแอกซ์ไอเตอร์นิกเกิลที่มาจากทั้ง 2 สารละลายนั้น คือสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต ด้วยสารส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันก็ย่อมส่งผลให้ลักษณะผิวของนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์ต่างกันด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานหรือไม่นั้น อยู่ที่ว่าแอกซ์ไอเตอร์นิกเกิลที่สร้างมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างย่อมส่งผลต่อการยับและการเคลื่อนที่ของแอกซ์ไอเตอร์ โดยการตรวจสอบลักษณะผิวของนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวมาทำการวัดที่ผิวนิกเกิลตัวอย่างที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและซัลเฟตอย่างละสามตัว ซึ่งพบว่าที่ผิวของนิกเกิลที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีความหยาบหรือค่า Ra มากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่านิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีค่า Ra = 6.21 ไมโครเมตร มากกว่านิกเกิลที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตซึ่งมีค่าอยู่ที่ Ra = 1.28 ไมโครเมตร

หลังจากนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10X ส่องขยายไปที่ผิวของนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์เพื่อดูลักษณะผิวที่นิกเกิลที่มาจากทั้งสองสารละลาย ซึ่งทำให้สามารถเห็นเกรนบนผิวนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์อย่างชัดเจนและบอกได้ถึงความแตกต่างของลักษณะผิวของนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์ที่สร้างมาจากสองสารละลายดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.2 โดยจะทำการถ่ายภาพหลายๆจุดบนผิวนิกเกิลแอกซ์ไอเตอร์ทั้งสองสารละลายที่ตำแหน่งใกล้ๆกันรวมถึงตำแหน่งที่เป็นตำหนิที่เกิดขึ้นบ่อยๆ และสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเพื่อเก็บเป็นข้อมูลไว้พัฒนาวิธีการสร้างให้ดีขึ้นไม่ให้เกิดตำหนิแบบนี้ขึ้นอีกในงานอื่นๆในอนาคต

การวัดความหยาบของผิวนิกเกิลยังมีความสำคัญในเรื่องผิวสัมผัสของปลายแขนแอกซ์ไอเตอร์ที่จะไปจับวัตถุเป้าหมายเนื่องจากถ้าผิววัตถุเป้าหมายมีความสำคัญที่สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน อาทิเช่น การสะท้อนแสงของผิว เพื่อขนาดเล็ที่ต่องเข้าไปประกอบกับระบบขนาดเล็ก กระจกขนาดเล็กที่ใช้ในโปรเจกเตอร์หรือเครื่องที่มีการฉายภาพ เป็นต้น โดยการนำวัตถุเป้าหมายชนิดนี้ไปใช้งานสิ่งที่ต้องระมัดระวังในการยึดจับหรือเคลื่อนย้ายคือ ต้องไม่มีร่องรอยจากการขีด การเสียดสี รอยยุบและรอยขีดข่วนที่นูนจากผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอของผิว ซึ่งถ้าผิวของวัตถุเป้าหมายที่จะถูกแขนแอกซ์ไอเตอร์ไปจับมีความบอบบางหรือเกิดรอยได้ง่ายก็จะส่งผลเสียอย่างมากต่อคุณภาพและประสิทธิภาพของวัตถุเป้าหมายในกรณีที่ผิวของปลายแขนแอกซ์ไอเตอร์มีรอยขีดข่วนแบบนูนและไม่มีความสม่ำเสมอของผิว เพราะฉะนั้นสิ่งที่จะป้องกันปัญหารอยขีดข่วนในเบื้องต้นได้คือ การวัดความหยาบของผิวและตรวจสอบลักษณะผิวของปลายแขนแอกซ์ไอเตอร์เพื่อที่จะได้นำไปใช้งานให้เหมาะสม



รูปที่ 4.1 ฝัวนิกเกลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกลซัลฟาเมตเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 4.2 ผิวนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตเมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์

ตารางที่ 4.1 ค่าความหยาบของผิว निकเกิลที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลาย

สารละลาย	ค่าความหยาบของผิว निकเกิล (Ra), (μm)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
นิกเกิลซัลฟาเมต	6.31	5.63	6.71	6.21	0.54
นิกเกิลซัลเฟต	1.42	1.23	1.21	1.28	0.11

จากรูปที่ 4.1-4.2 พบว่าที่ผิว निकเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะมีความละเอียดและเรียงตัวเป็นระเบียบ โดยตำหนิที่เกิดขึ้นคือมีหลุมวางตัวอยู่บางตำแหน่งซึ่งสาเหตุมาจากช่วงที่ทำขั้นตอนกระบวนการไฟฟ้าเคมี ในส่วนของผิว निकเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต พบว่าจะมีผิวที่เรียบเมื่อมองด้วยตาเปล่าแต่เมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ทำให้เห็นว่าที่ผิวของนิกเกิลมีความเรียบสลับกับความขรุขระที่มีลักษณะเป็นเส้นขีดข่วนรวมเป็นกลุ่มๆในทิศทางที่ไม่แน่นอนรวมถึงหลุมและรอยปูดเป็นก้อนวางตัวอยู่ทั่วไปบนผิว निकเกิลแอคซิวเอเตอร์ ซึ่งบางตัวก็มีลักษณะผิวที่หยาบและมีเส้นการวางตัวแบบไม่มีทิศทาง จากรูปภาพผิว निकเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะเห็นว่ามีความวาวและความสว่างมากกว่า

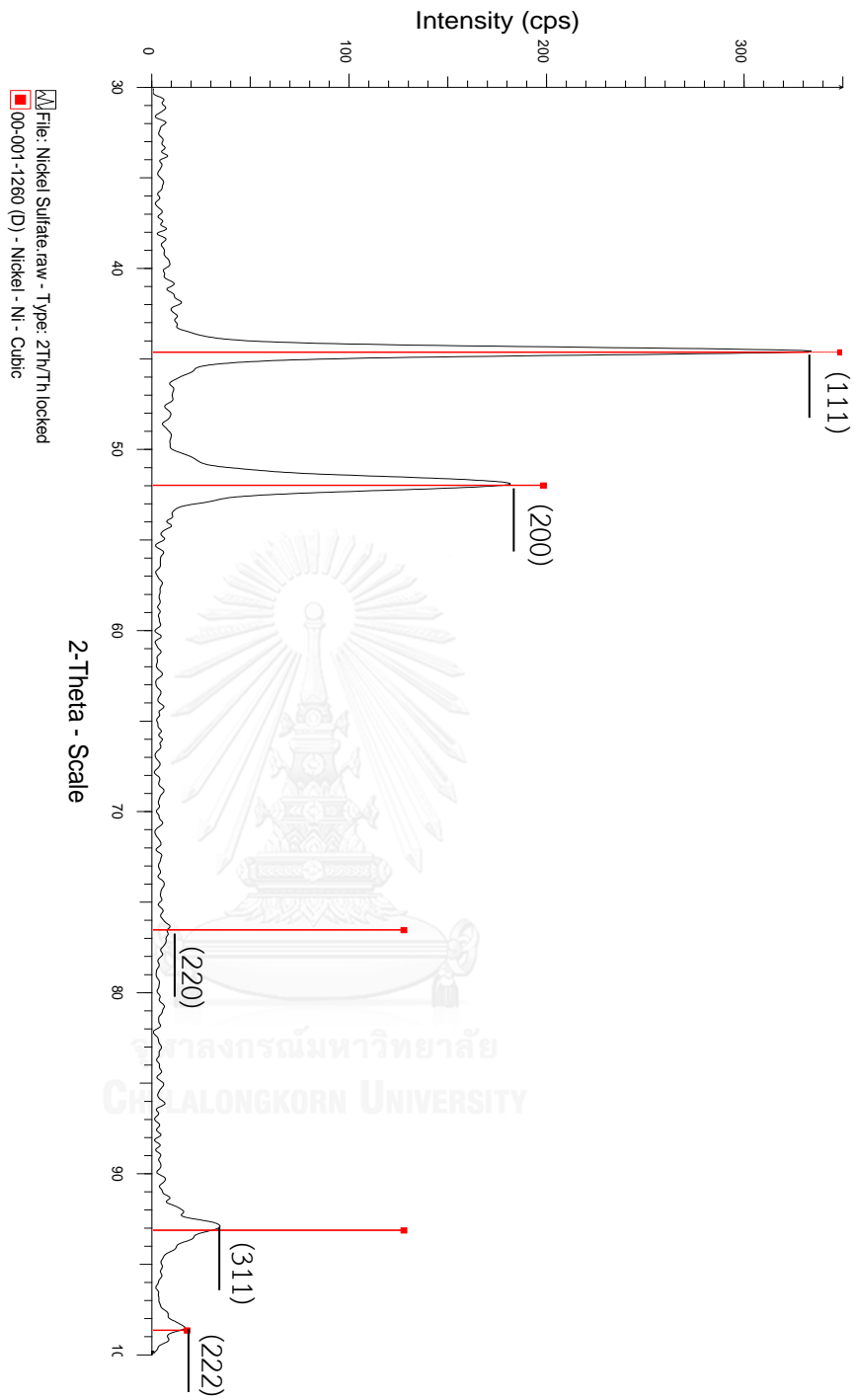
กรณีถ้ามองในมุมของสมรรถนะการทำงานในส่วนของความหยาบของผิวพบว่า ความเรียบและความละเอียดที่ส่งผลเมื่อนำปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ไปยึดจับวัตถุเป้าหมายเนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวไปแล้วสำหรับการจับวัตถุเป้าหมายที่มีผิวที่ส่งผลต่อการทำงานของวัตถุนั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้การสร้างชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะให้ความสามารถในการจับวัตถุได้ดีกว่าและมั่นคงกว่า เนื่องจากผิวของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์มีผิวที่มีความหยาบมากกว่า ทำให้มีความเสียดทานในการยึดจับทำให้วัตถุที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ไปจับมีความมั่นคงและยึดแน่นกว่า อีกทั้งและเมื่อดูผิวผ่านกล้องจุลทรรศน์พบว่า เป็นผิวหยาบแบบละเอียดซึ่งเรียงตัวเป็นระเบียบอย่างสม่ำเสมอทำให้โอกาสที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ไปจับวัตถุเป้าหมายแล้วจะเกิดรอยขีดจากการเลื่อนไปมาของวัตถุเป้าหมายจึงไม่เกิดขึ้น แต่สำหรับนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตนั้นจะให้ผิวที่ราบเรียบสลับกับแนวการเรียงตัวของผิวที่ไม่เป็นระเบียบรวมทั้งความไม่สม่ำเสมอของผิวจะส่งผลให้เมื่อปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ไปจับวัตถุเป้าหมายนั้น วัตถุที่ถูกจับจะไม่มี ความมั่นคงหรือยึดจับได้ไม่แน่นถ้าปลายแขนที่จับมีความราบเรียบเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะทำให้วัตถุหลุด

หรือเลื่อนออกจากแนวการจับได้ทำให้เสียดสีกับขอบปลายแขนแอคซ์เอเตอร์ส่งผลให้เกิดเป็นรอยขีดข่วนผิววัตถุเป้าหมายได้

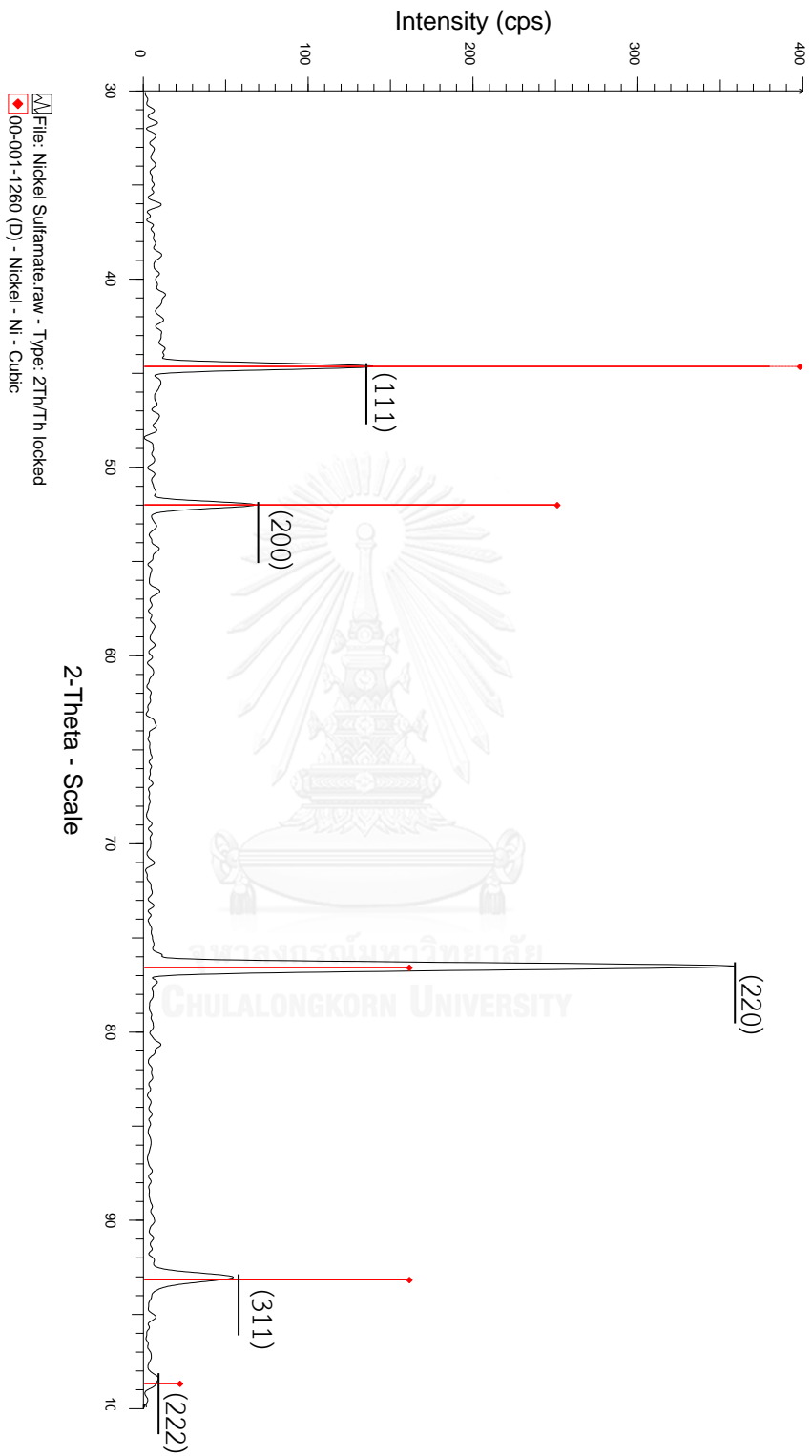
4.2 การตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การพิจารณาที่ผิวภายนอกของแอคซ์เอเตอร์จะสามารถบ่งบอกได้ว่าลักษณะผิวแบบไหนที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตและสารละลายนิเกิลซัลฟาเมต แต่ก็เป็นไปได้ในเชิงของการพิจารณาเบื้องต้นแบบทั่วไป เพราะฉะนั้นการหาคุณลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ภายในโครงสร้างผลึกของนิเกิลที่สร้างมาจากสองสารละลาย จึงเป็นตัวช่วยพิจารณาคุณลักษณะของนิเกิลว่าถูกสร้างขึ้นมาจากสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตหรือสารละลายนิเกิลซัลเฟต โดยวิธีการตรวจสอบลักษณะเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในนิเกิลแอคซ์เอเตอร์ในงานวิจัยนี้คือ การทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD)

เครื่อง XRD นี้จะเป็นเครื่องเฉพาะทางสำหรับการตรวจสอบผลึกในหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็น ผง เกล็ด ผงแร่ธาตุ ขึ้นงานวัสดุระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร เป็นต้น เครื่องจะทำการยิงรังสีไปตามมุมที่ผู้ทดลองต้องการ ซึ่งในการศึกษานี้ทางผู้วิจัยได้นำตัวอย่างนิเกิลที่สร้างจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตและนิเกิลซัลฟาเมตมาทำการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) อย่างละ 2 ตัว โดยก่อนนำไปทดสอบต้องใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียด (เบอร์ 800) มาขัดบริเวณผิวแอคซ์เอเตอร์ออกบ้าง เพื่อกำจัดออกไซด์ในอากาศที่อาจจะมาเกาะอยู่บนชิ้นงานนิเกิลแอคซ์เอเตอร์ได้ โดยต้องเลือกจุดที่จะยิงรังสี X-ray ว่าเป็นจุดใดจากนั้นจึงนำชิ้นงานนิเกิลตำแหน่งที่ต้องการยิงรังสีเอ็กซ์ไปติดไว้ตรงกลางแป้นวางชิ้นงานนิเกิลด้านที่ต้องการยิงรังสีเอ็กซ์ขึ้นเพื่อให้รังสีที่ยิงเข้าไปตกกระทบกับโครงสร้างผลึกภายในชิ้นงานนิเกิล (แสดงในภาคผนวก ก) การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกช่วงมุมองศา (2 เท่าของมุมเนื่องจากมีการหมุนทั้งสองฝั่ง) ในการยิงรังสีเอ็กซ์คือ $30^{\circ} - 100^{\circ}$



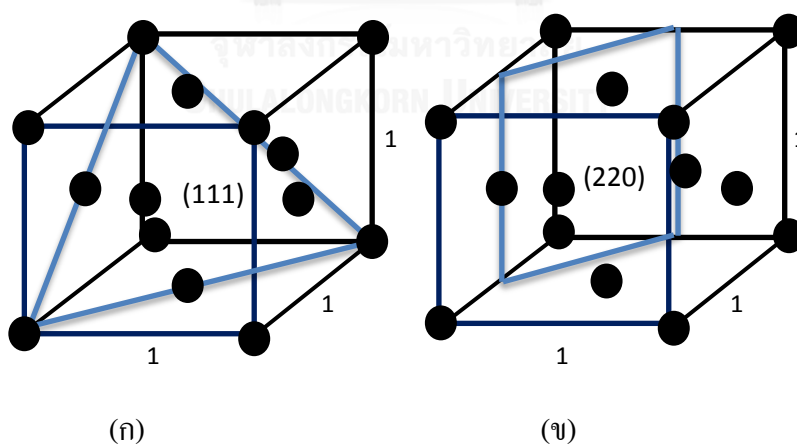
รูปที่ 4.3 กราฟของโครงสร้างผลึกนิเกิลที่สร้างจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตของการทดสอบ XRD



รูปที่ 4.4 กราฟของโครงสร้างผลึกนิเกิลที่สร้างจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตของการทดสอบ XRD

จากรูปที่ 4.3-4.4 มีเส้นสีแดงเป็นเส้นอ้างอิงสำหรับโครงสร้างผลึกในนิเกิลหมายความว่าถ้าทำการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปที่ชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีพบว่าค่าพลังงานสูงขึ้นไปสอดคล้องกับเส้นอ้างอิงทุกเส้นหมายถึงชิ้นงานที่มีโครงสร้างผลึกที่เป็นนิเกิล แต่ถ้ามีพลังงานสูงไปปรากฏที่ตำแหน่งอื่น ๆ นอกเหนือจากเส้นอ้างอิงแสดงว่าในชิ้นงานนั้นมีสารประกอบชนิดอื่นรวมอยู่ด้วย เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มชั้นพลังงานต่อมุมสององศาที่บ่งบอกเอกลักษณ์ของโครงสร้างภายในชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ซึ่งจะเป็นกราฟที่แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้างภายในชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟต โดยจุดที่มีค่าความเข้มพลังงานที่สูงที่สุดอยู่ที่มุม 44.6 องศา และที่มุมที่เกิดจุดสูงสุดนี้จะเป็นตัวแสดงเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกนิเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตโดยโครงสร้างผลึกที่แสดงเอกลักษณ์สำหรับสารละลายนี้คือทิศทางของระนาบผลึกที่แสดงอยู่ในรูปของดรรชนีมิลเลอร์ที่ (111)

จากรูปในรูปที่ 4.4 จะเป็นกราฟที่แสดงผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้างภายในชิ้นงานที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตซึ่งได้นำผลของความเข้มพลังงานต่อมุมสององศามาเทียบกับเส้นอ้างอิงของโครงสร้างผลึกนิเกิลพบว่าความเข้มพลังงานที่เกิดสูงสุดที่มุม 76.8 องศา เพราะฉะนั้นโครงสร้างผลึกที่แสดงเอกลักษณ์สำหรับสารละลายนี้คือทิศทางของระนาบผลึกที่แสดงอยู่ในรูปของดรรชนีมิลเลอร์ที่ (220) โดยโครงสร้างผลึกนิเกิลที่แสดงนั้นอยู่ในรูปแบบ FCC (Face-centered-cubic) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกนิเกิลที่เป็นเอกลักษณ์ที่ของการทดสอบ XRD (ก) ระนาบผลึกที่มาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟต (ข) ระนาบผลึกที่มาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟต

ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่าในการพิจารณาคุณลักษณะทางวัสดุโดยใช้โครงสร้างผลึกเป็นตัวพิสูจน์เอกลักษณ์ของชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตและสารละลาย

นิกเกิลซัลฟามาตจะเห็นเอกลักษณ์ได้อย่างชัดเจนคือ ทิศทางของที่วางตัวของผลึกภายในชิ้นงาน นิกเกิลพบว่าเอกลักษณ์ของนิกเกิลที่สร้างด้วยสารละลายนิกเกิลซัลเฟต คือระนาบผลึกที่อยู่ในรูปของ ครรชนีมิลเลอร์ (111) ซึ่งมีอะตอมในระนาบผลึกนี้อยู่ 6 อะตอม และสารละลายนิกเกิลซัลฟามาต จะ แสดงเป็นระนาบผลึกที่อยู่ในรูปของครรชนีมิลเลอร์ (220) ซึ่งมีอะตอมในระนาบผลึกนี้อยู่ 2 อะตอม

4.3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน

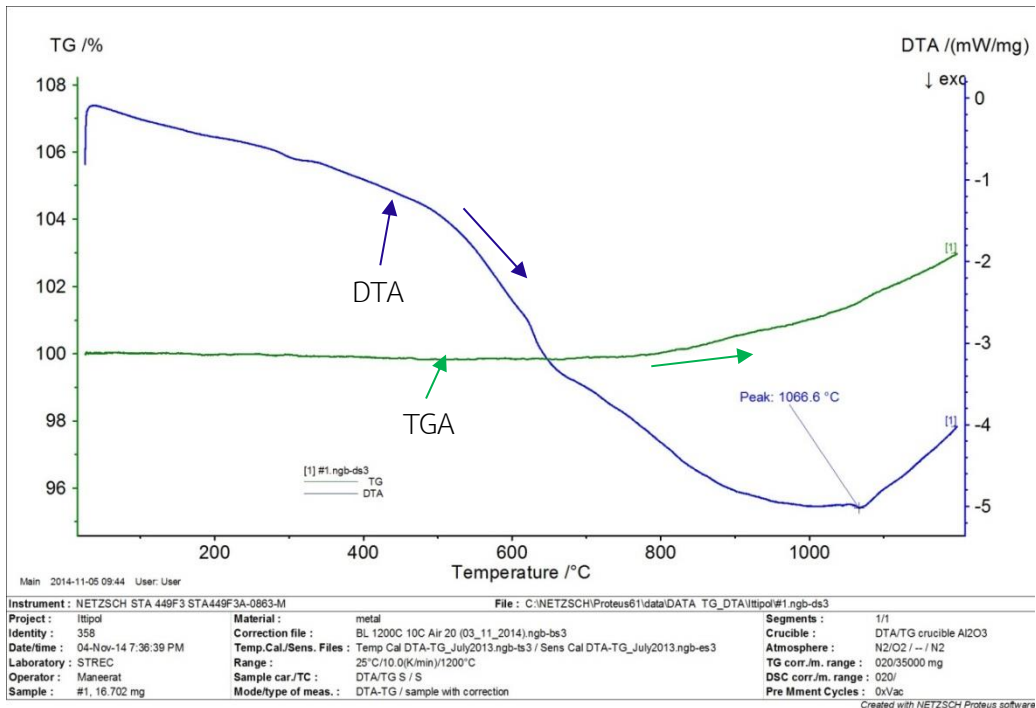
การศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานความร้อนของ ชิ้นงานนิกเกิลนั้นเพื่อให้ทราบถึงจุดเดือดของชิ้นงานนิกเกิล รวมถึงแนวโน้มของน้ำหนักที่จะลดลงเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนเนื่องจากแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบนี้ จะเกิดการขยายตัวทางร้อนขึ้นภายในโครงสร้างแอกซ์เวเตอร์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของปลายแขน แอกซ์เวเตอร์ไปยึดจับวัตถุซึ่งเมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นไปความร้อนที่สะสมภายในโครงสร้างก็จะ มากขึ้นตามจนทำให้ชิ้นงานนิกเกิลพังเสียหาย เพราะฉะนั้นการศึกษาคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของ น้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการนำไปใช้ในการตัดสินใจ ที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับงานต่างๆที่มีไหลดทางความร้อนเป็นปัจจัยหลักสำหรับการทำงานของ แอกซ์เวเตอร์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทาง ความร้อนจะใช้เครื่องมือรุ่น Netzsch STA490C ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (แสดงในภาคผนวก ก) หลักการทำงานคือ วัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของ ตัวอย่าง พร้อมกับวัดการดูดหรือคายความร้อนของตัวอย่าง เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง ชั่งวัดน้ำหนักและใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิของสารอ้างอิง ซึ่ง คุณสมบัติทางกายภาพที่วิเคราะห์ได้ในการทดสอบนี้จะใช้เทคนิค 2 แบบในการวัด คือเทคนิค TGA จะเป็นเทคนิควัดน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปเมื่อให้ความร้อนและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเทคนิค DTA จะเป็นเทคนิคการวัดการดูดหรือคายความร้อนของตัวอย่างเมื่อให้ความร้อนและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ต้องกำหนดเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบนี้คือ Heating rate (HR) บรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบ และช่วงอุณหภูมิที่วัด ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดข้อมูลที่ใช้ทำการทดสอบคือ ค่า HR =10 K/min บรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบคืออากาศ ส่วนช่วงอุณหภูมิที่ใช้คือ 20 – 1200 องศาเซลเซียส สุ่ม ตัวอย่างแอกซ์เวเตอร์ 3 ตัว ของสารละลายนิกเกิลซัลเฟต และอีก 3 ตัว ของสารละลายนิกเกิล ซัลฟามาต ไปทดสอบตามข้อมูลที่ได้กำหนดไว้

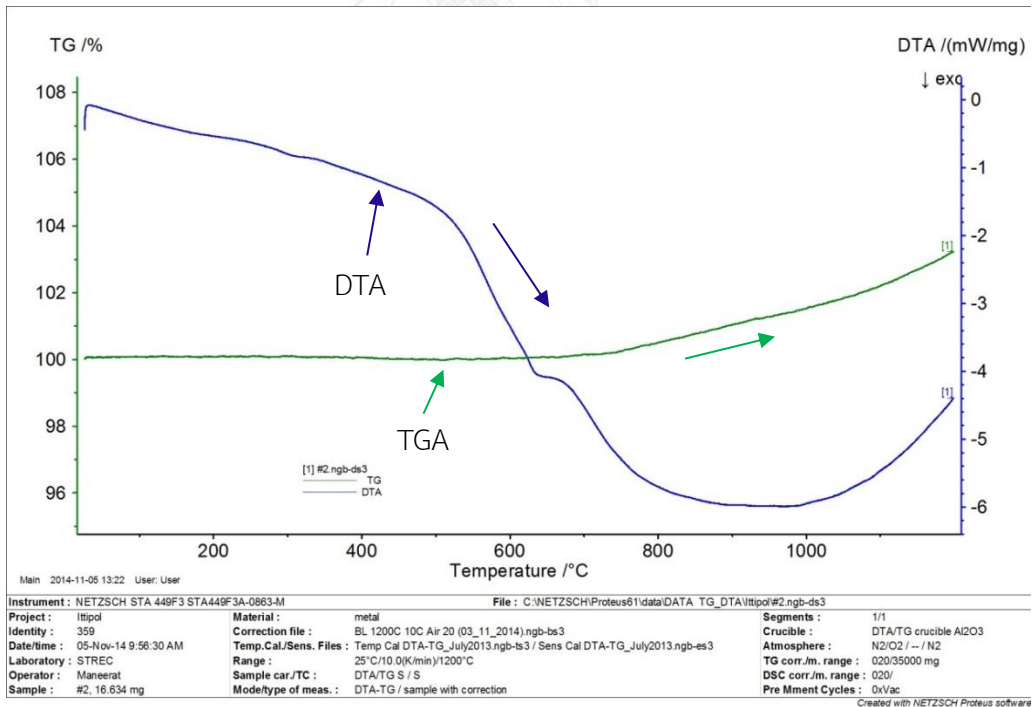
รูปภาพที่ 4.6ก-ค แสดงกราฟการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อมีการ ดูดและคายพลังงานทางความร้อนสำหรับชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต แกน Y

ทางด้านซ้ายมือที่เป็นสีเขียวซึ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานนิกเกิลเมื่อมีการให้ความร้อนไปที่ชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ และทางด้านขวามือที่เป็นสีฟ้าจะบอกถึงการดูดและคายความร้อนของชิ้นงานนิกเกิลในช่วงของการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นไป ในส่วนแกน X จะเป็นอุณหภูมิที่ทำการเพิ่มขึ้นไปตามที่ต้องการในการทดลอง โดยรูปภาพที่ 4.6ก-ค คือกราฟที่แสดงผลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะสังเกตได้ว่าที่กราฟสีเขียวคือการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของนิกเกิลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปตั้งแต่ 25 ถึง 1200 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นมา 3% จากเดิม ทั้งสามรูปในส่วนของกราฟสีน้ำเงินที่เป็นการดูดและการคายความร้อนพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปชิ้นงานนิกเกิลจะมีการคายพลังงานออกมาอย่างรวดเร็ว (กราฟจากบนลงล่างคือการคายความร้อน) เพื่อที่จะรักษาการถ่ายโอนความร้อนภายในชิ้นงานให้สมดุลให้ทนต่ออุณหภูมิที่ถูกเพิ่มขึ้นด้วยเครื่องทดสอบจนอุณหภูมิถึงจุดสูงสุดหรือเรียกได้ว่าเป็นจุดเดือดสูงสุดของนิกเกิลก่อนชิ้นงานจะเกิดความเสียหายขึ้น ในรูปที่ 3.7ก มีจุดสูงสุดหรือจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1066 องศาเซลเซียส และในรูปที่ 3.7ข-ค จะไม่ปรากฏจุดสูงสุดอย่างชัดเจน เนื่องจากจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตลอด เมื่อพิจารณาจากข้อมูลดิบทำให้ได้จุดหลอมเหลวอยู่ที่อุณหภูมิ 994.1 องศาเซลเซียส และ 1003.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

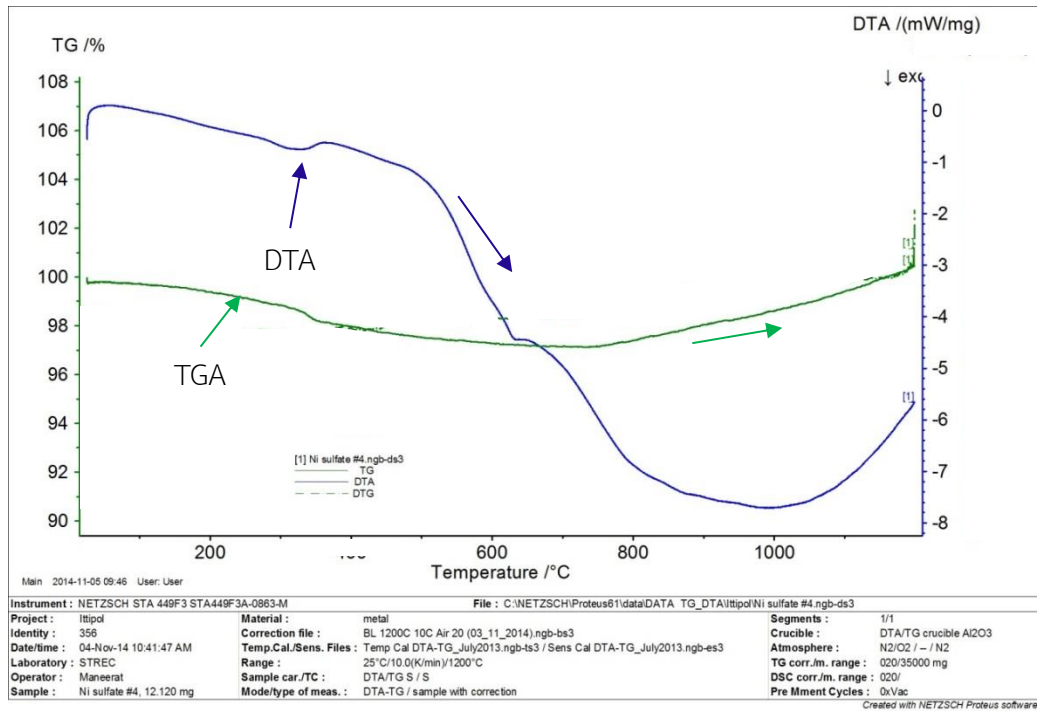
รูปภาพที่ 4.7ก-ค เป็นชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตโดยลักษณะของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นงานนิกเกิลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 1200 องศาเซลเซียส อยู่ที่ 2% - 3% และเกิดการคายความร้อนอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปถึงจุดสูงสุดของอุณหภูมิหรือจุดหลอมเหลวของทั้งสามตัวอย่างอยู่ที่ 1032.2, 1067 และ 994.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานที่สร้างจากสารละลายซัลเฟตและซัลเฟตมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000 องศาเซลเซียส



(f)

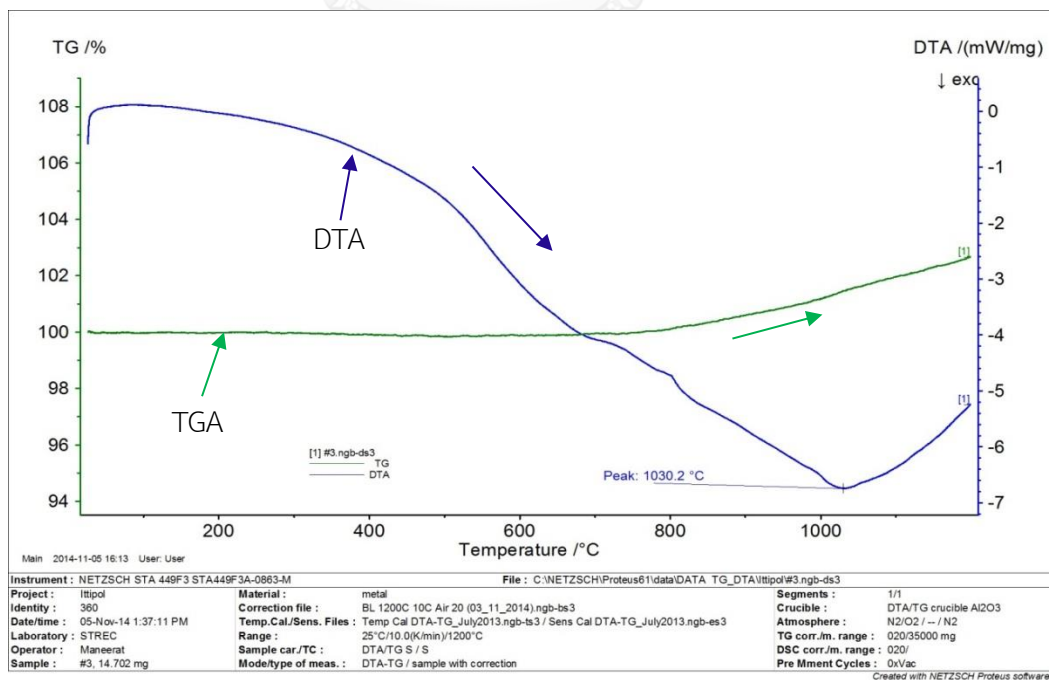


(g)

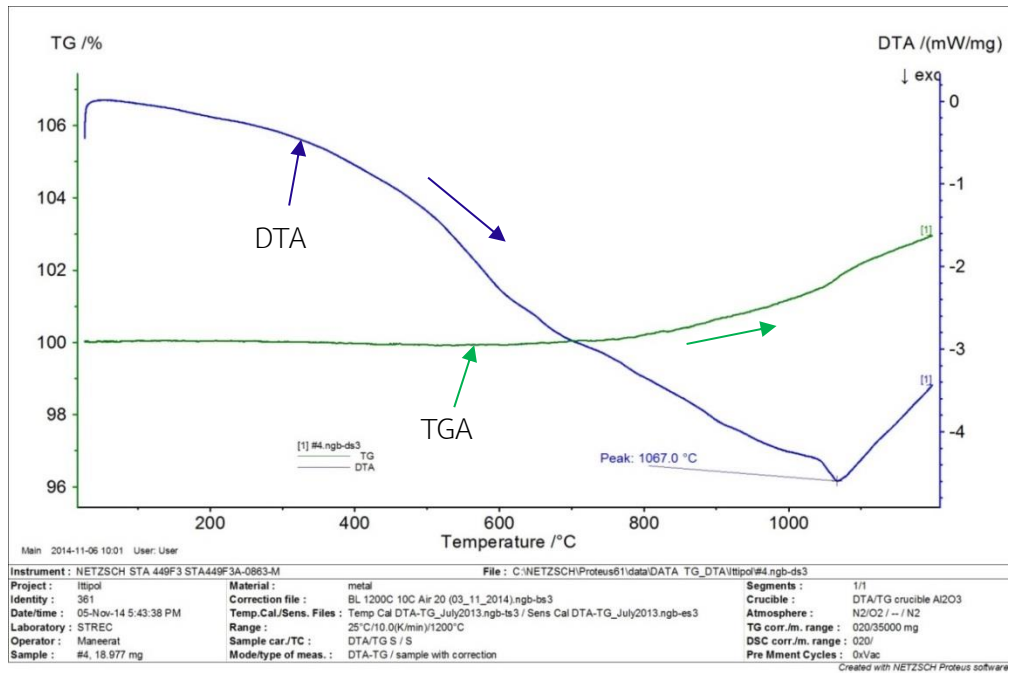


(ค)

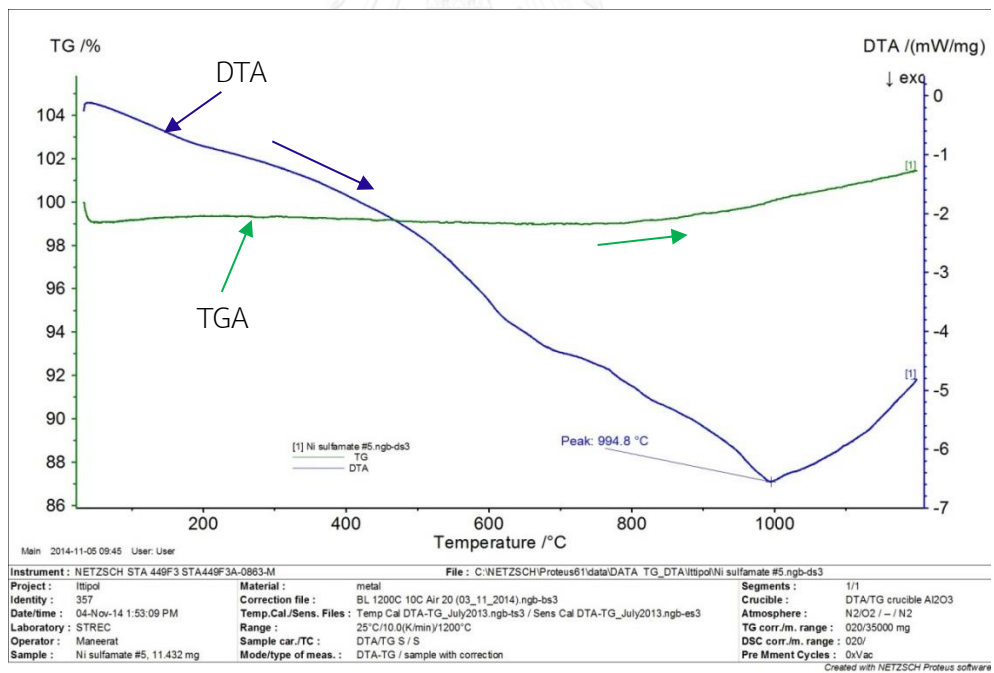
รูปที่ 4.6ก-ค ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของนิกเกิลที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต



(ก)



(จ)



(ค)

รูปที่ 4.7ก-ค ผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของนิกเกิลที่สร้างจากสารละลาย นิกเกิลซัลฟาเมต

ผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ชิ้นงานจะทำให้น้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 2%-3% จากเดิมก่อนทำการทดลอง เหตุผลที่น้ำหนักไม่ลดลงนั้นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นทำให้ออกไซด์ที่อยู่ในอากาศวิ่งมาเกาะที่ชิ้นงานนิกเกิลส่งผลให้น้ำหนักที่วัดออกมาได้มีค่ามากขึ้น ในส่วนของเทคนิค DTA พบว่ามีการคายความร้อนที่เหมือนกันตลอดช่วงการเพิ่มอุณหภูมิไปใกล้กับอุณหภูมิของชิ้นงานนิกเกิลนั้นถึงจุดสูงสุดหรือจุดหลอมเหลว ซึ่งถ้าสังเกตจากผลของการสร้างทั้งสองสารละลายนั้นมีความใกล้เคียงกันโดยอยู่ที่ 992 – 1067 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีความแตกต่างกัน

4.4 การทดสอบความแข็งด้วยเทคนิควิกเกอร์

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานในเชิงวัสดุศาสตร์เป็นที่นิยมมากเนื่องจากเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของชิ้นงานที่ควรจะทราบในกรณีถ้าชิ้นงานนั้นๆเป็นของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งของแข็งที่เป็นโลหะ ซึ่งค่าความแข็งที่ได้นั้นจะช่วยในการพิจารณานำไปใช้กับงานต่างๆได้เป็นอย่างดีในลักษณะของการทนต่อการขีดข่วน การทนต่อการถูกกัดจากวัสดุอื่น ความสามารถในการยืดหยุ่นของชิ้นงาน การต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เป็นต้น โดยเทคนิคการทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นมีหลายเทคนิคที่นิยมใช้กันคือ เทคนิคบริเนลล์ (Brinell hardness test) เทคนิคคร็อคเวลล์ (Rockwell hardness test) เทคนิคคีนูฟ (Knoop hardness test) และเทคนิควิกเกอร์ (Vicker hardness test) ในแต่ละเทคนิคนี้มีความแม่นยำใกล้เคียงกันแตกต่างกันที่ลักษณะงานที่จะนำมาทดสอบว่ามีขนาดเป็นอย่างไร เป็นวัสดุชนิดไหน มีข้อจำกัดอะไรบ้างในการทดสอบ เป็นต้น

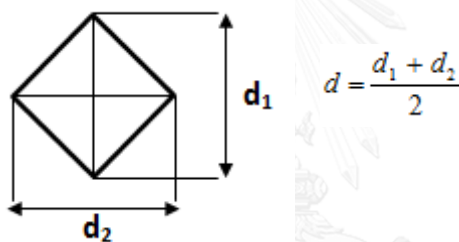
ซึ่งปัจจัยหลักในการเลือกเทคนิคที่จะนำมาทำการทดสอบความแข็งในงานวิจัยนี้คือขนาดของวัสดุ โดยตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบคือนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดอยู่ในช่วงไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร ซึ่งถือว่ามีความเล็กมาก ทางผู้วิจัยจึงเลือกเทคนิควิกเกอร์ (Vicker hardness test) มาทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Zwick -3212 ตามมาตรฐาน ASME E - 92:2003 (แสดงในภาคผนวก ก) เนื่องจากเทคนิคนี้มีหัวกดที่ใช้ทำการทดสอบเป็นหัวกดเพชรแบบปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมที่มีความแข็งมากเพราะฉะนั้นเวลานำไปใช้งานจึงสามารถวัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (HV ประมาณ 5) จนถึงโลหะที่มีความแข็งมาก (HV ประมาณ 1500) โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนหัวกดแต่จะเปลี่ยนเฉพาะแรงกดเท่านั้นซึ่งมีตั้งแต่ 1-120 kgf ขึ้นอยู่กับความแข็งของโลหะที่มาทำการทดสอบ ทำให้เทคนิคนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและมีข้อได้เปรียบกว่าทุกเทคนิคโดยเฉพาะอย่างยิ่งได้เปรียบในเรื่องของการที่ไม่ต้องสนใจขนาดใหญ่หรือเล็กและความหนาของโลหะที่นำมาทดสอบ

หลักการการทดสอบด้วยเทคนิควิกเกอร์คือ กดหัวเพชรลงไปที่มีผิวงานที่มีความเรียบด้วยแรงกดทดสอบคงที่ หลังจากกดลงไปวัสดุตัวอย่างในระยะเวลาหนึ่ง ก็จะดึงหัวเพชรออกซึ่งในตอนนี้จะเห็นเป็นรอยบุ่มถาวรบนผิวชิ้นงานโลหะที่นำมาทดสอบ จากนั้นก็จะวัดขนาดเส้นทแยงมุมของรอยบุ่มเพื่อ

หาค่าความแข็งต่อไป ซึ่งค่าความแข็งแบบวิกเกอร์นี้จะ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กดทดสอบต่อพื้นที่ผิวเอียงของรอยบุ๋มแสดงในรูปที่ 4.8 และสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) แสดงในสมการที่ 4.1

$$HV = \frac{1.854P}{d^2} \quad (4.1)$$

โดยที่ HV = ค่าความแข็งแบบ Vicker (kgf/mm^2)
P = แรงแกด (kgf)
d = ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)



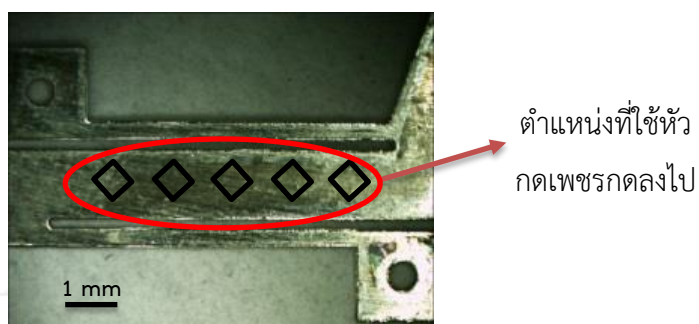
รูปที่ 4.8 อัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้กดทดสอบต่อพื้นที่ผิวเอียงของรอยบุ๋ม

ข้อควรพิจารณาในการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

- ผิวของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบ เพื่อให้ได้ค่าเส้นทแยงมุมของรอยบุ๋มที่แน่นอนและจะทำให้ค่าความแข็งที่วัดได้มีค่าที่ถูกต้อง
- ความหนาของชิ้นงานควรมีค่ามากกว่า 1.5 เท่า ของเส้นทแยงมุมของรอยกด
- ไม่ควรวัดความแข็งในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิม ควรเว้นระยะห่างไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ของเส้นทแยงมุมรอยกด ทั้งแกน X และ Y

เมื่อทราบเงื่อนไขในการทดสอบแล้วทางผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบจึงได้กำหนดวิธีวัดความแข็งคือ ทำการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์กับชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์นิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตอย่างละ 3 ตัว ด้วยน้ำหนัก 200 กรัม ที่หัวกดเพชรกดลงไปทีผิวงานตรงกลางโดยเลือกด้านที่ติดกับผิวแผ่นรองรับ ที่เป็นสแตนเลสเนื่องจากในขั้นตอนการสร้างผิวแผ่นรองรับ จะมีการเตรียมผิวด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเพื่อให้ผิวแผ่นรองรับ มีความ

เรียบมากที่สุดเพราะฉะนั้นด้านนี้จึงเป็นด้านที่มีความเรียบของผิวพร้อมไว้อยู่แล้ว ซึ่งไม่จำเป็นต้องขัดผิวซ้ำอีกรอบเนื่องจากชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์มีขนาดเล็กอาจจะทำให้ชิ้นงานเป็นรอยขีดข่วนหรือเสียหายได้ถ้าเกิดมีการขัดผิวซ้ำอีกรอบดังแสดงในรูป 4.9 จะได้ผลการวัดของขนาดเส้นทแยงมุมในตำแหน่งต่างๆของรอยบวมที่เกิดจากการกดของหัวกดเพชรจากนั้นจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณหา HV ดังแสดงในตารางที่ 4.2-4.3



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งที่ใช้หัวเพชรกดทดสอบบนชิ้นงานนิกเกิล

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต

จำนวนรอยกด	ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0.04	0.039	0.039
2	0.04	0.039	0.04
3	0.039	0.04	0.04
4	0.039	0.039	0.04
5	0.04	0.039	0.04
ค่าเฉลี่ยของ d	0.0396	0.0392	0.0398
ค่าความแข็ง HV(0.2)	237	241	234

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต

จำนวนรอยกด	ขนาดเส้นทแยงมุม d_1 และ d_2 เฉลี่ย (mm)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	0.027	0.025	0.026
2	0.027	0.0267	0.0265
3	0.0265	0.026	0.027
4	0.027	0.025	0.027
5	0.0265	0.025	0.027
ค่าเฉลี่ยของ d	0.0268	0.0253	0.0267
ค่าความแข็ง HV(0.2)	516	579	520

จากผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker) พบว่าชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะให้ค่าความแข็ง (HV) มากกว่าชิ้นงานที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตหมายความว่าชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะมีความสามารถในการต้านทานการกัดจากวัตถุอื่นและการแปรรูปถาวรได้มากกว่า ในทางกลับกันโครงสร้างนิกเกิลจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่แข็งกว่าก็อาจจะทำความเสียหายต่อชิ้นงานที่ถูกจับได้มากกว่า

4.5 สรุปผล

การศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุที่สร้างมาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีของทั้งสองสารละลายนั้น เพื่อให้ทราบถึงเอกลักษณ์เฉพาะตัวของชิ้นงานนิกเกิลที่ถูกสร้างขึ้นมาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยการทดลองใช้สารละลายสองตัวคือ สารละลายนิกเกิลซัลเฟตและสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต แล้วจึงนำสารละลายทั้งสองชนิดมาทำการสร้างชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์หรือชิ้นงานตัวอย่าง ให้สอดคล้องกับเครื่องมือที่จะนำไปทำการทดสอบทางวัสดุ โดยคุณสมบัติทางวัสดุที่นำมาทำการวิเคราะห์และทดสอบแล้วนั้นในกรณีจากการทดลองด้วยชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อนำวิธีการและสารละลายที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาสร้างเป็นชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนคุณสมบัติทางวัสดุที่ได้ ก็จะไม่แตกต่างกับการทดสอบด้วยชิ้นงานตัวอย่าง แต่จะต้องมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนจริงอย่างเช่น ความหนา เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติหรือคุณลักษณะของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ต่างๆจะเป็นตัวช่วยในการประกอบการพิจารณาการนำไปใช้งานให้เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการทำงานได้มากที่สุดรวมถึงอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวัสดุทั้งหมด 4 แบบ คือ การวัดความหยาบผิว (Roughness), การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในแอคซิวเอเตอร์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD), การทดสอบความแข็งด้วยวิธีวิกเกอร์ (Vicker hardness) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer)

การวัดความหยาบของผิวนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์พบว่าที่การสร้างนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะให้ผิวที่มีค่าความหยาบ (Ra) อยู่ที่ 6.21 ไมโครเมตร และเมื่อส่องดูผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าลักษณะผิวมีความละเอียดลักษณะคล้ายกับเม็ดทรายขนาดเล็กเรียงตัวเป็นระเบียบ ส่วนนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะมีค่าความหยาบ (Ra) อยู่ที่ 1.28 ไมโครเมตร เมื่อส่องดูผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าจะให้ผิวที่เรียบสลับกับผิวที่ขรุขระลักษณะเหมือนรอยขีดข่วนเป็นร่องกับเป็นก้อนกลมคล้ายๆกับตามดในงานเชื่อมซึ่งไม่มีความสม่ำเสมอของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต ซึ่งเมื่อนำนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ไปยึดจับผิววัตถุเป้าหมาย นิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะยึดจับได้ดีกว่าเนื่องจากลักษณะผิวจะมีความละเอียดเป็นเม็ดๆ ทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุกับผิวนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์มากกว่าจึงยึดจับวัตถุใดๆได้แน่นและมั่นคงกว่า

หลังจากศึกษาลักษณะผิวที่เกิดขึ้นจากการสร้างของทั้งสองสารละลายแล้วในเบื้องต้นสามารถระบุได้ด้วยสายตาว่าผิวนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและซัลเฟตเป็นแบบใด ซึ่งผิวที่เกิดขึ้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนสารประกอบทางเคมีของ

สารละลายนิกเกิลซึ่งลักษณะสีผิวและความวาวอาจจะมีใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นเพื่อความชัดเจนในการระบุว่าชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์ที่สร้างมานั้นเป็นคุณลักษณะของนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายใด โดยทำการตรวจสอบลักษณะภายในโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในผิวนิกเกิลแอกซ์ไซด์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อหาเอกลักษณ์ของนิกเกิลแอกซ์ไซด์ที่สร้างมาจากสองสารละลาย โดยทดลองสารละลายละ 2 ตัว พบว่าให้ผลเหมือนกันหมดในแต่ละสารละลาย ซึ่งนิกเกิลแอกซ์ไซด์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตนั้นมีผลึกที่แสดงค่าความเข้มข้นของพลังงานมากที่สุดคือ ผลึกที่มีแกนโคออดิเนตที่แสดงในรูปตรรกะนิมิลเลอร์อยู่ที่ (220) และสำหรับนิกเกิลแอกซ์ไซด์ที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะมีผลึกที่แสดงค่าความเข้มข้นของพลังงานมากที่สุดโดยแสดงเป็นแกนโคออดิเนตที่อยู่ในรูปตรรกะนิมิลเลอร์ที่ (111) การเรียงตัวของผลึกนั้นอยู่ในรูปแบบ FCC(Face-Center-Cubic)

เมื่อทราบเอกลักษณ์ภายในโครงสร้างของนิกเกิลแอกซ์ไซด์ที่สร้างมาจากสองสารละลายแล้ว สิ่งต่อไปที่สำคัญของการศึกษาคุณลักษณะของนิกเกิลแอกซ์ไซด์เชิงไฟฟ้าความร้อนคือการหาคุณสมบัติทางความร้อนที่เกิดขึ้นและจุดหลอมเหลวของชิ้นงานนิกเกิลที่มาจากทั้งสองสารละลาย ช่วยประกอบการตัดสินใจเพื่อเลือกนำไปใช้งาน ซึ่งคือการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer) โดยทำการทดลองกับเครื่องทดสอบ Netzsch STA490C ใช้ชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์ทั้งสองสารละลายโดยใช้สารละลายละ 3 ตัวอย่าง ทำการกำหนดสภาวะที่จะใช้ในการทดลองคือ ใช้ อัตราการผ่านความร้อนไปที่ชิ้นงาน(HR) = 10 K/min โดยวางชิ้นงานอยู่ในอากาศ แล้วเร่งอุณหภูมิภายในเครื่องที่มีชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์วางอยู่จาก 25 – 1200 องศาเซลเซียส เพื่อดูว่าชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์จะสามารถทนความได้สูงที่สุดเท่าไรเมื่อมีความร้อนที่เพิ่มอยู่ตลอดเวลาอยู่รอบๆข้างและดูว่าน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์ถูกเผาโดยการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องทดสอบที่มีชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์วางอยู่ ผลที่ได้พบว่าที่ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก(TG) ของนิกเกิลแอกซ์ไซด์ทั้งสองสารละลายนั้นมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเล็กน้อยประมาณ 2%-3% เนื่องจากออกไซด์ในอากาศซึ่งในอากาศมีก๊าซออกซิเจนเมื่อมีการเผาพร้อมกับธาตุอื่นจึงทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวนิกเกิลแอกซ์ไซด์อย่างต่อเนื่องในขณะที่นิกเกิลแอกซ์ไซด์ถูกเผาด้วยอุณหภูมิที่เร่งขึ้นไป ในส่วนของการดูดและคายความร้อน (DTA) ของชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์นั้นพบว่าเมื่อเร่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปตามลำดับชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์ทั้งสองสารละลายจะมีการคายความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มไปถึงจุดที่ชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์จะสามารถทนได้และพังเสียหายในที่สุดหรือที่เรียกว่าจุดเดือดสูงสุดของชิ้นงานนิกเกิลแอกซ์ไซด์ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วงประมาณ 890-1066 องศาเซลเซียส

การทดสอบที่เป็นที่นิยมในการศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุของตัวอย่างที่เป็นโลหะคือ การทดสอบความแข็ง ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิกเกอร์ (Vicker) ในการทดสอบความแข็งเนื่องจากชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์มีขนาดเล็ก โดยใช้ชิ้นงานที่นิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตมาทำการทดสอบอย่างละ 3 ตัว แล้วใช้หัวเพชรของเครื่องทดสอบกดลงไป 5 จุดที่ตรงกลางแขนใหญ่ของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์โดยผิวที่จะทำการทดสอบต้องขัดให้เรียบเพื่อให้เห็นผิวที่ถูกกดด้วยหัวเพชรลงไปได้อย่างชัดเจน โดยน้ำหนักที่กดลงไปคือ 200 กรัม ผลที่ได้คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีค่า 237, 234, 241 และ นิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์อยู่ที่ 516, 520, 579 ซึ่งนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะมีความแข็งมากกว่า แต่การนำไปใช้งานกับวัสดุขนาดเล็กลักษณะนั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากเมื่อปลายแขนไปหยิบจับวัสดุขนาดเล็กซึ่งมีความบอบบางอยู่แล้วอาจจะทำให้วัสดุเป้าหมายเสียหายได้เพราะปลายแขนที่จับไม่มีความยืดหยุ่นพอ เพราะฉะนั้นสำหรับการใช้งานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเล็กแบบนี้จึงควรที่จะเลือกสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมาใช้สร้างชิ้นงาน

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย (XRD) พบว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง T. Fritz, M. Griepentrog et al.(2001) โดยที่ที่ระนาบ (111) จากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตจะมีความแข็งมากกว่า (220) ที่มาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต แสดงจากรูปที่ 3.16ก-ข เนื่องจากการวางตัวของระนาบผลึกใน FCC พบว่าที่ (111) จะมีระนาบที่วางตัวอยู่เต็มลูกบาศก์และวางตัวขวางแต่ละระนาบในลูกบาศก์หรืออยู่นอกระนาบของลูกบาศก์ทำให้อะตอมภายในที่เรียงกันมีความหนาแน่นมากขึ้นโดยมีอะตอมที่ผ่านระนาบอยู่ทั้งหมด 6 อะตอม แต่ที่ (220) จะวางตัวอยู่ภายในลูกบาศก์แบบไม่เต็มและอยู่ในแนวขนานกับแกน Z ของผิวลูกบาศก์ โดยมีอะตอมที่ผ่านระนาบอยู่ทั้งหมด 2 อะตอม เพราะฉะนั้นความหนาแน่นของอะตอมจึงไม่มากเท่ากับ (111)

บทที่ 5

การทดสอบสมรรถนะของกลไกแอคชูเอเตอร์นิกเกิลไฟฟ้าเชิงความร้อน

บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบชิ้นงานแอคชูเอเตอร์นิกเกิลไฟฟ้าเชิงความร้อนที่สร้างขึ้นมาด้วยวิธีลิโทกราฟี และกระบวนการชุบโลหะไฟฟ้าเคมี โดยตัวชิ้นงานแอคชูเอเตอร์เป็นโลหะนิกเกิล มีระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ที่แตกต่างกัน ทั้ง 4 แบบ คือ 100, 200, 300, 400 μm ที่ความหนาเท่ากันคือ 100 μm นำมาทำการทดสอบสมรรถนะต่างๆของแอคชูเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมรรถนะของแอคชูเอเตอร์ 4 วิธี คือ การวัดอุณหภูมิแอคชูเอเตอร์ (Temperature measurement) การทดสอบการตอบสนองในเชิงสถิต (Static response) การทดสอบการตอบสนองในเชิงพลวัต (Dynamic response) และการทดสอบแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์ (Force test)

เนื่องจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer) ที่ผ่านมาพบว่าแอคชูเอเตอร์ที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลายนั้นมีค่าจุดหลอมเหลวของชิ้นงานและการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการให้ความร้อนแก่แอคชูเอเตอร์ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆนั้นมีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าคุณสมบัติทางความร้อนของแอคชูเอเตอร์ที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลายนั้นเหมือนกัน เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้แอคชูเอเตอร์ที่สร้างมาจากทั้งสองสารละลายมาทดสอบอุณหภูมิจากการป้อนกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกแอคชูเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตอย่างเดียวนำมาวัดอุณหภูมิแต่ละจุดบนชิ้นงานแอคชูเอเตอร์และจากนั้นจะนำไปทดสอบสมรรถนะการทำงานต่อในหัวข้อถัดไปเพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกนำไปใช้งานใดๆ

เนื่องจากการสร้างชิ้นงานแอคชูเอเตอร์และการทดสอบคุณสมบัติที่ผ่านมาได้พบข้อดีของการใช้สารละลายชนิดนี้อย่างเห็นได้ชัดที่จะมีประโยชน์ต่อการใช้งานโดยตรง คือการใช้สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตในการสร้างนั้นจะให้ความเร็วในการเคลือบของนิกเกิลไอออนไปยังฝั่งแคโทดหรือการทำการชุบไฟฟ้าเคมีได้มากกว่าทำให้สร้างได้รวดเร็วขึ้น และการวัดความหยาบของผิวนิกเกิลแอคชูเอเตอร์พบว่าผิวที่เกิดจากการสร้างด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะมีผิวที่หยาบกว่าและเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าผิวมีความละเอียดและการเรียงตัวของผิวที่เป็นระเบียบคล้ายๆกับเม็ดทรายทำให้เมื่อนานิกเกิลแอคชูเอเตอร์ไปยึดจับวัตถุเป้าหมายได้อย่างแน่นอนหนาและมั่นคงรวมถึงไม่ส่งผลเสียต่อชิ้นงานจากการไหลของวัตถุเป้าหมายเนื่องจากผิวที่ละเอียดนี้จะมีแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุและผิวนิกเกิลแอคชูเอเตอร์ทำให้วัตถุที่ถูกยึดจับไม่มีการไหลหรือหลุดออกจากแนวแขนที่จับในระหว่างการเคลื่อนวัตถุ และค่าความแข็งของที่วัดด้วยวิธีวิกเกอร์พบว่านิกเกิลแอคชูเอ

เตอร์ที่สร้างด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตจะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าซึ่งเป็นข้อดีสำหรับแอกซ์เวเตอร์ เนื่องจากวัตถุที่ถูกจับมีขนาดเล็กในระดับไมโครสเกล โดยวัตถุที่ถูกจับจะมีความบอบบาง เพราะฉะนั้นถ้าชิ้นงานที่ไปจับมีความแข็งมากก็จะส่งผลให้วัตถุนั้นเกิดความเสียหายได้เช่นกัน

5.1 การวัดอุณหภูมิแอกซ์เวเตอร์นิกเกิล

หลักการการทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนคือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์ทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนขึ้นภายในโครงสร้างอันเนื่องมาจากความต้านทานภายในโครงสร้างที่แตกต่างกัน ปัจจัยของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการขยายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในบริเวณโครงสร้างที่มีกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆไหลผ่านแกนเล็กของแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลซึ่งมีความต้านทานสูง และเมื่ออุณหภูมิภายในโครงสร้างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะทำให้โครงสร้างเกิดการขยายจึงส่งผลให้ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัจจัยของอุณหภูมินั้นมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะการทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน ทั้งการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของปลายแกนแอกซ์เวเตอร์ และแรงที่ใช้ในการจับวัตถุเป้าหมายที่ต้องการ

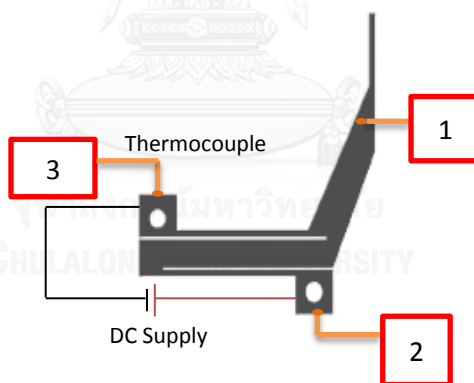
เพราะฉะนั้นถ้าทราบลักษณะอุณหภูมิที่เพิ่มในบริเวณที่จะเกิดความร้อนมากที่สุดและบริเวณที่จะนำไปใช้งาน นั่นคือบริเวณแกนเล็กที่รับกระแสไฟฟ้าเข้ามาและบริเวณปลายแกนแอกซ์เวเตอร์นิกเกิล ตามลำดับ ก็จะสามารถที่จะนำไปเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจสำหรับการเลือกนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมหรืองานวิจัยต่างๆ และนำไปเป็นข้อมูลในการอ้างอิงกับการทดสอบสมรรถนะอื่นๆ

อุปกรณ์ที่ใช้คือ สายเทอโมคัปเปิล ถังน้ำแข็ง เครื่องทำน้ำร้อน เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องโวลต์มิเตอร์ (Agilent U3401A) โดยวิธีการสอบเทียบนี้ (แสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งในการสอบเทียบทางผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบซ้ำที่อุปกรณ์เดิมทั้งหมด 5 ครั้ง และกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับการทำความร้อนขึ้นไปคือ 20 องศาเซลเซียส ขึ้นไปสูงสุดอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วดูค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเครื่องโวลต์มิเตอร์ โดยทำการจดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิทุกๆ 5 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามช่วงที่กำหนดไว้

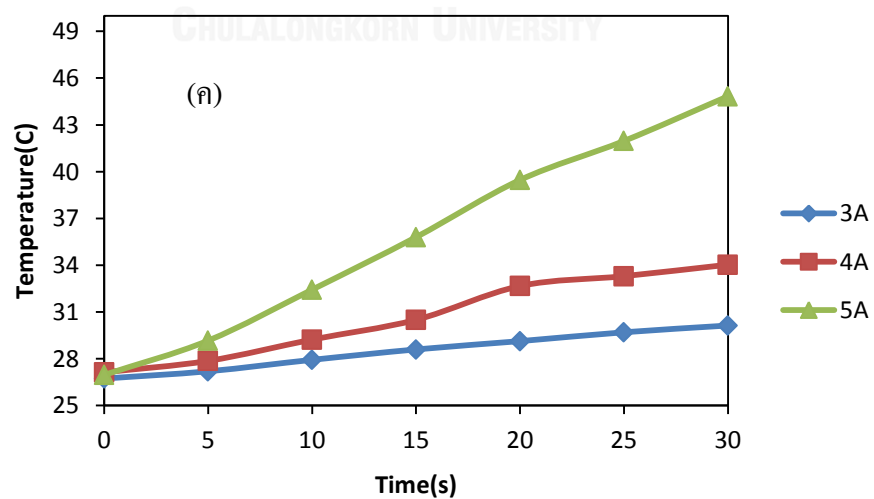
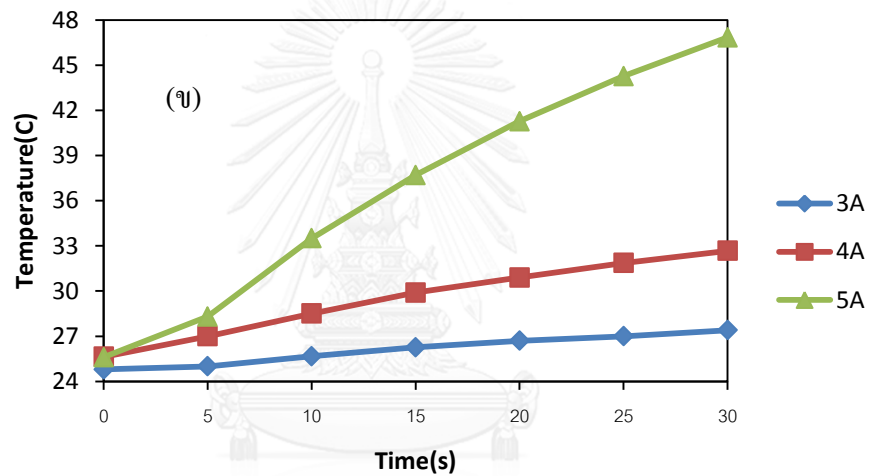
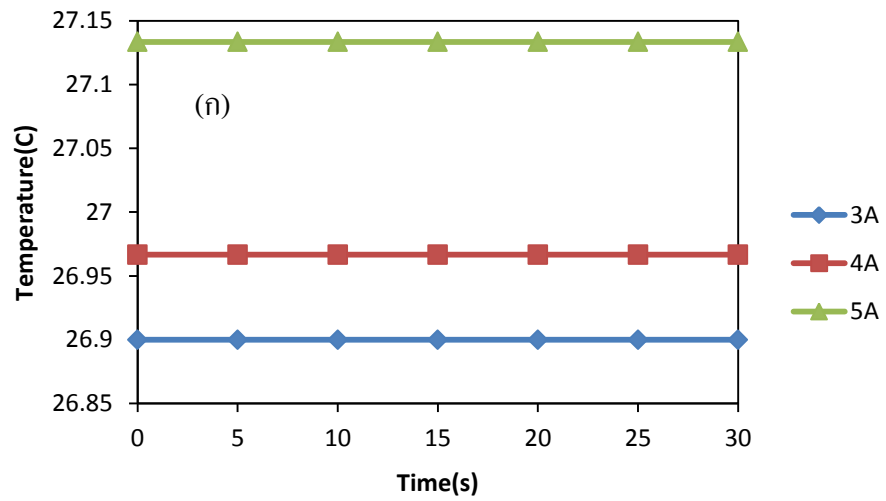
เมื่อทำการสอบเทียบเทอโมคัปเปิลทั้งสามชุดเรียบร้อยแล้วพบว่าความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่าโวลต์ที่ อ่านได้ในเทอโมคัปเปิลทุกๆชิ้นที่ทำการสอบเทียบมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่าเหมือนกันหมดทั้งสามชุดเพราะฉะนั้นทางผู้วิจัยจึงสามารถเลือกกราฟใดก็ได้มาใช้ในการเปรียบเทียบหาอุณหภูมิที่เทอโมคัปเปิลไปสัมผัสในตำแหน่งต่างๆที่ต้องการวัด โดยมีความสัมพันธ์ $Voltage = 0.0421Temp - 0.1175$ ซึ่งความต่างศักย์มีหน่วยเป็น mV ในขณะที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

จากนั้นจึงทำการทดลองวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในผิวแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลโดยเลือกแอคชัวเอเตอร์มาทั้งหมด 3 ตัว แล้วทำการวัดซ้ำทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวที่เป็นสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตอย่างเดี่ยว โดยตำแหน่งที่จะทำการวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลนั้นมีอยู่ 3 จุด บนตัวแอคชัวเอเตอร์ คือ บริเวณแป้นรับกระแสไฟฟ้าทั้งแขนเล็กทั้งสองฝั่ง และที่บริเวณปลายแขนแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลโดยแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแต่ละจุดที่เลือกมาทำการวัดคือจุดที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอคชัวเอเตอร์นิกเกิล โดยจุดที่รับกระแสไฟฟ้าบริเวณแขนเล็กจะเกิดความร้อนสูงทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างผลักดันให้ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเคลื่อนที่ไปข้างหน้าซึ่งตำแหน่งปลายแขนแอคชัวเอเตอร์นี้เองที่เป็นจุดที่จะต้องวัดด้วยว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีเท่าไรเพราะจุดนี้จะเป็นจุดที่ต้องนำไปใช้ หรือไปยึดจับวัตถุเป้าหมายเพื่อเป็นข้อจำกัดในการใช้งานใดๆที่วัตถุเป้าหมายมีความอ่อนไหวต่อความร้อนที่ไปสัมผัส

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดครั้งนี้คือ เทอร์โมมิเตอร์ เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงพาวเวอร์ซัพพลาย (MCP M10-TP3005H) ถังน้ำแข็ง เครื่องโวลต์มิเตอร์ (Agilent U3401A) แทนที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ และเทอร์โมคัปเปิล วิธีการวัด (แสดงในภาคผนวก ข) และผลการวัดอุณหภูมิแสดงเป็นกราฟในรูปภาพที่ 5.2ก-ค



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งที่ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิในแอคชัวเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงแนวโน้มของอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลใช้วัดในแต่ละตำแหน่งภายใน 30 วินาที
(ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3

การวัดอุณหภูมินี้มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ประมาณ ± 1.1 องศาเซลเซียส ผลการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแอกซ์เอเตอร์นิกเกิลเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขนาด 3A, 4A และ 5A ในเวลา 30 วินาที พบช่วงแรกก่อนทำการทดลองอุณหภูมิที่ผิวแอกซ์เอเตอร์อยู่ที่ประมาณ 25-27 องศาเซลเซียส

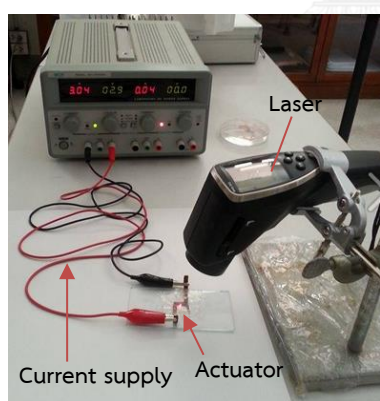
จากรูปที่ 5.2ก พบว่าที่ตำแหน่ง 1 หรือตำแหน่งที่เป็นปลายแขนของแอกซ์เอเตอร์นิกเกิลหรือตำแหน่งที่ใช้ในการยึดจับวัตถุเป้าหมายซึ่งเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขนาด 3A เข้าไปครบ 30 วินาที อุณหภูมิบริเวณนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆด้วยเหตุผลที่ว่า ณ จุดนี้ไม่ได้อยู่ในแนวทางการเดินของกระแสไฟฟ้าอีกทั้งอุณหภูมิที่เกิดภายในโครงสร้างบริเวณทางเดินกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นหรืออาจจะมี การนำความร้อนที่เข้ามาจนทำให้ไม่สามารถกระจายความร้อนไปถึงปลายแขนแอกซ์เอเตอร์ได้ในเวลาไม่เกิน 30 วินาที และเป็นเช่นนี้ในกระแสไฟฟ้า 4A และ 5A เหมือนกัน ซึ่งเป็นสิ่งดีในการที่ อุณหภูมิบริเวณปลายแขนแอกซ์เอเตอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากถ้าอุณหภูมิในบริเวณนี้คงที่ การนำไปใช้งานยึดจับกับวัตถุเป้าหมายที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่อาจส่งผลเสียต่อวัตถุ เป้าหมายได้หรืออาจจะเป็นในกรณีที่น่าไปจับวัตถุในของเหลวทางเคมีหรือทางชีววิทยาที่การ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงมีผลต่อคุณสมบัติของของเหลวที่ทำให้วัตถุที่จะไปจับในของเหลวนั้นเกิดความ เสียหายต่อคุณสมบัติภายในบางอย่างหรืออาจเกิดการเสื่อมสภาพของวัตถุเป้าหมายก็เป็นได้

ผลการวัดในตำแหน่งที่ 2 และ 3 พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปด้วยขนาด 3A, 4A และ 5A อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งสองตำแหน่งมีความใกล้เคียงกันแสดงในรูปที่ 5.2ข-ค และมีค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่ที่ 2 – 5 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของอุณหภูมิที่มีค่ามากกว่า 3 องศาเซลเซียส ขึ้นไปมีเฉพาะในส่วนของการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขนาด 5A เท่านั้นเนื่องจากมีการสะสมความร้อนภายในบริเวณนี้ค่อนข้างสูงซึ่งบางตัวที่นำมาทำการทดลอง อาจจะมีพื้นที่ที่แขนเล็กที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีขนาดที่เล็กกว่าก็จะทำให้บริเวณนี้มีความต้านทาน สูงขึ้นเพราะฉะนั้นเมื่อความต้านทานสูงขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นจึงเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อทดลองที่ กระแสไฟฟ้า 5A ทุกครั้ง ชิ้นงานจะเกิดการไหม้ที่บริเวณตรงกลางแขนเล็กเนื่องจาก แอกซ์เอเตอร์มี ความต้านทานสูงมากจนไม่สามารถทนความร้อนที่มาจากกระแสไฟฟ้า 5A ได้ ทำให้การกระจายตัว ทางความร้อนบริเวณนั้นเกิดขึ้นเร็วมากจะเห็นได้จากกราฟว่าอุณหภูมิก่อนข้างเพิ่มมากกว่าปกติใน ทุกๆ 5 วินาที รวมถึงอุณหภูมิที่วัดได้ก็จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละตัวทุกครั้งที่ทำกรวัด

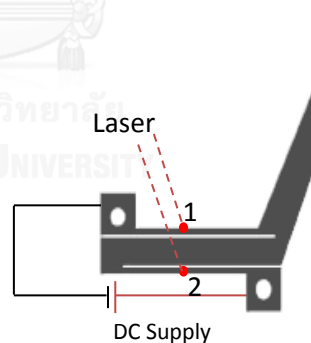
จากการป้อนกระแสไฟฟ้า 5A เข้าไปทดสอบทำให้ทราบว่าจุดที่เกิดความร้อนที่สูงที่สุดคือบริเวณ ตรงกลางของแขนเล็กเนื่องจากเป็นจุดที่เกิดการไหม้จนชิ้นงานเสียหาย สิ่งที่น่าสนใจในประเด็นนี้คือ จุดที่เกิดความร้อนสูงที่สุดตรงกลางแขนเล็กจะส่งผลโดยตรงต่อการขยายตัวของความร้อนทำให้เกิด การขยายของโครงสร้างซึ่งจะเป็นข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจุดนี้เป็น เท่าไร แล้วเกิดความเสียหายอะไรบ้างที่จุดนี้ เพื่อควบคุมให้แอกซ์เอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน

มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น และสามารถนำไปใช้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ โดยวิธีการวัดนี้จะให้แสงอินฟราเรดยิงไปที่ตรงกลางของแขนเล็กทั้งสอง ด้วยกระแสไฟฟ้าทั้ง 3, 4 และ 5 A โดยทำการวัดอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นตรงกลางแขนเล็กหรือที่เวลา 30 วินาที ทั้งหมดสามตัว โดยวิธีการทดลองและตำแหน่งที่ทำการวัดแสดงอยู่ในรูปที่ 5.3ก-ข

ผลการวัดพบว่าที่อุณหภูมิตรงกลางแขนเล็กนั้นมีค่ามากกว่าตำแหน่งที่วัดบริเวณแป้นรับกระแสไฟฟ้า (จุดที่ 2 และ 3) เนื่องจากที่แขนเล็กมีความต้านทานสูงกว่า เมื่อวัดอุณหภูมิเฉลี่ยด้วยแสงอินฟราเรดทั้งสามตัวที่กระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆทั้งสองตำแหน่งแล้วจึงได้ผลแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1-5.2 อุณหภูมิที่วัดได้จะเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุด โดยมีช่วงที่ใกล้เคียงกันทั้งสามตัวรวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ทำกรวัดทั้งสามตัวมีค่าไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส ในสองตำแหน่งที่ทำการวัดและที่กระแสไฟฟ้า 3A กับ 4A โดยที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 5A จะให้อุณหภูมิที่สูงมากอยู่ที่ประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อนที่สูงเกินกว่าที่แอคชูเอเตอร์จะรับได้บริเวณแขนเล็ก และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ทำกรวัดทั้งสามตัวมีค่า 9 องศาเซลเซียส



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมสแกน (ก) วิธีการวัดอุปกรณ์ด้วยแสงอินฟราเรด (ข) ตำแหน่งที่ยิงแสงอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิ

ตารางที่ 5.1 ผลของการวัดอุณหภูมิสูงสุดด้วยแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 1

กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิแกนเล็กตำแหน่ง 1 (C°)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3	46	38	44	42	4
4	59	52	59	56	4
5	94	77	81	84	8

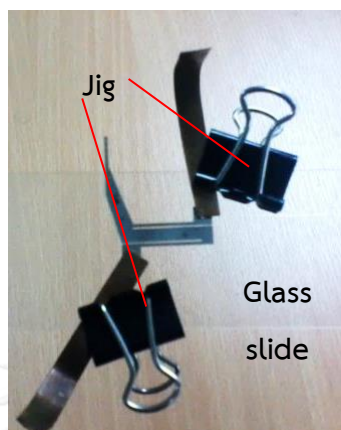
ตารางที่ 5.2 ผลของการวัดอุณหภูมิสูงสุดด้วยแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 2

กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิแกนเล็กตำแหน่ง 2 (C°)				
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3	39	36	40	38	2
4	52	47	54	51	3
5	83	66	81	76	9

5.2 การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

การวัดสมรรถนะการทำงานของแอกซ์เอเตอร์จะพิจารณาจากระยะกระดกหรือระยะที่แอกซ์เอเตอร์เคลื่อนที่ไปได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าภายในโครงสร้างทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อน โดยหลังจากทราบค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่โครงสร้างแอกซ์เอเตอร์แล้วในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตินี้ทำเพื่อวัดสมรรถนะการกระดกที่เกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงที่มีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ทั้ง 4 แบบ และเวลาในการตอบสนองหลังจากเริ่มกดปุ่มป้อนกระแสเข้าไป ซึ่งในการทดสอบจะใช้กระแสไฟฟ้าปล่อยเข้าไปที่แกนขนาดเล็กทั้งสองข้างเพื่อให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนเนื่องจากความต้านทานที่สูงบริเวณแกนเล็กไปผลักดันโครงสร้างให้ขยับส่งผลให้ปลายแกนแอกซ์เอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมากที่จะต้องยึดจับชิ้นงานที่เป็นรับกระแสไฟฟ้าทั้งสองฝั่งของแกนเล็กให้แน่น วิธีการป้อนกระแสไฟฟ้าไปที่แป้นรับกระแสไฟฟ้าทั้งสองนั้นต้องนำแผ่นทองแดงขนาดพอดีกับแป้นรับกระแสที่แกนเล็กมายึดด้วยคลิปหนีบเพื่อความแข็งแรง โดยให้ทองแดงยื่นออกมาพอที่จะให้สายไฟที่ต่อจากเพาเวอร์ซัพพลาย มาจับได้ถนัด เนื่องจากที่แกนเล็กของชิ้นงานมีขนาดความกว้างเพียง 500 μm ซึ่งค่อนข้างเล็กและบางมาก

จึงไม่สามารถที่จะใช้สายไฟจับได้โดยตรงแสดงดังรูปที่ 5.4 สำหรับอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง การตอบสนองเชิงสถิตินั้นได้ (แสดงในภาคผนวก ข) ซึ่งประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์ (Seek US300) เพาเวอร์ซัพพลาย (MCP M10-TP3005H) คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะเพื่อแสดงภาพการเคลื่อนที่ ผ่านกล้องจุลทรรศน์

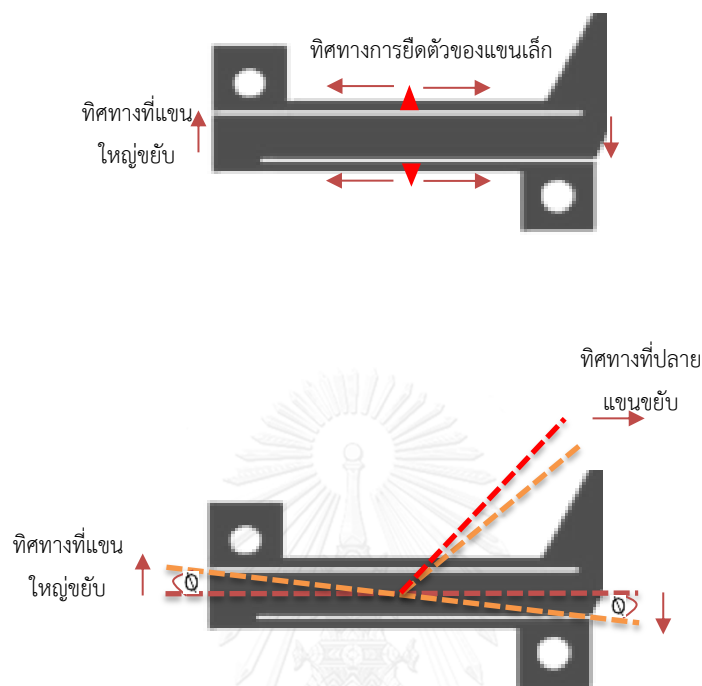


รูปที่ 5.4 วิธีการยึดแอดชิวเอเตอร์สำหรับการทดสอบ

การทดลองนั้นทางผู้วิจัยได้ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในกลไกแอดชิวเอเตอร์โดยตรงด้วย ขนาดกระแสไฟฟ้า 3, 4 และ 5 A ในทุกระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ ทั้ง 4 แบบ ซึ่งจะทำให้การทดลองเป็นจำนวน 4 ตัวต่อระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ โดยทำการทดลองแอดชิวเอเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว และทำการทดลองหนึ่งครั้งต่อหนึ่งตัว ปล่อยกระแสเข้าไป 30 วินาทีเพื่อให้ความร้อนแก่กลไกจนเกิดการขยายตัวทางความร้อนขึ้นระหว่างแกนใหญ่และแกนเล็กส่งผลให้แกนแอดชิวเอเตอร์เกิดการขยับ และปล่อยให้เย็นตัวอีก 30 วินาที เพื่อสังเกตการคืนตัว โดยทำการบันทึกวีดิโอ การขยับของแกนไว้จนครบ 1 นาที เพื่อดูการคืนกลับของการเคลื่อนที่ของแกนแอดชิวเอเตอร์กับเวลา เมื่อเริ่มมีการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปและปิดกระแสไฟฟ้าว่าจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยระยะเท่าไร ในเวลาเท่าใดและคืนกลับตำแหน่งเดิมภายในเวลาที่เร็วที่สุดเท่าไร

การวิเคราะห์เบื้องต้นที่เกี่ยวกับกลไกการเคลื่อนที่ที่ออกแบบมาคือมีบริเวณแกนเล็กทั้งสองฝั่งซึ่งเป็นบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโดยพื้นที่ของแกนเล็กนั้นมีค่าน้อยทำให้เกิดความต้านทานสูง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนของแกนเล็กโดยมีทิศทางการยึดตัวของแกนเล็กตามแนวนอนภายในโครงสร้างตามสมการที่ว่า $L = L_0 + \alpha TL_0$ เมื่อมีการยึดตัวจึงทำให้แกนใหญ่ซึ่งติดอยู่กับแกนเล็กและมีน้ำหนักที่มากกว่าถูกดันให้ขยับตามเข้าไปใกล้แกนเล็กจึงส่งผลให้กลไกแอดชิวเอเตอร์

เกิดการเคลื่อนที่ โดยลักษณะการขยับในเชิงกลแสดงในรูปที่ 5.5 เมื่อมุมในการขยับของแกนใหญ่ ϕ มากขึ้น ระยะขยับกลไกของส่วนปลายก็จะมีค่ามากขึ้นตามเช่นกัน



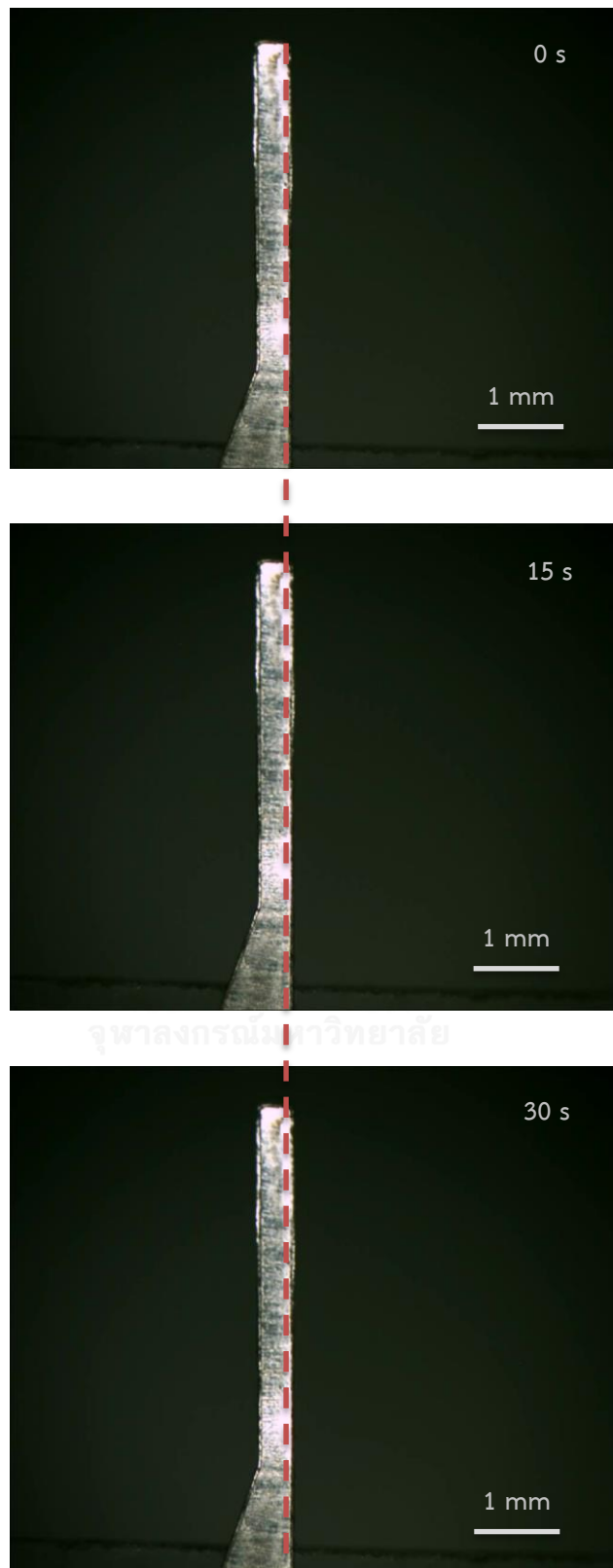
รูปที่ 5.5 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของกลไกเมื่อมีการขยายตัวทางความร้อน

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตรโดยจะทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ทั้ง 4 แบบของกลไก ว่าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่แบบไหนที่สามารถให้ระยะกระดกได้ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายว่าระยะกระดกต้องมากกว่า $100 \mu\text{m}$ ที่กระแสที่น้อยๆ พร้อมทั้งเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ภายในเวลาที่ยังป้อนกระแสอยู่ และชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์ต้องอยู่ในสภาพเดิมไม่มีรอยไหม้จากการสะสมความร้อนหรือการบิดงอใดๆ เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าที่ถูกเลือกมานั้นจะถูกพิจารณาอีกทีหลังจากทำการทดลองเพื่อกำหนดกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทำงานของแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆในอนาคต โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกที่เกิดขึ้นนั้นได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.6-5.8

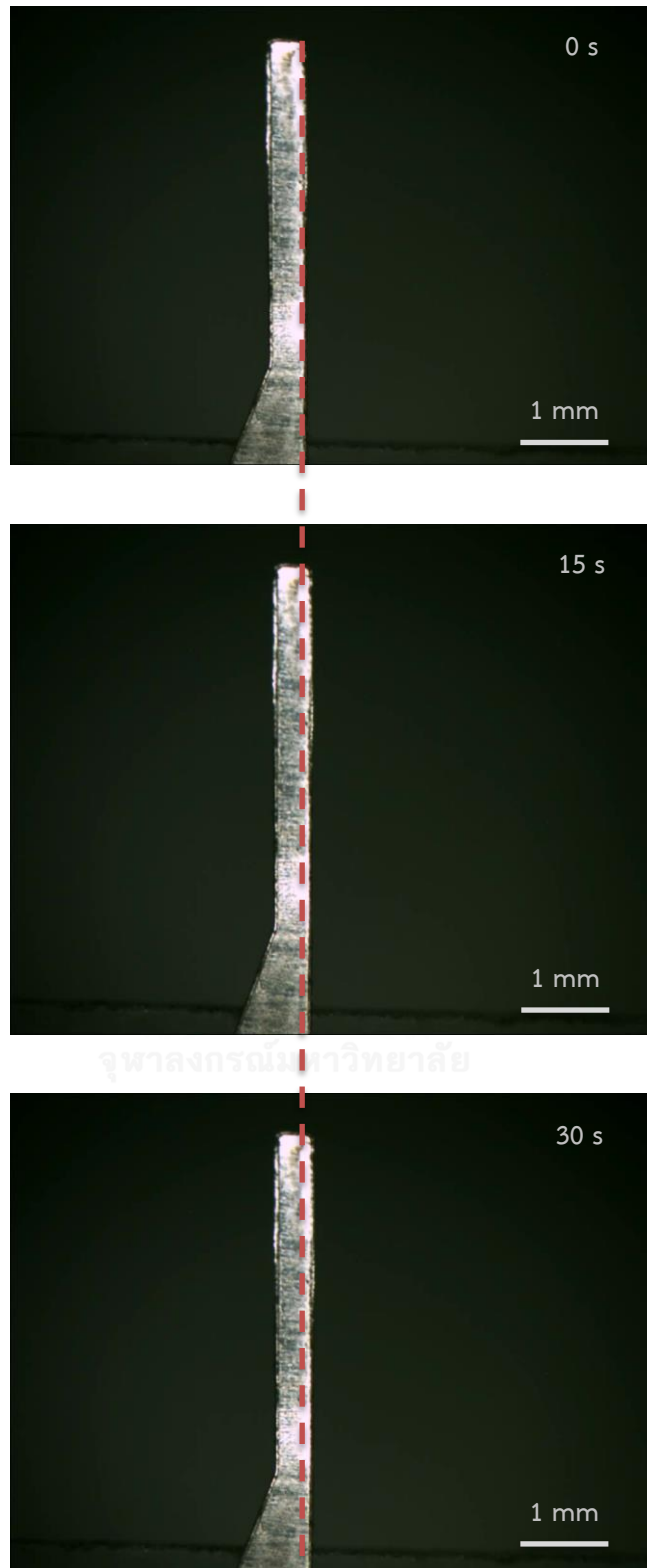
ผลที่ได้จากการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ตัวแอกซ์เวเตอร์ พบว่าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ ขนาด $200 \mu\text{m}$ จะให้ระยะกระดกมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสที่ป้อนเข้าไปเท่าๆกันในตัวแอกซ์เวเตอร์ทุกระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่

และทุกวินาที รองลงมาคือขนาด 100, 300, 400 μm ซึ่งค่าการกระดกที่สูงที่สุดในแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในแอกซ์เอเตอร์ทั้ง 4 แบบ ถูกแสดงไว้ในรูปภาพที่ 5.9 ที่ระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ของ 100 μm เมื่อวัดค่าจากการสร้างพบว่ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 83 μm ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่ใกล้กันมากจนเกือบติดกัน ทำให้การเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เอเตอร์หรือระยะกระดกทำได้ไม่เต็มที่เนื่องจากมีการค้ำกันระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ในเชิงกลไกการเคลื่อนที่ จึงส่งผลให้ที่ระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ของ 200 μm ที่มีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่จากการสร้างอยู่ที่ประมาณ 164 μm มีการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เอเตอร์หรือระยะกระดกที่มากกว่า

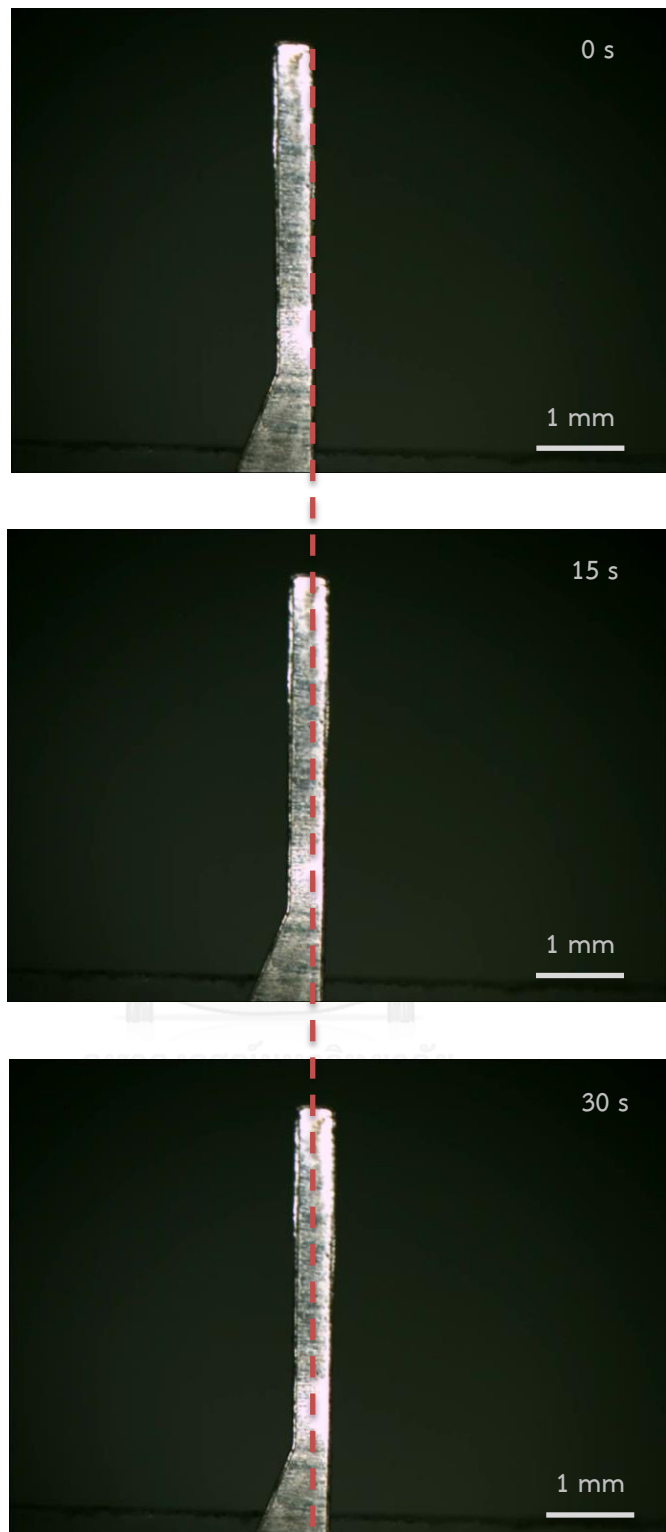
การจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 4A เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที การเคลื่อนที่ของแอกซ์เอเตอร์จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) โดยแกนกลไกสามารถให้ระยะกระดกได้เกิน 100 μm ซึ่งเป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ขนาด 200 μm ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 5A เข้าไปที่ตัวแอกซ์เอเตอร์พบว่าชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นรอยไหม้ที่บริเวณแกนเล็กหรือไม่ก็เกิดการโก่งของแกนเล็กขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.10 และบางส่วนก็จะเกิดควันขึ้นในระหว่างการทดลองทำให้ชิ้นงานเสียรูปบิดน่นแสดงว่าที่กระแสไฟฟ้า 5A ที่ป้อนเข้าไปนั้นสูงเกินกว่าที่แอกซ์เอเตอร์จะรับได้เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่สูงและระบายความร้อนไม่ทันจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำให้อายุการใช้งานของแอกซ์เอเตอร์นั้นลดลงรวมถึงประสิทธิภาพการใช้งานในครั้งต่อไป เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแอกซ์เอเตอร์คือ 3A และ 4A



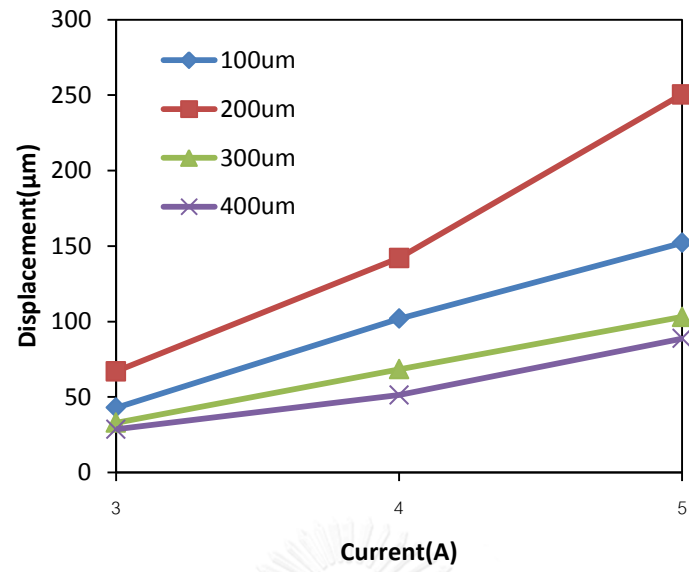
รูปที่ 5.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่กระแสไฟฟ้า 3A



รูปที่ 5.7 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอโนดซ์เอเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสัณฐานที่กระแสไฟฟ้า 4A



รูปที่ 5.8 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแอคซ์เวเตอร์เมื่อทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่กระแสไฟฟ้า 5A



รูปที่ 5.9 กราฟแนวโน้มการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์นิกเกิลสูงสุดในแต่ละขนาด gap



รูปที่ 5.10 ลักษณะรอยไหม้ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า 5A

5.3 การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต

การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตสำหรับงานวิจัยนี้ทำเพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ของแอกซ์ฮูเอเตอร์เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีรูปร่างคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ต่างๆที่มีการเคลื่อนที่ลักษณะใดใน 1 วงรอบ ด้วยการวัดระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์หรือระยะกระดก เหมือนกับการวัดระยะในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตแต่เนื่องจากการวัดในลักษณะนี้จะเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปิดเปิดตามความถี่ที่ป้อนเข้าไปทำให้ที่ปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอยู่ตลอดเวลา โดยกล้องที่ใช้ในการถ่ายวิดีโอเพื่อทำการดึงภาพออกมาเป็นแต่ละเฟรมนั้นเป็นกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งไม่ใช่กล้องที่สามารถวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุไปมาได้อย่างแม่นยำจึงไม่สามารถบอกค่าแอมพลิจูดสูงสุดของการวัดในเชิงจลน์ได้ ซึ่งวัดได้แค่เพียงระยะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นใน 1 วงรอบ ด้วยรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ต่างๆเพื่อให้เห็นลักษณะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นของแอกซ์ฮูเอเตอร์ในรูปแบบนี้และหลักการนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตในงานวิจัยนี้ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์ (Seek US300) ใช้เพื่อบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอกซ์ฮูเอเตอร์ ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ (Rigol DG2021A) ใช้เพื่อสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและปรับค่าความถี่ ออสซิลโลสโคป (Agilent DSO3062A) ใช้เพื่อตรวจสอบสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ป้อนเข้าไปที่ตัวขยายสัญญาณ เพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์ (Kepco Model BOP 100-4M) ใช้เพื่อขยายสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ให้มีกำลังไฟฟ้าไปขับตัวแอกซ์ฮูเอเตอร์ให้ขยับ มัลติมิเตอร์ (Agilent U1251A) เพื่อใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนจากเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์ไปเข้าแอกซ์ฮูเอเตอร์ และวิธีการทดสอบได้ (แสดงในภาคผนวก ข)

การทดลองการตอบสนองเชิงพลวัตนั้นจะใช้สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กระแสไฟฟ้า 4A ที่ความถี่ 0.1, 0.5, 1, 5 Hz ในการทดลองการตอบสนองเชิงพลวัตในงานวิจัยนี้จะใช้แอกซ์ฮูเอเตอร์ 2 ตัว ทำการวัด 1 ครั้งต่อหนึ่งตัว โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ที่ 200 μm เท่านั้น เพราะในการทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตสำหรับงานวิจัยนี้ต้องการดูเพียงแค่ลักษณะการเคลื่อนที่ในวงรอบของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงสุดในที่นี้คือระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนของแอกซ์ฮูเอเตอร์หรือระยะกระดกสูงสุดของแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่อยู่ที่ 200 μm มาทำการทดลองดูโดยรวมเท่านั้นให้ทราบเพียงแนวโน้มที่เกิดขึ้นสำหรับการป้อนฟังก์ชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ความถี่ต่างๆโดยการเลือกใช้กระแสไฟฟ้า 4A เนื่องจากในการทดลองการตอบสนองเชิงสถิตพบว่าที่กระแสไฟฟ้า 5A นั้นตัวชิ้นงานแอกซ์ฮูเอเตอร์เกิดรอยไหม้และเสียหายขึ้นส่งผลต่อการนำไปใช้งานในครั้งต่อไป

ในส่วนของกระแสไฟฟ้าขนาด 3A นั้นจะให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนของแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกไม่มากซึ่งอาจจะทำการวัดได้ไม่ชัดเจน ด้วยเหตุผลนี้ทางผู้วิจัยจึงไม่เลือกมาพิจารณา เพราะสุดท้ายแล้วแนวโน้มการเคลื่อนของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่เกิดขึ้นในกระแสใดๆก็ต้องไปในทิศทางเดียวกัน ในการวัดระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกของการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์จะใช้หลักการเดียวกับการวัดระยะเวลาการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตคือการใช้กล้องจุลทรรศน์ปรับโฟมดเป็นการถ่ายภาพวิดีโอ เนื่องจากเมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ที่สูงขึ้นความเร็วในการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาบนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวิดีโอการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา จากนั้นนำวิดีโอที่ถ่ายออกมาได้แปลงออกมาเป็นเฟรมภาพทั้งหมดซึ่งเมื่อทำการแปลงเป็นเฟรมภาพออกมาพบว่ามีความถี่ที่ 8 เฟรมต่อวินาที โดยจะนำการเคลื่อนที่ไปกลับครบ 1 วงรอบมาทำการวัดระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดก ดังแสดงในรูปที่ 5.11ก-ฉ สุดท้ายจึงนำค่ามาพลอตกราฟดูลักษณะการเคลื่อนที่ทุกความถี่ที่ทำการทดลองใน 1 วงรอบเท่านั้น

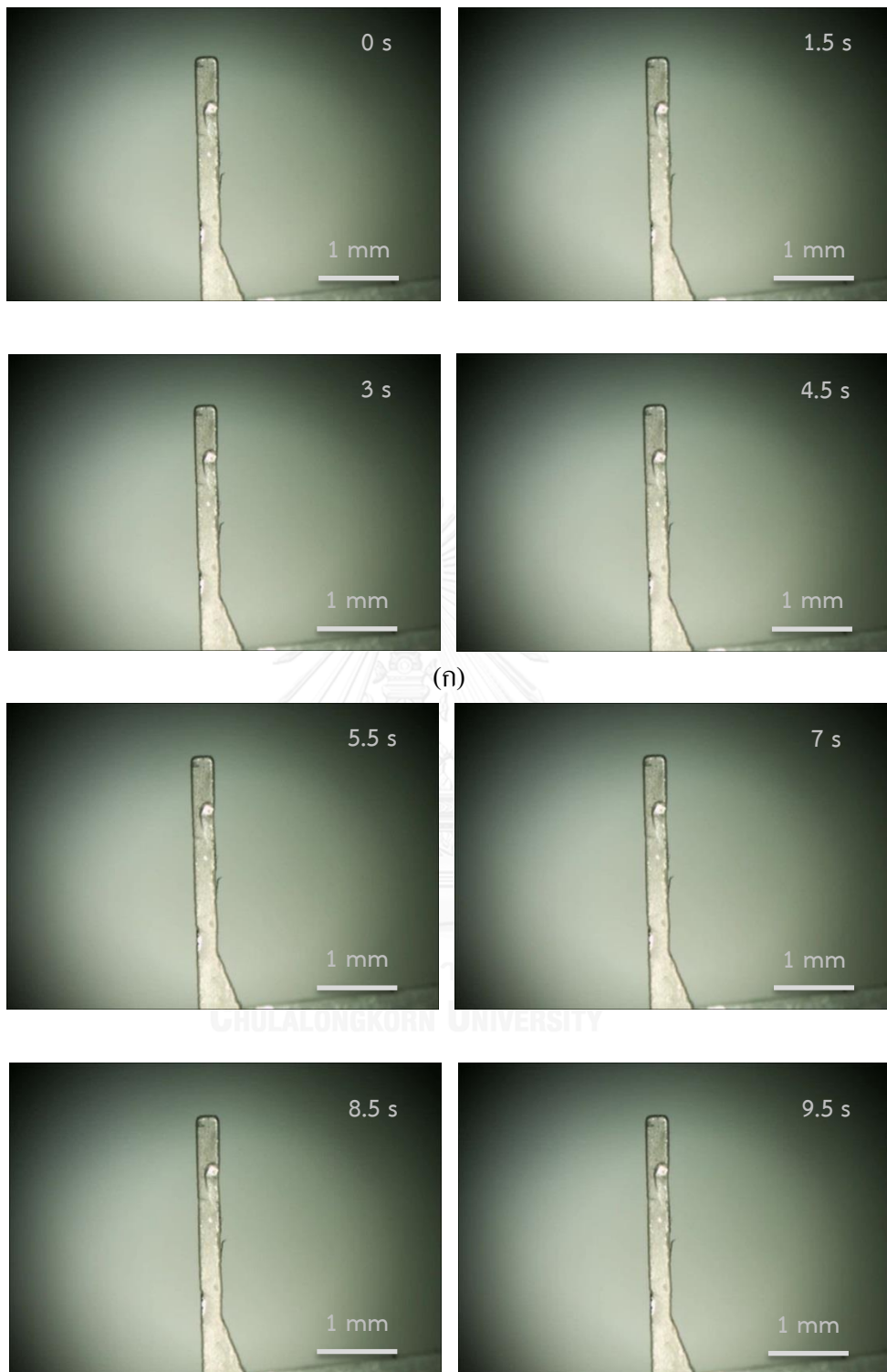
ผลการทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตนี้มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตร โดยที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A ด้วยสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมพบว่าเมื่อทดลองที่ความถี่เริ่มต้น 0.1 Hz การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ จะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอย่างช้าๆ โดยทุกๆ 5 วินาที ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และพบว่าที่ความถี่ต่างๆจะเกิดระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุด เนื่องจากที่ความถี่ต่างๆช่วงเวลาในการป้อนกระแสไฟฟ้าจะนานขึ้นทำให้เกิดความร้อนสะสมในตัวแอกซ์ฮิวเอเตอร์มากขึ้นตามส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในตัวแอกซ์ฮิวเอเตอร์ให้เคลื่อนที่ได้มากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อทดลองที่ความถี่เพิ่มขึ้น 0.5, 1, 5 Hz ตามลำดับ ก็พบว่าระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกก็จะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากที่ความถี่ 0.5 Hz จะมีช่วงเวลาเปิดปิดกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1 วินาที และที่ความถี่ 1 Hz จะมีช่วงเวลาเปิดปิดกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.5 วินาที และที่ความถี่ 5 Hz จะมีช่วงเวลาเปิดปิดกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.1 วินาที เวลาในการป้อนกระแสไฟฟ้าน้อยลงก็ย่อมทำให้ความร้อนที่เกิดภายในตัวแอกซ์ฮิวเอเตอร์น้อยลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกลดลงตามลงไปดังแสดงในรูปที่ 5.11-5.13ก

กราฟในรูปที่ 5.14ก จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความถี่ที่น้อยที่สุดในการทดลองนี้ 0.1 Hz ชิ้นงานสองตัวที่เลือกมาทดลองนั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองอยู่ที่ $\pm 15 \mu\text{m}$ พบว่าทั้งสองชิ้นที่นำมาทดลองนั้นมีระยะที่ใกล้เคียงกันโดยที่เส้นสีแดงจะมีระยะที่มากที่สุดที่วัดได้จากชุดการทดลองนี้คือ $81 \mu\text{m}$ ส่วนเส้นสีฟ้าจะมีระยะอยู่ที่ $91 \mu\text{m}$ ในส่วนด้านบนของกราฟที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดขึ้นไปซึ่งในความเป็นจริงแล้วแนวโน้มอาจจะเป็นกราฟที่ค่อยๆชันขึ้นไปแบบเส้นตรงแต่เนื่องมาจากลักษณะการวัดที่ใช้เฟรมภาพดึงออกมาจากวิดีโอทำให้ไม่

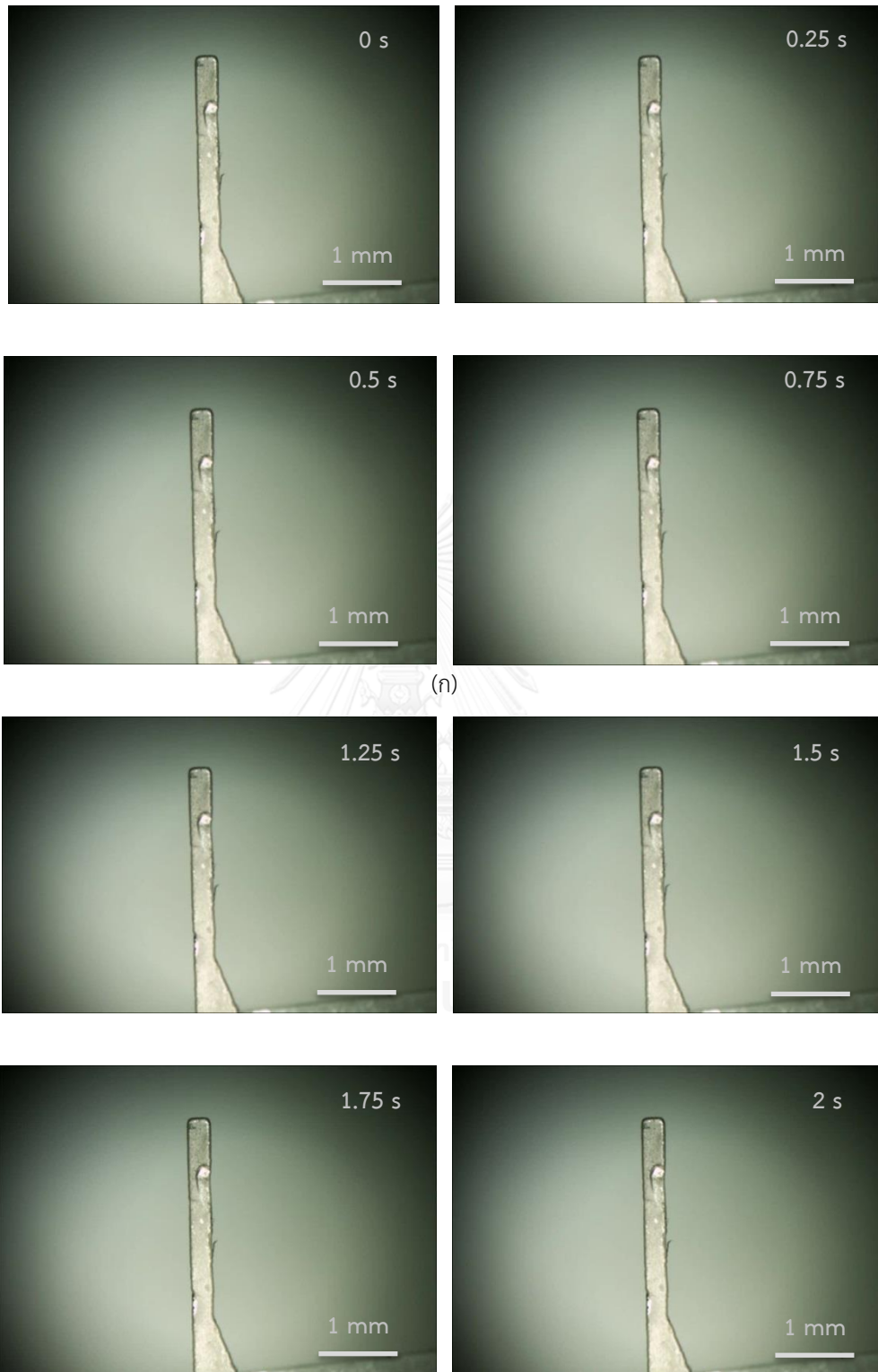
สามารถเห็นรายละเอียดเล็กๆน้อยๆของการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ได้ครบทุกมุมมองการเคลื่อนไหว ในส่วนเส้นขาลงคือช่วงที่หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าก็จะเห็นการเคลื่อนตัวกลับมามีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งสองชิ้นงานจนกราฟลงมาอยู่ขนานบนแกน X คือไม่มีการเคลื่อนที่ใดๆหรือไม่มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนภายในโครงสร้างแอกซ์ฮิวเอเตอร์

รูปที่ 5.14ข จะเพิ่มความถี่เป็น 0.5 Hz โดยเส้นสีแดงมีระยะมากที่สุดอยู่ที่ 72 μm ส่วนเส้นสีฟ้ามีระยะอยู่ที่ 85 μm มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองอยู่ที่ $\pm 12 \mu\text{m}$ ลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในวงรอบได้แตกต่างจาก 0.1 Hz อย่างสิ้นเชิง ลักษณะจะเป็นลูกคลื่นคล้ายๆกับรูปคลื่นไซน์เนื่องจากเวลาการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าลดลงความเร็วในการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์จึงเพิ่มมากขึ้นทำให้ไม่เห็นจังหวะที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์จะเคลื่อนที่แบบคงที่แล้วไต่ระดับเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจนเห็นเพียงแต่จุดที่เริ่มจะเคลื่อนที่คงที่แต่ก็ถูกปิดกระแสไฟฟ้าก่อน และระยะการเคลื่อนที่ในช่วงการป้อนกระแสไฟฟ้าก็น้อยกว่าความถี่ 0.1 Hz

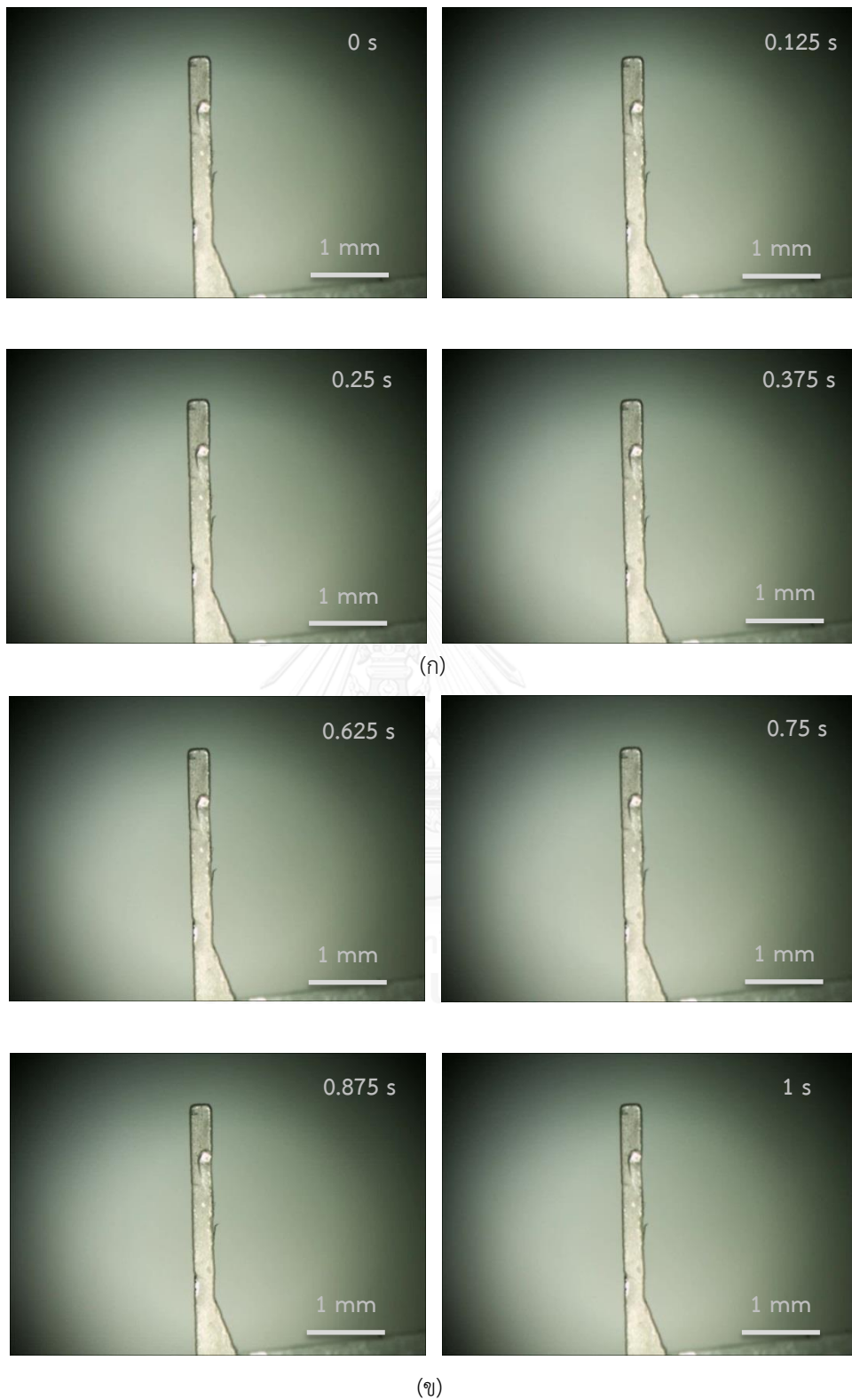
รูปที่ 5.14ค จะเพิ่มความถี่เป็น 1 Hz ลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นั้นจะคล้ายๆกับความถี่ 0.5 Hz แต่เวลาในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าน้อยลง ความเร็วในการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์มากเพิ่มขึ้นทำให้ไม่เห็นจุดที่จะเข้าสู่การเคลื่อนที่แบบคงตัวและระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ก็น้อยกว่า 0.5 Hz ซึ่งทั้งสองชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบก็มีการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละวงรอบการเคลื่อนที่โดยเส้นสีฟ้าเคลื่อนที่ได้มากที่สุดอยู่ที่ 60 μm และเส้นสีแดงเคลื่อนที่ได้มากที่สุดอยู่ที่ 55 μm มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองอยู่ที่ $\pm 7 \mu\text{m}$ จากนั้นทางผู้วิจัยก็ได้ทำการทดลองที่ความถี่สุดท้ายคือ 5 Hz ซึ่งพบว่ามีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่รวดเร็วมากถ้าไม่สังเกตจากวิดีโอที่ถ่ายออกมาจะเห็นได้ว่าปลายแขนของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นั้นแทบไม่ขยับ ซึ่งการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลักษณะนี้ทำให้ยากต่อการวัดค่าระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกในช่วงเวลาเพียงแค่ 0.2 วินาที ในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีกราฟที่แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของความถี่ 5 Hz



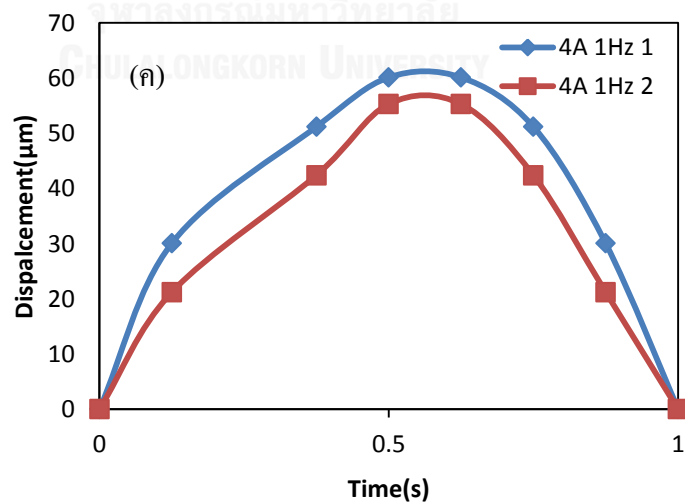
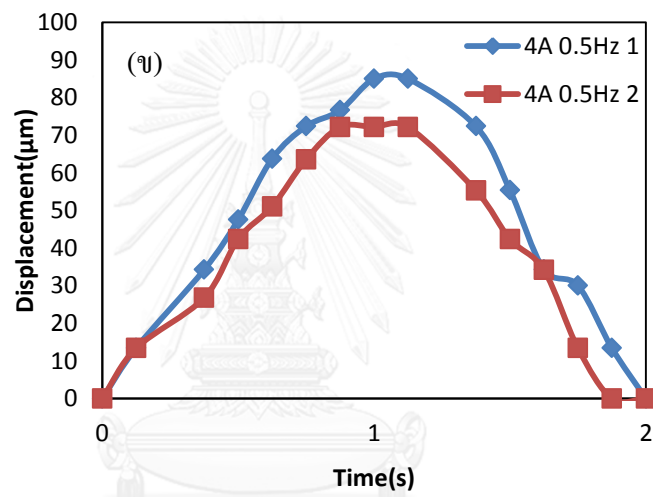
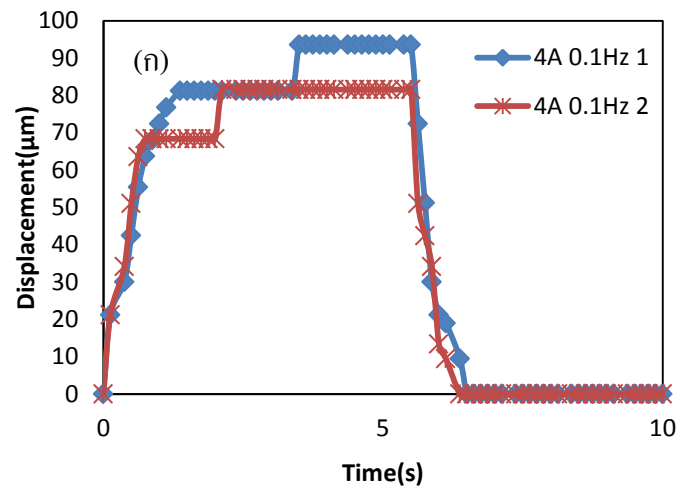
รูปที่ 5.11ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 0.1 Hz (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 5 วินาที (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 5 วินาที



รูปที่ 5.12ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 0.5 Hz
 (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 1 วินาที (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 1 วินาที



รูปที่ 5.13ก-ข แสดงการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคัวเอเตอร์ที่กระแสไฟฟ้า 4A ความถี่ 1 Hz
 (ก) ช่วงเปิดกระแสไฟฟ้า 0.5 วินาที, (ข) ช่วงปิดกระแสไฟฟ้า 0.5 วินาที



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ใน 1 วนรอบทั้งสองตัวตัวอย่างที่กระแสไฟฟ้า 4A
(ก) 0.1 Hz (ข) 0.5 Hz (ค) 1 Hz

5.4 การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์เอเตอร์

การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์เอเตอร์ในงานวิจัยนี้ทำเพื่อดูคุณลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อแอกซ์เอเตอร์ถูกป้อนกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปแล้วเกิดการขยายตัวทางความร้อนเนื่องจากความต้านทานที่แตกต่างภายในโครงสร้างแอกซ์เอเตอร์ทำให้ปลายแขนแอกซ์เอเตอร์เกิดการขยับไปข้างหน้าเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆอาทิเช่น การผลัดต้นวัตถุขนาดเล็ก การหยิบจับวัตถุขนาดเล็กในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรือการหยิบจับเซลล์ทางชีววิทยาที่มีสเกลระดับไมโครเมตร รวมถึงใช้ในไลน์การผลิตชิ้นงานต่อเนื่องที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น โดยปัจจัยสำคัญที่จะช่วยในการตัดสินใจที่จะนำแอกซ์เอเตอร์ในรูปแบบนี้เพื่อเลือกนำไปใช้งานแบบไหนคือ ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์เอเตอร์หรือระยะเวลากระดกที่มากที่สุดซึ่งได้ทำการทดลองไปก่อนหน้านี้แล้วด้วยวิธีการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ ส่วนแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอกซ์เอเตอร์บริเวณที่จะไปสัมผัสกับวัตถุหรือยึดจับซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อนี้

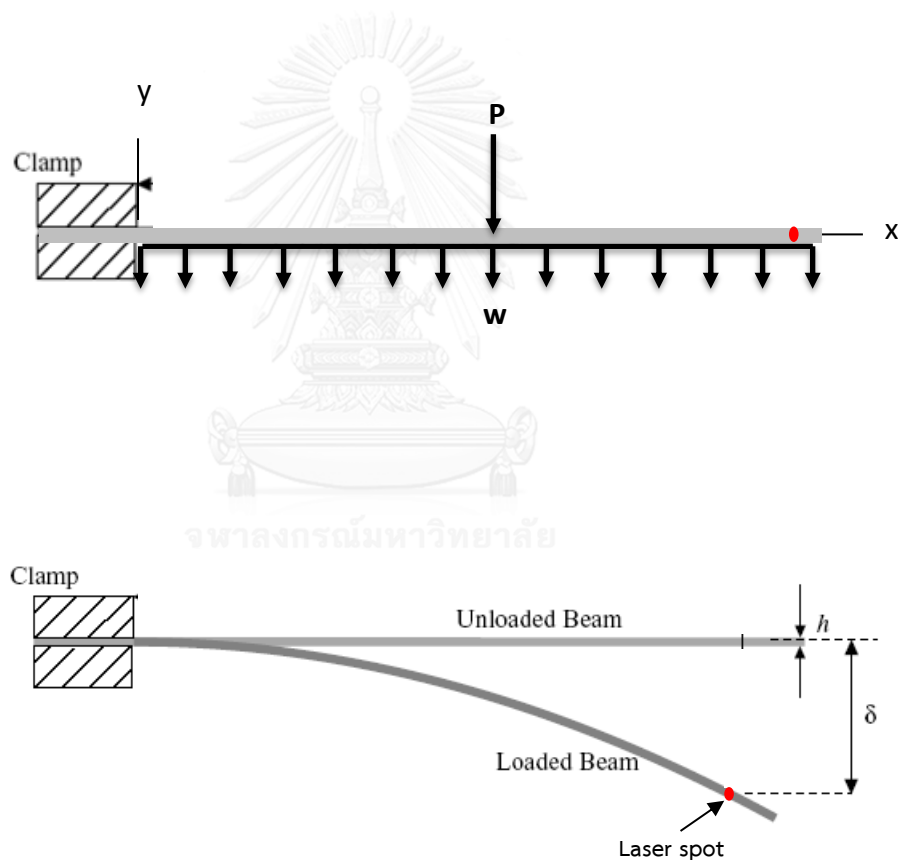
การนำไปประยุกต์ใช้งานแบบยึดจับวัตถุชิ้นหนึ่งหน่วยแรงที่วัดได้จะมีความสำคัญมากในการเลือกไปใช้กับงานใดๆให้เหมาะสม เนื่องจากถ้าชิ้นงานงานที่จะนำไปจับมีความบอบบางมากแล้วชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ที่ทำมานั้นมีแรงที่มากเกินไปกว่าที่วัตถุชิ้นนั้นจะรับได้ก็อาจจะสร้างความเสียหายต่อวัตถุที่ไปจับซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องพึงระวังเป็นอย่างมาก หรือในกรณีที่วัตถุชิ้นนั้นมีความแข็งมากอีกทั้งชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์ก็ให้แรงในการจับที่สูงมากก็อาจจะส่งผลให้ชิ้นงานแอกซ์เอเตอร์แตกหักได้ เพราะฉะนั้นหน่วยของแรงที่วัดได้จะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดลักษณะงานที่จะถูกนำไปใช้

การวัดขนาดแรงในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีการโก่งตัวของคาน (Beam Deflection) มาช่วยในการคำนวณหาขนาดแรงโดยวัดระยะเวลาเคลื่อนที่ของคานที่ถูกแรงกระทำตรงกลางคานให้ขยับโดยมีน้ำหนักคานเป็นแรงกระจายอยู่ทั่วทั้งคาน จากนั้นนำระยะเวลาเคลื่อนที่ของคานไปเข้าสู่สูตรการคำนวณความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนที่ของคาน รวมถึงต้องทราบค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) สำหรับคานนิกเกิลที่ถูกกระทำด้วย

5.4.1 การหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับคานนิกเกิลโดยใช้ทฤษฎีการโก่งตัวของคาน

การหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับคานนิกเกิลในการทดลองนี้จะใช้ทฤษฎีการโก่งตัวของคาน ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยใช้สมการ 5.1 ในการคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง ซึ่งค่ามอดูลัสของยัง (E) เป็นตัวแปรที่ต้องการทราบ และตัวแปรที่จะต้องทำการเปลี่ยนแปลงเพื่อทำการหาค่ามอดูลัสของยังมีอยู่สองตัวแปรคือ แรงภายนอกที่มากระทำ (F) และระยะเวลาเคลื่อนที่ของคานเมื่อถูกแรงภายนอกมากระทำ (δ) การหามอดูลัสของยังนี้จะไม่ใช่แอกซ์เอเตอร์ดันคานนิกเกิลเนื่องจากไม่ทราบแรงที่กระทำ ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้แรงที่ทราบค่าที่แท้จริงและสามารถเพิ่มแรงขึ้นได้เรื่อยๆอย่างคงที่ทาง

ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะใช้แรงภายนอกเป็นแบบถ่วงน้ำหนักสำหรับการทดลองหาค่ามอดูลัสของยังของคานานิกเกิล ซึ่งแรงถ่วงน้ำหนักในการทดลองนี้คือ ก้อนดินน้ำมัน และจานถ่วงมวลดินน้ำมันสำหรับแขวนไว้ที่คาน โดยที่มวลดินน้ำมันมีน้ำหนักก้อนละ 1 กรัม และจานถ่วงมวลดินน้ำมันสำหรับแขวนมีน้ำหนัก 1.3 กรัม เมื่อเริ่มถ่วงครั้งแรกจะใช้จานถ่วงกับมวลดินน้ำมัน 1 ก้อน รวมน้ำหนักเป็น 2.3 กรัม แขวนไว้ตรงกลางคาน เพราะฉะนั้นจะมีแรงที่กระทำกับคานอยู่สองแรงคือ แรงภายนอกที่ใช้การถ่วงดินน้ำมัน (F) และน้ำหนักคานที่กำหนดให้เป็นแบบแรงกระจายทั่วทั้งคาน (w) จากนั้นวัฏระยะการเคลื่อนที่ของคานานิกเกิลด้วยดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์โดยใช้ความยาวของคานเป็นระยะจากตำแหน่งที่ยึดที่ผนังกับตำแหน่งที่ยิงเลเซอร์ด้วยดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์เพื่อวัฏระยะการเคลื่อนที่ของคานดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงลักษณะการโก่งตัวของคาน

$$\delta_{max} = \frac{7FL^3}{75EI} + \frac{wL^4}{8EI} \quad (5.1)$$

δ = ระยะการโก่งตัวของคานเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ (Cantilever deflection), (m)

F = แรงภายนอกที่กระทำกับคาน ณ จุดใดๆ (External force), (N)

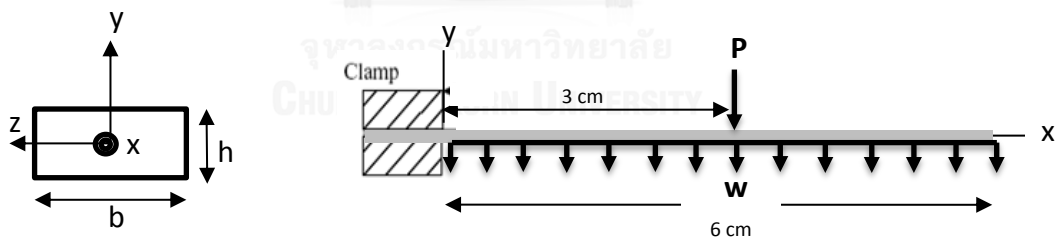
w = น้ำหนักคานแบบกระจายตัว (Distributed weight), (N/m)

L = ความยาวของคานที่วัดจากผนังที่ยึดคานกับตำแหน่งที่ยิงเลเซอร์ (Length), (m)

E = ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus), (Pa)

I = โมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทิน (The beam's moment of inertia computed about the neutral axis), (m^4)

โดยใช้โมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทินแกน X ซึ่งเป็นส่วนของภาคตัดขวางของตัวคานที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ 5.16 และสมการที่ 5.2 โดยขนาดของคานนิกเกิลได้แสดงในรูปที่ 5.18 โดยความยาวของคานมีขนาด 6 เซนติเมตร ซึ่งการคำนวณในทฤษฎีจะใช้ตำแหน่งปลายคานวัดระยะที่คานขยับลงมา แต่เนื่องจากบริเวณที่ลำแสงยิงลงมาเพื่อทำการวัดนั้นขยับเข้ามาจากปลายคาน 3 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้ความยาวเป็น 5.7 เซนติเมตรในการคำนวณหาแรงที่กดลงมา จากนั้นจึงนำสมการ 4.2 มาคำนวณหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทินแกน X ซึ่งมีค่า $2.1 \times 10^{-15} m^4$

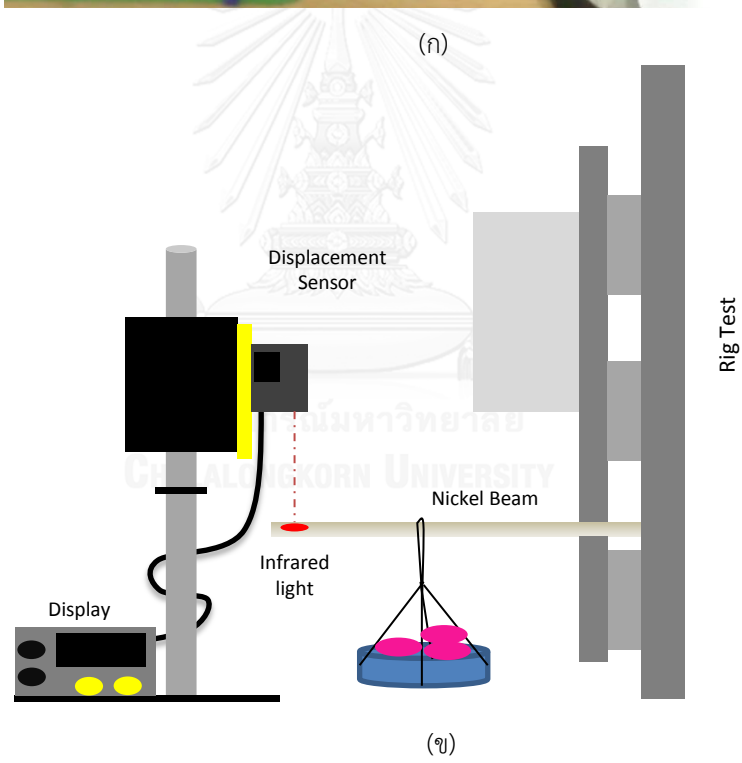
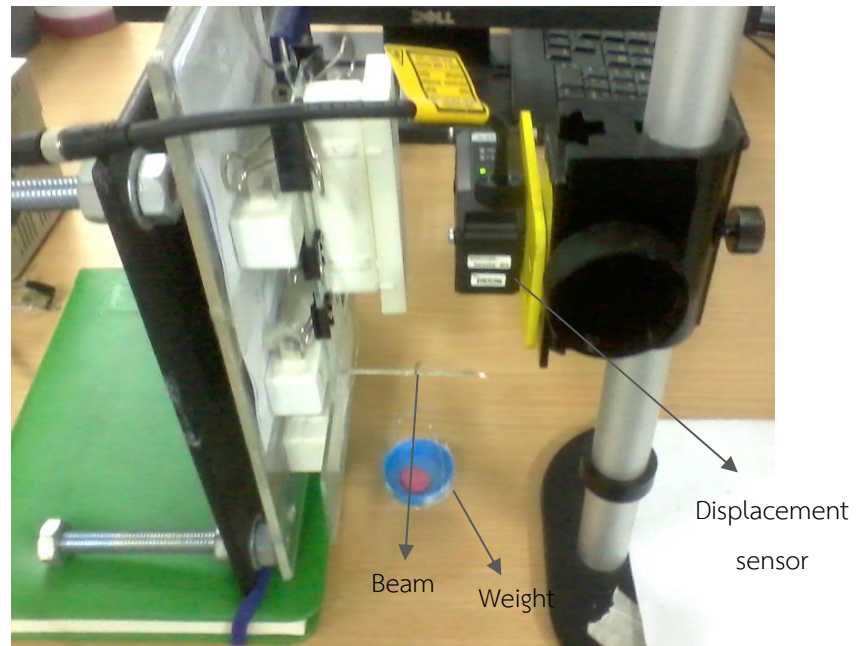


รูปที่ 5.16 ตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทินแกน X

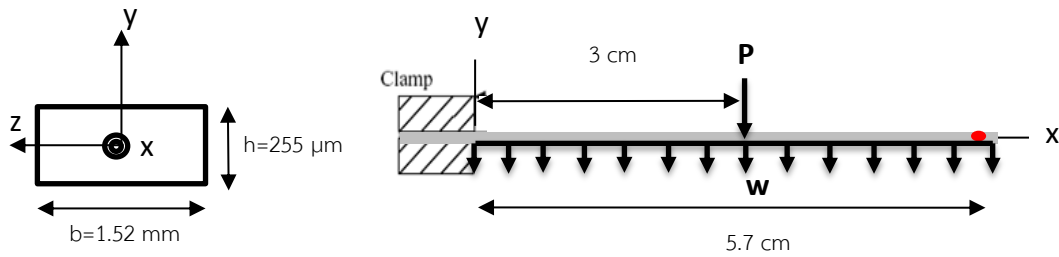
$$I = I_x = \frac{1}{12}bh^3 \quad (5.2)$$

b = ระยะตามแนวกว้าง (Width), เมตร (m)

h = ความหนาของคาน (Thickness), เมตร (m)



รูปที่ 5.17 วิธีการทดสอบและการเตรียมอุปกรณ์ (ก) ภาพจริงในการทดสอบ, (ข) ไดอะแกรมการทดสอบ



รูปที่ 5.18 ขนาดของคานานิกเกิลที่จะใช้ทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเตอร์

ด้วยขนาดของคานาที่แสดงนี้ทำให้ได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณรอบแกนสะเทินแกน X เท่ากับ

$$I = I_x = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} \times 1.52 \times 10^{-3} \times (2.55 \times 10^{-4})^3 = 2.1 \times 10^{-15} m^4$$

เพราะฉะนั้นค่าที่ทราบทั้งหมดมีดังนี้

$$L = 0.057 \text{ m}, I_x = 2.1 \times 10^{-15} m^4, F = (m/1000 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) = 9.81 \times 10^{-3} \times (m) \text{ N}$$

$$W = 0.033 \text{ N/m}$$

แทนค่าในสมการที่ 5.1 จะได้เป็นสมการที่ 5.3 ในการหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับคานานิกเกิลนี้

$$E = \frac{7 \times 9.81 \times 10^{-3} \times m \times (5.7 \times 10^{-2})^3}{75 \times \delta \times (2.1 \times 10^{-15})} + \frac{0.033 \times (5.7 \times 10^{-2})^4}{8 \times \delta \times (2.1 \times 10^{-15})} \quad (5.3)$$

จากรูป 5.17ก-ข เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมอดูลัสของยังสำหรับคานานิกเกิลนี้ คือ ดิสเพลสเมนต์ เซนเซอร์ (Keyence IL-065 cmos laser sensor) และแทนทดสอบ โดยการถ่วงน้ำหนักที่ตรงกลาง คานานิกเกิลจะค่อยๆ ถ่วงมวลดินน้ำมันบนจานแล้วเพิ่มขึ้นไปที่ละก้อนหรือครั้งละ 1 กรัมจนครบทั้ง 5 ก้อน เพราะฉะนั้นน้ำหนักทั้งหมดที่ใช้ถ่วงในการทดสอบมอดูลัสของยังคือ 2.3, 3.3, 4.3, 5.3 และ 6.3 กรัม ดูระยะการเคลื่อนที่ของคานานิกเกิลทุกๆ มวลดินน้ำมันที่ถ่วงไปที่หน้าจอดีสเพลสเมนต์ เซนเซอร์เพื่อใช้คำนวณหาค่ามอดูลัสของยังในทุกๆ น้ำหนักแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยทั้ง 5 น้ำหนัก โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำไปแทนค่าในสมการที่ 5.3 ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยมอดูลัสของยังของ คานานิกเกิลที่ใช้ในการทดลองนี้ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของยังของคานนิกเกิล

ครั้งที่ทำการทดลอง	น้ำหนักงานถ่วงดินน้ำมัน + น้ำหนักของดินน้ำมัน (g)					
	1.3+1=2.3	1.3+2=3.3	1.3+3=4.3	1.3+4=5.3	1.3+5=6.3	เฉลี่ย
	ระยะการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิล(mm)					
1	0.87	1.23	1.61	2	2.37	-
ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)	216	218	217	215	216	216
2	0.84	1.21	1.54	1.96	2.33	-
ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)	224	222	227	219	219	222
3	0.83	1.22	1.53	1.9	2.3	-
ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)	226	220	228	226	222	225
ค่ามอดูลัสของยังเฉลี่ย (GPa)						221
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (GPa)						4.6

5.4.2 การวัดแรงที่ปลายแขนนิกเกิลแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่กระทำต่อคานนิกเกิล

การทดสอบแรงที่ปลายแขนนิกเกิลแอกซ์ฮิวเอเตอร์จะต้องสร้างแทนที่ทำการทดสอบก่อน เพื่อใช้ยึดจับชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.19 โดยหลักการในการยึดจับชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์และวิธีการป้อนกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้หลักการเหมือนกับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติคือ ใช้แผ่นทองแดงขนาดเล็กต่อออกมาจากแป้นรับกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์แล้วจึงเอาสายไฟที่ต่อมาจากเพาเวอร์ซัพพลายไปคียบที่ทองแดงทั้งสองเพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปแต่ในการทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์นั้นจะวางแตกต่างกับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติตรงที่การทดสอบ

แรงจะวางตัวให้แอกซ์ฮิวเอเตอร์อยู่ในแนวตั้งจุดประสงค์คือเพื่อให้ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าที่ขนาดต่างๆแล้วเกิดการขยายตัวทางความร้อนทำให้ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์เคลื่อนตัวลงมากไปที่คานานิกเกิลที่ติดอยู่กับแท่นทดสอบ โดยวิธีการทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้ชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่เท่ากับ 200 ไมโครเมตร เท่านั้น เนื่องจากการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติพบว่าแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ เท่ากับ 200 ไมโครเมตร จะให้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุดทางผู้วิจัยจึงสุ่มเลือกมาทำการทดสอบเป็นจำนวน 3 ตัว และทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อดูคุณลักษณะของแรงและหน่วยของแรงที่เกิดขึ้นในกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างออกไปโดยในการทดสอบแรงนี้จะเลือกใช้ขนาดกระแสไฟฟ้าเหมือนกับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติคือ ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A โดยที่แต่ละกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่ตัวแอกซ์ฮิวเอเตอร์จะใช้เวลาในการเปิดกระแสไฟฟ้า 30 วินาที แล้วบันทึกผล

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องเพาเวอร์ซัพพลาย (MCP M10-TP3005H) ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์ (Keyence IL-065 cmos laser sensor) และแท่นทดสอบ โดยวิธีการต่ออุปกรณ์และวิธีการวัด (แสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 5.19 วิธีการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ

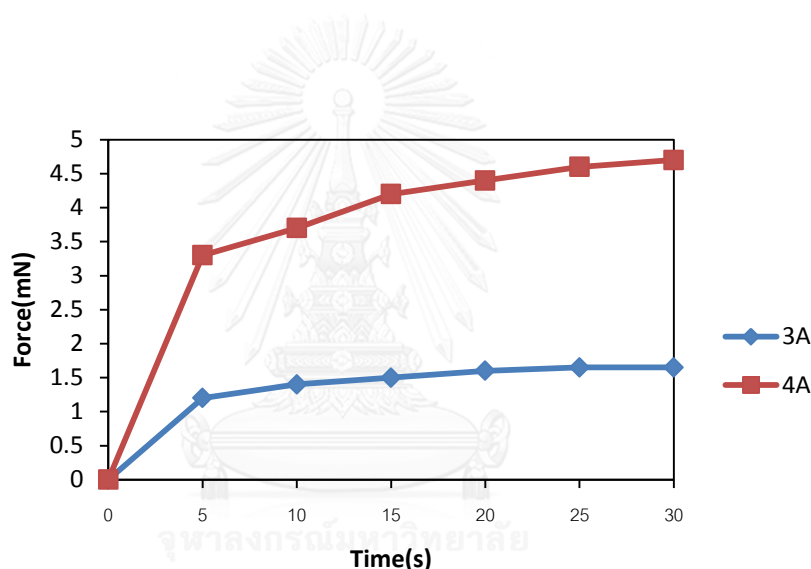
จากนั้นเมื่อได้ทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ลงของคานนิกเกิลด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A ไปที่ตัวแอคชัวเอเตอร์แล้ว จะต้องนำผลจากการวัดระยะการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิลทั้ง 3 ครั้งต่อหนึ่งกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งตามที่ได้กล่าวไปแล้วว่าแอคชัวเอเตอร์แต่ละตัวที่นำมาทำการทดลองจะต้องทดลอง 3 ครั้งต่อตัวและต่อหนึ่งกระแสไฟฟ้าในทุกๆ 5 วินาที เพื่อดูความสม่ำเสมอของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 0.4 มิลลินิวตัน ทำให้ได้ระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยของคานนิกเกิลที่มาจากแอคชัวเอเตอร์ทั้ง 3 ตัว แล้วจึงนำค่าระยะการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิลไปเข้าสู่สูตรการคำนวณการโค้งของคานเพื่อหาค่าแรงที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์ที่กระทำกับคานนิกเกิลได้ โดยจากสมการที่ 5.1 การคำนวณหาแรงที่ปลายแอคชัวเอเตอร์นั้น ต้องแทนค่าที่ทราบจากขนาดของคานซึ่งวัดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ และระยะการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิลที่วัดด้วยเครื่องดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์เมื่อถูกแรงที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์มากระทำที่ตรงกลางคาน

ผลการทดสอบแรงที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A แสดงอยู่ในรูปที่ 5.20 แล้วทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ลงของคานนิกเกิลเพื่อเตรียมเข้าสมการการโค้งตัวของคานเพื่อหาแรงที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์ พบว่าการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิลที่ทำการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีความใกล้เคียงกัน โดยที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 3A ที่เวลา 30 วินาที ค่าแรงที่ได้คือ 1.68 มิลลินิวตัน ซึ่งลักษณะของแรงในช่วงเวลา 0 ถึง 20 วินาที จะค่อยๆเพิ่มขึ้นโดยมีความชันเป็นเส้นตรง และหลังจากนั้นในช่วงเวลา 20 ถึง 30 วินาที ค่าแรงที่ได้จะมีค่าเกือบคงที่อันเนื่องมาจากแรงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลานั้นช้าลงกว่าเดิม และที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A ค่าแรงที่ได้คือ 4.7 มิลลินิวตัน ซึ่งลักษณะของแรงในช่วงเวลา 0 ถึง 30 วินาที จะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยมีความชันเป็นเส้นตรง โดยแสดงรูปภาพการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิลที่เกิดขึ้นจากการผลักดันด้วยปลายแอคชัวเอเตอร์ได้แสดงดังรูปที่ 5.21ก-ข

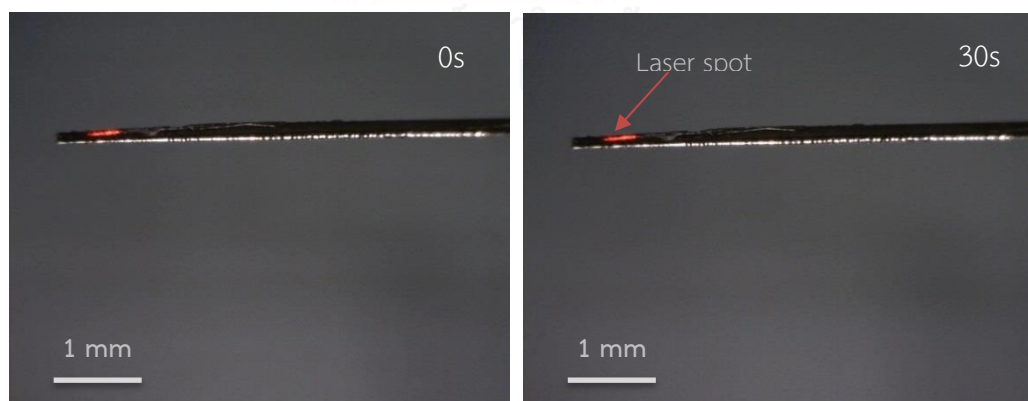
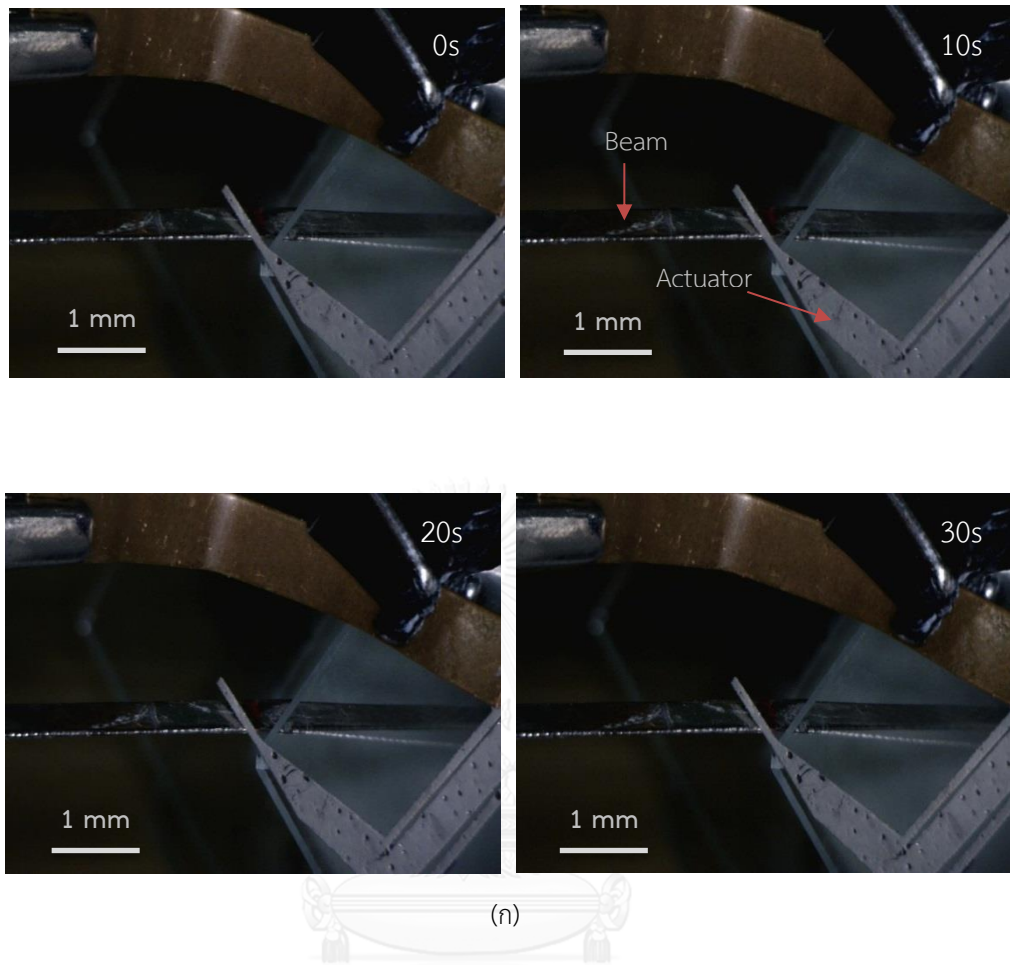
ค่าของแรงที่คำนวณออกมาได้ที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 4A จะให้แรงมากที่สุดซึ่งต้องเป็นเช่นนั้นอยู่แล้วเนื่องจากยิ่งกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่แอคชัวเอเตอร์มากเพียงใดย่อมทำให้เกิดการขยายตัวทางความความร้อนมากขึ้นตามไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีโหลดอย่างคานนิกเกิลหรืออื่นๆกระทำกับแอคชัวเอเตอร์ด้วยทำให้แอคชัวเอเตอร์ต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อดันหรือเคลื่อนที่ไปพร้อมกับโหลดหรือวัตถุใดๆที่วางตัวอยู่กับแอคชัวเอเตอร์ ซึ่งแน่นอนว่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการผลักดันหรือกระทำกับวัตถุก็จะมากขึ้นตามไปกับขนาดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปที่แอคชัวเอเตอร์ ซึ่งถ้าความเค้นที่เกิดจากแรงและความร้อนสูงเกินกว่าที่แอคชัวเอเตอร์จะสามารถรับได้ก็จะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ทันที

เหตุผลที่กระแสไฟฟ้าขนาด 5A ไม่ถูกนำมาบันทึกผลการทดลองเนื่องจากการทดลองการตอบสนองเชิงสถิติที่ผ่านมาพบว่าแอคชัวเอเตอร์เกิดความเสียหายขึ้นเนื่องจากความร้อนที่สะสมในตัวแอคชัวเอเตอร์สูง ทางผู้วิจัยจึงได้ทดลองสุ่มแอคชัวเอเตอร์มาทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าขนาด 5A

เพื่อดูความเสียหายที่เกิดในกรณีที่แอกซ์เวเตอร์มีโหลดมาให้กระทำซึ่งก็คือคานานิกเกิล และเมื่อทำการทดลองก็พบว่าเพียงแค่ 10 วินาที ที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ก็คานานิกเกิล แขนเล็กทั้งสองแขนที่เป็นส่วนที่รับกระแสไฟฟ้าเกิดไหม้และบิดเบี้ยวจนชิ้นงานเสียหายทันที เนื่องจากปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ที่เคลื่อนที่ไปกุดคานานิกเกิลซึ่งทำหน้าที่เป็นโหลดให้กับแอกซ์เวเตอร์เป็นตัวต้านทานการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ทำให้เกิดความเค้นที่สูงภายในโครงสร้างแอกซ์เวเตอร์ที่จะเอาชนะแรงต้านจากโหลดซึ่งก็คือคานานิกเกิลที่ยึดปลายข้างหนึ่งไว้กับผนังกระจกรวมทั้งกระแสไฟฟ้าขนาด 5A ที่ทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนสูงมาก ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้อย่างฉับพลันเพียงไม่กี่วินาทีที่เริ่มให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป จึงไม่เหมาะสมเป็นอย่างมากในการที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับงานใดๆในกรณีเฉพาะรูปแบบแอกซ์เวเตอร์ลักษณะนี้เท่านี้



รูปที่ 5.20 กราฟของแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์เทียบกับเวลา



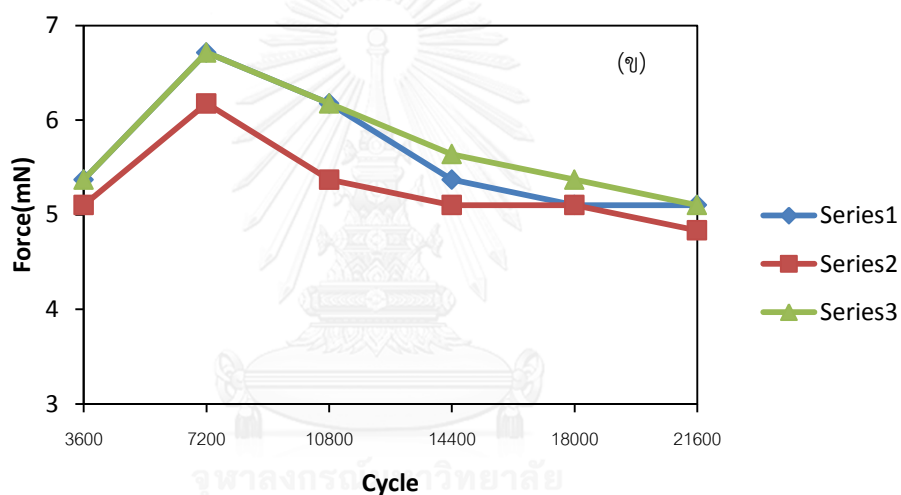
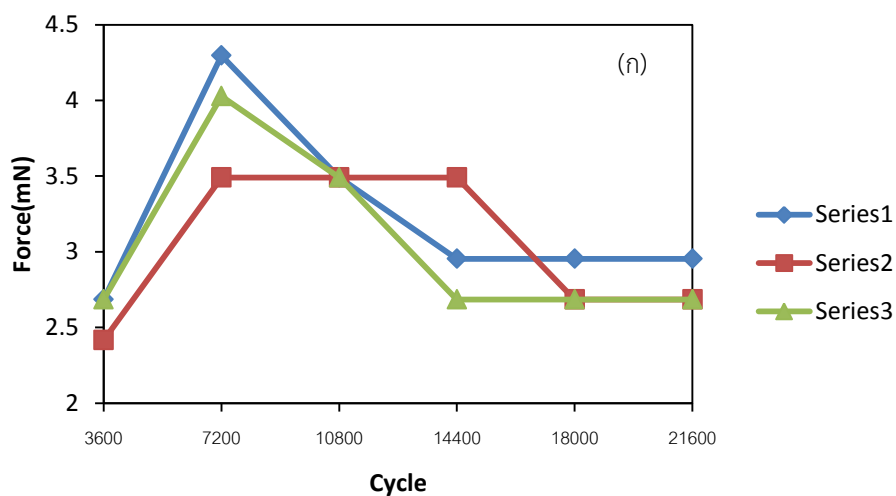
(ข)

รูปที่ 5.21 (ก) ปลายแขนแอคชูเอเตอร์กีดคานนิกเกิลให้ขยับลง (ข) แสงอินฟราเรดวัดการเคลื่อนที่ของคานนิกเกิล

5.4.3 การวัดความล้าของปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่กระทำอย่างต่อเนื่อง

การนำชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์ไปใช้งานนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคืออายุการใช้งานสำหรับแอกซ์ฮิวเอเตอร์ในแต่ละรูปแบบ เพราะเมื่อชิ้นงานแอกซ์ฮิวเอเตอร์มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานานย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ลดลง หรือที่เรียกว่าความล้า ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำกลับไปกลับมาซ้ำๆเป็นเวลานานจนทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงหรือไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการทดสอบความล้าของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ชนิดที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตซึ่งมีความแข็งที่มากกว่าแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตกระทำไปที่คานานิกเกิล ซึ่งแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่มากกว่านั้นจะใช้ป้อนกระแสไฟฟ้าแบบพลวัตที่ 3A และ 4A ด้วยสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 1 Hz เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำการวัดแรงทุกๆชั่วโมงด้วยวิธีตามหัวข้อ 5.4.2 เพราะฉะนั้นทุก 1 ชั่วโมง จะเกิดการรอบการทำงานทั้งหมดเป็น 3600 รอบ จากนั้นจึงนำมาพิจารณาว่าจะเกิดความล้าของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่รอบเท่าไร โดยทดลองทั้งหมด 3 ตัวต่อหนึ่งกระแสไฟฟ้า โดยวิธีการต่ออุปกรณ์และวิธีการวัด (แสดงในภาคผนวก ข)

ผลการทดสอบความล้าของแอกซ์ฮิวเอเตอร์พบว่า ที่กระแสไฟฟ้า 3A แรงจะเริ่มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ช่วง 10800 – 14400 รอบของการทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความถี่ 1 Hz จากนั้นแรงจะลดลงอีกเล็กน้อยและคงที่จนครบตามเวลาที่ทดสอบ 6 ชั่วโมง ในส่วนของกระแสไฟฟ้า 4A แรงจะเริ่มลดลงเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ช่วง 7200 รอบของการทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความถี่ 1 Hz จากนั้นแรงจะค่อยๆลดลงและคงที่จนครบตามเวลาที่ทดสอบ 6 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ซึ่งจากการทดลองจึงบอกได้ว่าลักษณะความล้าที่จะเกิดขึ้นเมื่อแอกซ์ฮิวเอเตอร์ให้แรงที่เพิ่มขึ้นสูงสุดที่สามารถทำได้จากนั้นแรงที่เกิดขึ้นก็จะค่อยๆลดลงเพียงเล็กน้อยแล้วคงที่จนกระทั่งครบตามเวลาที่ทดสอบ ซึ่งเมื่อสังเกตรอบของการการทำงานทั้งหมดที่ได้ทำการทดสอบนั้นก็สรุปได้ว่ายังคงไม่เห็นความล้าของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ได้อย่างชัดเจนหรือไม่เกิดความเสียหายกับแอกซ์ฮิวเอเตอร์เนื่องจากแรงในผลการทดสอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก แต่ถ้าทำการทดสอบต่อเนื่องไปอีกก็อาจจะทำให้แรงของแอกซ์ฮิวเอเตอร์ที่เกิดขึ้นลดลงหรืออาจจะทำให้แอกซ์ฮิวเอเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความล้าจากทำงานซ้ำไปซ้ำมาต่อเนื่องเป็นเวลานาน



รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบความล้าของแรงที่ปลายแขนแอคซ์เวเตอร์ในเวลา 6 ชั่วโมง
(ก) ที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A, (ข) ที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A

5.6 สรุปผล

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของแอคซ์เวเตอร์นิกเกิลไฟฟ้าเชิงความร้อนในงานวิจัยนี้มีสี่แบบคือ การวัดอุณหภูมิของแอคซ์เวเตอร์ การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอคซ์เวเตอร์ โดยการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตินั้นเป็นการทดสอบแรกสำหรับแอคซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนเพื่อดูสมรรถนะการทำงานของแอคซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนทั้ง 4 ลักษณะที่ได้ออกแบบไว้เบื้องต้น ซึ่งลักษณะที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบของแอคซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อน คือระยะห่างระหว่าง

แขนเล็กและแขนใหญ่ที่มีขนาด 100, 200, 300 และ 400 ไมโครเมตร ว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่แอคชัวเอเตอร์ขนาด 3A, 4A และ 5A ตามลำดับ ระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่แบบไหน จะให้การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุดพร้อมทั้งระยะเวลาที่การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์หรือระยะกระดกจะเข้าสู่สภาวะคงตัว หรือไม่มีการการเคลื่อนที่อีกแล้วในเวลาถัดไป

สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาก่อนคืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์ โดยจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิคือบริเวณแป้นรับกระแสไฟฟ้าของแขนเล็กทั้งสองข้างและจุดที่จะไปยึดจับวัตถุเป้าหมายซึ่งคืออุณหภูมิบริเวณปลายแขนแอคชัวเอเตอร์ โดยการทดสอบนี้จะใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้งสามจุดที่กล่าวมาข้างต้น โดยทำการสอบเทียบอุปกรณ์ด้วยความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิ โดยช่วงอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบคือความสัมพันธ์ที่ได้คือ $Y = 0.0421X - 0.1175$ ซึ่ง Y เป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV) และ X เป็นอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เมื่อได้ทำการสอบเทียบแล้ว จึงนำเทอร์โมคัปเปิลทั้งสามตัวไปวัดอุณหภูมิ

ผลที่ได้พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปตำแหน่งที่อยู่บริเวณปลายแขนแอคชัวเอเตอร์ที่ใช้ไปยึดจับวัตถุเป้าหมายนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใดๆเนื่องจากเป็นจุดที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แต่ในส่วนของแขนเล็กทั้งสองฝั่งที่มีกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านโดยตรงเลย มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 1.1 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 3A เข้าไปจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 วินาที โดยมีค่าเบี่ยงมาตรฐานทั้งสามตัวอย่างอยู่ที่ประมาณ 1 องศาเซลเซียส เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 4A พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียสที่เวลา 30 วินาที โดยมีค่าเบี่ยงมาตรฐานทั้งสามตัวอย่างอยู่ที่ประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 5A เข้าไปจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 46 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 วินาที โดยมีค่าเบี่ยงมาตรฐานทั้งสามตัวอย่างอยู่ที่ประมาณ 2-5 องศาเซลเซียส แนวโน้มทั้งสามจุดที่ทำการวัดนั้นเมื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าในการป้อนเข้าไปก็ยังพบว่ามิลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะที่ 3A และ 4A แต่ที่กระแสไฟฟ้าที่ 5A นี้จะทำให้ชิ้นงานนิกเกิลแอคชัวเอเตอร์ส่วนใหญ่พังเสียหายเนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงมากเนื่องจากความต้านทานที่สูงบริเวณตรงกลางของแขนเล็ก ทางผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณตรงกลางแขนเล็กของแอคชัวเอเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนเพิ่มเติมด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้แสงอินฟราเรด ซึ่งจะยิงไปที่แขนเล็กทั้งสองอันแล้วอ่านค่าที่เวลา 30 วินาที เพื่อดูอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นกับแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบในแต่ละกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองสามตัวต่อหนึ่งกระแสไฟฟ้าพบว่า เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไป 3A, 4A และ 5A ตามลำดับ จะได้ช่วงของอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสามตัวที่ตำแหน่งการวัดตรงกลางแขนเล็กทั้งสองตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิที่มาจากกระแสไฟฟ้า 3A กับ 4A ไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส แต่ที่กระแสไฟฟ้า 5A นี้พบว่าส่วนใหญ่เกิดการไหม้เสียหายบริเวณแขน

เล็กทำให้ชิ้นงานพังโดยมีอุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอยู่ที่ 9 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าทำชิ้นงานที่กระแสไฟฟ้าขนาดนี้บ่อยๆก็จะเปรียบเสมือนลดอายุการใช้งานและลดสมรรถนะการทำงานเนื่องจากความร้อนสูงที่สะสมในการทำงานจะทำให้แกนเล็กของแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลที่รับกระแสไฟฟ้าอยู่ตลอดจะค่อยๆเกิดการเสีรูปร่างได้ เพราะฉะนั้นจึงบอกได้ว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 5A อาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานกับแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลลักษณะแบบในงานวิจัยนี้

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าด้วยขนาด 3A, 4A และ 5A ซึ่งที่กระแสไฟฟ้า 5A นี้ที่ถูกทดสอบเพื่อดูระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกสำหรับบางตัวที่ไม่พังเสียหายหรือมีคร่ำครวญใหม่ ในการวัดระยะนี้จะมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตร โดยระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุดที่วัดได้คือ 200 ไมโครเมตร โดยที่กระแสไฟฟ้า 3A, 4A และ 5A จะให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกอยู่ที่ 67, 142 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับ รองลงมาคือขนาด $100 > 300 > 400$ ไมโครเมตร ในทุกๆกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ซึ่งต่างจากที่ทำนายไว้คือ $100 > 200$ ไมโครเมตร ซึ่งทางผู้วิจัยได้เปลี่ยนตำแหน่งการพิจารณาจากเดิมที่บันทึกวิดีโอบริเวณปลายแกนแอกซ์เวเตอร์มาเป็นบริเวณตำแหน่งที่มีการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าหรือบริเวณแกนเล็กและแกนใหญ่ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการขยายตัวทางความร้อนทำให้โครงสร้างนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์ขยับ โดยพิจารณาเฉพาะระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ 2 ขนาดคือ 100 และ 200 ไมโครเมตร และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขนาด 4A พบว่าที่ขนาด 100 ไมโครเมตร จะมีการขยับในช่วง 5 วินาที แรกของการเปิดกระแสไฟฟ้าจากนั้นโครงสร้างก็ยังขยับเล็กน้อยแต่ไม่เกิน 15 วินาที ซึ่งถ้าไม่สังเกตจะไม่เห็นว่ามีขยับใดๆเลย เมื่อทดลองที่ขนาด 200 ไมโครเมตรพบว่าโครงสร้างมีการขยับมากอย่างเห็นได้ชัดภายใน 5 วินาที หลังจากนั้นก็ยังขยับอยู่ต่อเนื่องเล็กน้อยไม่เกิน 15 - 18 วินาที ซึ่งเห็นได้ชัดกว่าขนาด 100 ไมโครเมตร จากภาพวิดีโอการขยับของโครงสร้างจะพบจุดสังเกตที่ระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่ขนาด 100 ไมโครเมตร ว่ามีระยะที่น้อยจนเกือบจะติดกัน

เมื่อพิจารณาถึงการสร้างที่ผ่านมาพบว่าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่มีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่ออกแบบไว้ที่ขนาด 100 ไมโครเมตร มีค่าจริงอยู่ที่ประมาณ 83 ไมโครเมตร ซึ่งบางตัวมีค่าต่ำกว่า 80 ไมโครเมตร จึงทำให้ระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ใกล้กันมากดังนั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานเกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างทำให้แกนเล็กและแกนใหญ่เคลื่อนที่มาค้ำกันส่งผลให้การขยับของโครงสร้างภายในทำได้ไม่เต็มที่เพราะฉะนั้นถ้าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 80 ไมโครเมตร ลงไปจะทำให้สมรรถนะการทำงานของนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบนี้ลดลง ในส่วนของค่าที่ออกแบบไว้ 200 ไมโครเมตร มีค่าจริงอยู่ที่ประมาณ 164 ไมโครเมตร ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่

พอดีทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ถ้าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ห่างออกมากเกินไปก็จะทำให้สมรรถนะการทำงานของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์หรือในที่นี้คือการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกมีค่าลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่มากขึ้นทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากแกนเล็กซึ่งมีความร้อนที่สูงเนื่องจากความต้านทานที่สูงไปสู่แกนใหญ่ที่มีความต้านทานที่ต่ำกว่ามีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงทำให้การเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกมีค่าลดลงไปตามความห่างของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ รวมถึงความสมบูรณ์ของแกนเล็กด้วยในที่นี้คือขนาดความกว้างของแกนเล็กเนื่องจากความต้านทานที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านนั้นแปรผกผันกับพื้นที่ เพราะฉะนั้นเมื่อขนาดความกว้างของแกนเล็กหรือพื้นที่ของแกนเล็กลดลงการขยายตัวทางความร้อนก็จะสูงมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกมากขึ้นไป แต่ก็ก็จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานนั้นได้ง่ายเนื่องจากความร้อนสะสมภายในแกนเล็กที่สูง ซึ่งในการทดลองการตอบสนองเชิงสถิตินี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ลักษณะนี้ไม่สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าขนาด 5A ได้เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้านี้จะทำให้บริเวณแกนเล็กของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์หรือบริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกิดการไหม้เสียหายไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ซึ่งในการที่จะนำไปใช้งานจึงเลือกใช้กระแสไฟฟ้าแค่ 3A และ 4A เท่านั้น เพราะฉะนั้นการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกจะมีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 142 ไมโครเมตร และมีระยะเวลาที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัวหรือสภาวะที่ปลายแกนนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ไม่มีการเคลื่อนอีกในเวลาถัดๆไปภายในเวลา 15-18 วินาที ซึ่งการทดลองการตอบสนองเชิงสถิตินี้จะสังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่เพิ่มขึ้นครั้งละ 100 ไมโครเมตร จะสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของนิกเกิลแอคซิวเอเตอร์ได้อย่างชัดเจน

การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตเป็นการทดสอบเพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกในกรณีที่มีการบ่อนความถี่ที่แตกต่างกันเข้าไปที่แอคซิวเอเตอร์นิกเกิล โดยเลือกใช้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม โดยไม่ได้พิจารณาเปรียบเทียบเนื่องจากในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตินั้นสามารถเปรียบเทียบอย่างเห็นได้ชัดเจนไว้แล้วว่าแอคซิวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้า ความร้อนที่มีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่ 200 ไมโครเมตรจะให้สมรรถนะในการเคลื่อนที่ของปลายแกนแอคซิวเอเตอร์ได้ดีที่สุดด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกนำมาทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตเพียงแค่รูปแบบเดียว จากนั้นจะทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอคซิวเอเตอร์หรือระยะกระดกใน 1 วงรอบ ว่ามีลักษณะการเคลื่อนที่ปกกลับจากการเปิดและปิดกระแสไฟฟ้าตามรูปของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นอย่างไร เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดคือกล้องจุลทรรศน์ซึ่งไม่สามารถวัดแอคซิวเอเตอร์ที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วกลับไปกลับมาด้วยการบ่อนความถี่ต่างๆเข้าไปทำให้แอคซิวเอเตอร์มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาอย่างรวดเร็วไม่เหมือนกับการ

ทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่มีการเคลื่อนที่ไปเหนืทิศทางเดียวตลอดจนกระทั่งปิดไฟถึงจะคืนตัวกลับมา ซึ่งสามารถบอกตำแหน่งโดยประมาณที่เกิดขึ้นเพราะการเคลื่อนที่จะเป็นลักษณะค่อยๆเพิ่มไปขึ้นไป และสามารถเห็นจุดที่เคลื่อนที่ไปได้มากที่สุดก่อนจะคืนตัวกลับมา

การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัตนั้นมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติเนื่องจากใช้อุปกรณ์ในการวัดเหมือนกัน โดยได้ทำการกำหนดความถี่ที่จะใช้ในการทดสอบคือ 0.1, 0.5, 1, และ 5 Hz ด้วยสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 4 A พบว่าที่ความถี่ 0.1 Hz เมื่อวัดระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮอเตอรืหรือระยะกระดกใน 1 วนรอบ พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมากที่สุดเนื่องจากที่ความถี่นี้มีระยะเวลาเปิดกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 5 วินาที และปิดกระแสไฟฟ้า 5 วินาที ทำให้ปลายแขนแอกซ์ฮอเตอรืมีเวลาในการเคลื่อนที่ได้มาก ซึ่งถ้าเทียบกับการทดสอบตอบสนองเชิงสถิตินั้นก็จะเห็นว่าช่วงเวลา 5 วินาทีแรกของการเปิดกระแสไฟฟ้าจะเป็นช่วงที่ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮอเตอรืหรือระยะกระดกเกิดขึ้นได้เร็วที่สุดและมากที่สุด เพราะฉะนั้นในช่วงเวลา 5 วินาที ที่เปิดกระแสไฟฟ้าก็จะเห็นว่าลักษณะกราฟที่วิ่งขึ้นไปนั้นเกือบจะชันเป็น 90 องศา จากนั้นก็จะค่อยๆเพิ่มทีละน้อยๆจนกระทั่งปิดกระแสไฟฟ้าอีก 5 วินาที ก็จะครบ 1 วนรอบ ซึ่งสังเกตได้ว่าแอกซ์ฮอเตอรืนิกลีลเชิงไฟฟ้าความร้อนรูปแบบนี้มีการตอบสนองที่รวดเร็วจนกราฟในช่วงแรกเกือบจะชันเป็น 90 องศาในช่วงเปิดกระแสไฟฟ้าตามสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมในอุดมคติ แล้วจากนั้นก็จะมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ค่อยๆเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าหลังจากจ่ายกระแสไฟฟ้าไป 3 วินาที แนวโน้มที่เกิดขึ้นนั้นเกือบจะลักษณะชันบันไดเพิ่มขึ้นทีละน้อยใกล้เคียงเกือบที่จะขนานไปกับแกน X และให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮอเตอรืหรือระยะกระดกอยู่ที่ 80 - 90 ไมโครเมตร

ความถี่ที่ 0.5 และ 1 Hz นั้นจะใกล้เคียงกัน คือกราฟใน 1 วนรอบ จะมีรูปร่างคล้ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากยิ่งความถี่สูงเวลาในการเปิดปิดไฟน้อยลงทำให้เวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้แอกซ์ฮอเตอรืเคลื่อนที่ไปข้างหน้าก็ลดลงตามซึ่งระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์ฮอเตอรืหรือระยะกระดกก็จะยังไม่ถึงจุดที่เคลื่อนที่ได้เต็มประสิทธิภาพซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ได้ในช่วง 50-70 ไมโครเมตรและถ้านำไปใช้จริงเวลาที่เร็วเกินไปก็อาจจะทำให้วัตถุที่ถูกยึดจับนั้นยังจับด้วยความแน่นที่ไม่พอซึ่งอาจจะหลุดไปได้ โดยช่วงการปิดกระแสไฟฟ้าที่น้อยก็จะส่งผลทำให้มีความร้อนสะสมหรือมีการระบายความร้อนไม่ทัน แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในช่วง 1 วินาทีแรกนั้นไม่มากนักทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและอายุการใช้งาน ยกเว้นที่ความถี่ 5 Hz ซึ่งมีความเร็วในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าที่เร็วมาก ทำให้แอกซ์ฮอเตอรืไม่สามารถตอบสนองได้ทันจึงวัดระยะเวลาการเคลื่อนที่กลับไม่ได้

การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์เพื่อจะนำไปเป็นข้อมูลในการเลือกนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับความสามารถในการทำงานของนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์นี้และทดสอบคุณลักษณะหน่วยแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ที่ขนาด 200 ไมโครเมตร ที่ไปกระทำกับวัตถุใดๆในแต่ละกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งวิธีการวัดแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยนี้คือ วิธีการวัดการโก่งของคานตามหลักการของกลศาสตร์ของแข็ง โดยทำการสร้างคานจำลองขึ้นมาแล้วยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับผนังแล้วให้ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ผลักดันตรงกลางคานให้ขยับลงจากนั้นวัดระยะที่คานเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเริ่มต้นโดยวัดทุกๆ 5 วินาที แล้วนำไปเข้าสู่ตรรกการคำนวณการโก่งตัวของคาน ก็จะได้แรงที่กระทำกับคานจำลองที่สร้างไว้โดยในการทดสอบนี้ได้สร้างเป็นคานนิกเกิลขนาดเล็ก ซึ่งในสูตรการคำนวณการโก่งตัวของคานเพื่อหาค่าแรงที่กระทำ ณ ตรงกลางคานนั้น จำเป็นต้องรู้ค่ามอดูลัสของยังของคานนิกเกิลที่สร้างมา โดยการหาค่ามอดูลัสของยังของนิกเกิลนั้นก็จะใช้ทฤษฎีการโก่งตัวของคานเช่นกันเพียงแต่ครั้งนี้จะใช้ก้อนดินน้ำมันมาถ่วงน้ำหนักเป็นแรงแทนพร้อมกับระยะที่คานนิกเกิลเคลื่อนที่ลงทำให้สามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับคานนิกเกิลนี้ได้ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 287.5 GPa

การทดสอบแรงที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A โดยใช้นิกเกิลแอกซ์เวเตอร์ทดสอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างอย่างละสามตัว โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 0.4 มิลลินิวตัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสำหรับปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ชนิดนี้ที่กระทำคือหน่วยมิลลินิวตัน(mN) โดยที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A ที่ป้อนเข้าไปนั้นจะให้แรงมากที่สุดเฉลี่ยที่ 1.7 มิลลินิวตัน และที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A ที่ป้อนเข้าไปนั้นจะให้แรงมากที่สุดเฉลี่ยที่ 4.7 มิลลินิวตัน โดยแรงที่เกิดขึ้นมากที่สุดจะอยู่ที่เวลา 30 วินาที ซึ่งการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A นั้นค่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆตามลำดับเวลาที่ทำการทดลองเนื่องจากมีความร้อนสะสมในโครงสร้างที่มากกว่าที่การทดสอบที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A แต่ที่การทดสอบแรงด้วยกระแสไฟฟ้าทั้งสองแล้วมีขนาดแรงที่ค่อยๆเพิ่มตามระยะเวลาที่ทดลองโดยไม่มีแนวโน้มที่จะหยุดการเคลื่อนที่นั้นก็เนื่องมาจากแอกซ์เวเตอร์นั้นมีภาระโหลดที่กระทำอยู่ซึ่งก็คือคานนิกเกิลทำให้ที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์พยายามที่จะดันคานนิกเกิลอยู่ตลอดเวลาซึ่งคานนิกเกิลที่เป็นโหลดนี้เปรียบเสมือนแรงต้านกลับจากการกระทำของปลายแขนแอกซ์เวเตอร์รวมถึงความเค้นสะสมที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างบริเวณที่เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ให้เคลื่อนที่ไป เมื่อทดสอบความล้าของแรงที่กระทำของแอกซ์เวเตอร์พบว่ากระแสไฟฟ้า 3A แรงจะเริ่มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ช่วง 10800 - 14400 รอบของการทำงาน จากนั้นแรงจะลดลงอีกเล็กน้อยและคงที่จนครบตามเวลาที่ทดสอบ 6 ชั่วโมง ในส่วนของกระแสไฟฟ้า 4A แรงจะเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง 7200 -10800 รอบของการทำงานอย่างต่อเนื่องจนครบตามเวลาที่ทดสอบ 6 ชั่วโมง เนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจึงสรุปได้ว่าในรอบของการทดสอบทั้งหมด 21600 รอบนั้นไม่เกิดความเสียหายต่อแรงที่แอกซ์เวเตอร์ไปกระทำกับคานนิกเกิล

บทที่ 6

สรุปงานวิจัย

จากอดีตที่ผ่านมาการผลิตอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นมีต้นทุนที่สูง มีขนาดใหญ่มากตามความสามารถของเครื่องอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ ซึ่งการที่จะเข้าถึงต้องอุปกรณ์และเทคโนโลยีในสมัยนั้นต้องเป็นองค์กรหรือบริษัทที่มีงบประมาณที่สูงมาก โดยการประกอบอุปกรณ์นั้นในอดีตที่ผ่านมาสามารถประกอบได้โดยมีมนุษย์เนื่องจากชิ้นส่วนต่าง ๆ นั้นมีขนาดใหญ่ซึ่งสามารถมองเห็นและหยิบจับได้แต่การประกอบชิ้นส่วนแต่ละส่วนที่มีขนาดใหญ่ นั้นจะต้องใช้เวลามาก เนื่องจากน้ำหนักที่มากและซับซ้อน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปความต้องการทางเทคโนโลยีและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ยิ่งมีมาก จึงเป็นเหตุผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันให้มีสมรรถนะที่ดี ต้นทุนการผลิตไม่แพงผลิตได้รวดเร็ว และแนวโน้มของผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กลง ดังนั้นเทคโนโลยีทางระบบไฟฟ้าเครื่องจักรระดับจุลภาคจึงเข้ามามีส่วนสำคัญในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมให้มีขนาดเล็ก ซึ่งเทคโนโลยีทางระบบไฟฟ้าเครื่องจักรระดับจุลภาคนี้ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องซึ่งประกอบไปด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อนและกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยแอกซ์เวเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา ซึ่งแบบที่เป็นที่นิยมในงานวิจัยและพัฒนามากที่สุดคือ แอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อน เนื่องจากเป็นหลักการที่ไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้โดยง่าย และมีขนาดเล็ก จึงนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายกระบวนการโดยการทำงานของแอกซ์เวเตอร์เชิงความร้อนนั้นจะเน้นไปที่การผลิตชิ้นส่วนและการหยิบจับวัตถุ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีแนวทางการศึกษาวิธีการสร้างและการทดสอบสมรรถนะต่างๆ ที่น่าสนใจอยู่หลายแบบ ทำให้ในงานวิจัยนี้ได้รูปแบบของแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและให้สมรรถนะการเคลื่อนที่มากถึง 100 ไมโครเมตร

การศึกษาเกี่ยวกับแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนนี้เริ่มด้วยวิธีการสร้างชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์ซึ่งมีหลายขั้นตอนขึ้นอยู่กับชนิดของแอกซ์เวเตอร์และรูปแบบโครงสร้างของแอกซ์เวเตอร์ โดยการสร้างด้วยวิธี LIGA แบบง่าย และวิธีการสร้างก็ไม่ซับซ้อนโดยสามารถนำไปใช้สร้างได้กับชิ้นงานขนาดเล็กและแอกซ์เวเตอร์ทุกรูปแบบ เพราะฉะนั้นการสร้างนิกเกิลแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี LIGA โดยมีกระบวนการลิโทกราฟีแบบฉายแสงเพื่อสร้างลวดลายแอกซ์เวเตอร์ และขั้นตอนการสร้างชิ้นงานออกมาคือกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์สองชนิดเปรียบเทียบกับกันคือสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตจากการทดลองพบว่าทั้งสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตให้ผลการสร้างที่ไม่แตกต่างกัน โดยแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนนี้ที่สร้างนี้มีความ

แตกต่างกันทั้งหมด 4 แบบ คือมีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่อยู่ที่ 100, 200, 300 และ 400 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อมาพิจารณาผลการวัดระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ ความกว้างของแกนเล็ก และความหนาทั้ง 4 แบบ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 6.88 mA/cm^2 อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการเคลือบนิเกิล 24 ชั่วโมง ผลการสร้างพบว่า ความสม่ำเสมอในการสร้างของทั้งสองสารละลายไม่มีความสม่ำเสมอในการสร้างซึ่งค่าความไม่แน่นอนของการสร้างแม่พิมพ์และหน้ากากวดลายมีค่าประมาณ ± 30 ไมโครเมตร ความแตกต่างของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการสร้างแอคซิวเอเตอร์นิเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนด้วยสารละลายทั้งสองชนิดนั้นมีค่าน้อย หรือในสารละลายทั้งสองตัวมีความแปรปรวนของขนาดอยู่เหมือนกัน แต่ข้อแตกต่างที่สามารถบอกได้สำหรับทั้งสองสารละลายคือ สารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะให้อัตราเร็วในการเคลือบนิเกิลที่มากกว่าสารละลายนิเกิลซัลเฟตที่เวลาเท่ากัน

การศึกษาคุณสมบัติทางวัสดุมีเป้าหมายคือเพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีของทั้งสองสารละลายนั้น โดยการทดลองใช้สารละลายสองตัวคือ สารละลายนิเกิลซัลเฟตและสารละลายนิเกิลซัลฟาเมต แล้วจึงนำสารละลายทั้งสองชนิดมาทำการสร้างชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์นิเกิล

การวัดความหยาบของผิวนิเกิลจะใช้ตัวอย่างละสามตัวต่อสารละลายที่ทำการสร้างพบว่าที่การสร้างชิ้นงานนิเกิลด้วยสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะให้ผิวที่มีค่าความหยาบ (R_a) อยู่ที่ 6.21 ไมโครเมตร และเมื่อส่องดูผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าลักษณะผิวมีความละเอียดลักษณะคล้ายกับเม็ดทรายขนาดเล็กเรียงตัวเป็นระเบียบ ส่วนชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตจะมีค่าความหยาบ (R_a) อยู่ที่ 1.28 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อนำไปยึดจับผิววัตถุเป้าหมาย แอคซิวเอเตอร์นิเกิลที่สร้างจากสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตจะยึดจับได้ดีกว่าเนื่องจากลักษณะผิวจะมีความละเอียดเป็นเม็ดๆ ทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุกับผิวแอคซิวเอเตอร์นิเกิลมากกว่าจึงยึดจับวัตถุใดๆ ได้แน่นและมั่นคงกว่า

การศึกษาโครงสร้างผลึกของชิ้นงานนิเกิลด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อหาเอกลักษณ์ของชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากสองสารละลาย โดยทดลองสารละลายละ 2 ตัว พบว่าให้ผลเหมือนกันในแต่ละสารละลาย ซึ่งชิ้นงานนิเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิเกิลซัลฟาเมตนั้นมีผลึกที่แสดงค่าความเข้มข้นของพลังงานมากที่สุดคือ ระนาบผลึกที่แสดงในรูปดรรชนีมิลเลอร์อยู่ที่ (220) และสำหรับชิ้นงานนิเกิลที่สร้างจากสารละลายนิเกิลซัลเฟตจะมีระนาบผลึกที่แสดงอยู่ในรูปดรรชนีมิลเลอร์ที่ (111) การเรียงตัวของผลึกนั้นอยู่ในรูปแบบ FCC (Face-Center-Cubic)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อมีการดูดและคายพลังงานทางความร้อน (Simultaneous Thermal Analyzer) ใช้ชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์นิเกิลจากทั้งสองสารละลายโดยใช้สารละลายละ 3 ตัวอย่าง ทำการกำหนดสภาวะที่จะใช้ในการทดลองคือ ใช้ อัตราการผ่านความร้อน

ไปที่ชิ้นงาน (HR) = 10 K/min โดยวางชิ้นงานอยู่ในอากาศ แล้วเร่งอุณหภูมิภายในเครื่องที่มีชิ้นงาน แอคชัวเอเตอร์นิกเกิลวางอยู่จาก 25 – 1200 องศาเซลเซียส พบว่าที่ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (TG) ของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลทั้งสองสารละลายนั้นมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเล็กน้อยประมาณ 2%-3% เนื่องมาจากออกไซด์ในอากาศซึ่งในอากาศมีก๊าซออกซิเจนเมื่อมีการเผาไหม้กับธาตุอื่นจึงทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ขึ้นที่ผิวนิกเกิลอย่างต่อเนื่องในขณะที่แอคชัวเอเตอร์นิกเกิลถูกเผาด้วยอุณหภูมิที่เร่งขึ้นไป ในส่วนของการดูดและคายความร้อน (DTA) ของชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลนั้น พบว่าเมื่อเร่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปตามลำดับชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลทั้งสองสารละลายจะมีการคายความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มไปถึงจุดที่แอคชัวเอเตอร์นิกเกิลจะสามารถทนได้ และพังเสียหายในที่สุดหรือที่เรียกว่าจุดหลอมเหลวสูงสุดของ ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วงประมาณ 890-1066 องศาเซลเซียส

การทดสอบความแข็งในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิกเกอร์ (Vicker) ในการทดสอบความแข็งเนื่องจากชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลมีขนาดเล็ก โดยใช้ชิ้นงานที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตมาทำการทดสอบอย่างละ 3 ตัว โดยกดลงไป 5 จุดที่ตรงกลางแขนใหญ่ของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลโดยผิวที่จะทำการทดสอบต้องขัดให้เรียบเพื่อให้เห็นผิวที่ถูกกดด้วยหัวเพชรลงไปได้ อย่างชัดเจน โดยน้ำหนักที่กดลงไปคือ 200 กรัม ผลที่ได้คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตมีค่า 237, 234 และ 241 นิกเกิลแอคชัวเอเตอร์ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์อยู่ที่ 516, 520 และ 579

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้มีเพื่อดูสมรรถนะการทำงานของแอคชัวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนที่ระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ที่มีขนาด 100, 200, 300 และ 400 ไมโครเมตร ว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่แอคชัวเอเตอร์ขนาด 3A, 4A และ 5A ตามลำดับ แบบไหนจะให้การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุดพร้อมทั้งระยะเวลาที่การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชัวเอเตอร์หรือระยะกระดกจะเข้าสู่สภาวะคงตัว หรือไม่มีการเคลื่อนที่อีกแล้วในเวลาถัดไป

การพิจารณาก่อนคืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานแอคชัวเอเตอร์ โดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิและทำการสอบเทียบอุปกรณ์ด้วยความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิ

ผลที่ได้พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปตำแหน่งที่อยู่บริเวณปลายแขนแอคชัวเอเตอร์ที่ใช้ไปจับวัตถุเป้าหมายนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใดๆ เนื่องจากเป็นจุดที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แต่ในส่วนของแขนเล็กทั้งสองฝั่งที่มีกระแสไฟฟ้าวิ่งผ่านโดยตรงเลย มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 1.1 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 3A เข้าไปจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 30

องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 วินาที เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 4A พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียสที่เวลา 30 วินาที และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 5A เข้าไปจะได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 46 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 วินาที แนวโน้มทั้งสามจุดที่ทำการวัดนั้นเมื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าในการป้อนเข้าไปก็ยังคงพบว่ามีลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน ที่กระแสไฟฟ้าที่ 5A นี้จะทำให้ชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์ส่วนใหญ่พังเสียหายเนื่องจากมีอุณหภูมิที่สูงมากเนื่องจากความต้านทานที่สูงบริเวณตรงกลางของแกนเล็ก ทางผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณตรงกลางแกนเล็กของแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อนเพิ่มเติมด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้แสงอินฟราเรด ซึ่งจะยิงไปที่แกนเล็กทั้งสองอันแล้วอ่านค่าที่เวลา 30 วินาที เพื่อดูอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นกับแอกซ์เวเตอร์ในช่วงเวลาที่ทำการทดสอบในแต่ละกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองสามตัวต่อหนึ่งกระแสไฟฟ้าพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไป 3A, 4A และ 5A ตามลำดับ จะได้ช่วงของอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งสามตัวที่ตำแหน่งการวัดตรงกลางแกนเล็กทั้งสองตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิที่มาจากระแสไฟฟ้า 3A กับ 4A ไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส แต่ที่กระแสไฟฟ้า 5A นี้พบว่าส่วนใหญ่เกิดการไหม้เสียหายบริเวณแกนเล็กทำให้ชิ้นงานพังโดยมีอุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิอยู่ที่ 9 องศาเซลเซียส เพราะฉะนั้นจึงบอกได้ว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 5A อาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานกับแอกซ์เวเตอร์นี้เลยลักษณะแบบในงานวิจัยนี้

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติจะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าด้วยขนาด 3A 4A และ 5A ซึ่งที่กระแสไฟฟ้า 5A นี้ที่ถูกทดสอบเพื่อดูระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกสำหรับบางตัวที่ไม่พังเสียหายหรือมีแค่รอยไหม้ ในการวัดระยะนี้จะมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตร โดยระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกมากที่สุดที่วัดได้คือ 200 ไมโครเมตร โดยที่กระแสไฟฟ้า 3A, 4A, และ 5A จะให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่ปลายแกนแอกซ์เวเตอร์หรือระยะกระดกอยู่ที่ 67, 142 และ 250 ไมโครเมตร ตามลำดับ รองลงมาคือขนาด $100 > 300 > 400$ ไมโครเมตร ในทุกๆกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ซึ่งต่างจากที่ทำนายไว้คือ $100 > 200$ ไมโครเมตร

เมื่อพิจารณาถึงการสร้างที่ผ่านมาพบว่าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่มีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่ออกแบบไว้ที่ขนาด 100 ไมโครเมตร มีค่าจริงอยู่ที่ประมาณ 83 ไมโครเมตร ซึ่งบางตัวมีค่าต่ำกว่า 80 ไมโครเมตร จึงทำให้ระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ใกล้เคียงกันมากดังนั้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ชิ้นงานเกิดการขยายตัวทางความร้อนภายในโครงสร้างทำให้แกนเล็กและแกนใหญ่เคลื่อนที่มากำกั้นส่งผลให้การขยับของโครงสร้างภายในทำได้ไม่เต็มที่เพราะฉะนั้นถ้าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 80 ไมโครเมตร ลงไปจะทำให้สมรรถนะการทำงานของแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบนี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ห่างออกมากเกินไปก็จะทำให้สมรรถนะการทำงานของแอกซ์เวเตอร์หรือใน

ที่นี้คือการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกมีค่าลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ที่มากขึ้นทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากแขนเล็กซึ่งมีความร้อนที่สูงเนื่องจากความต้านทานที่สูงไปสู่แขนใหญ่ที่มีความต้านทานที่ต่ำกว่ามีค่าน้อยลง ซึ่งในการทดลองการตอบสนองเชิงสถิตินี้ทำให้ทราบว่าชิ้นงานแอคชูเอเตอร์นิกเกิลลักษณะนี้ไม่สามารถใช้กับกระแสไฟฟ้าขนาด 5A ได้เนื่องจากที่กระแสไฟฟ้านี้จะทำให้บริเวณแขนเล็กของ แอคชูเอเตอร์หรือบริเวณที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเกิดการไหม้เสียหายไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ ซึ่งในการที่จะนำไปใช้งานจึงเลือกใช้กระแสไฟฟ้าแค่ 3A และ 4A เท่านั้น

การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต เป็นการทดสอบเพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกที่มีการบิดความถี่ที่แตกต่างกันเข้าไปที่แอคชูเอเตอร์โดยเลือกใช้เป็นสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกใน 1 วนรอบ ว่ามีลักษณะการเคลื่อนที่ไปกลับจากการเปิดและปิดกระแสไฟฟ้าตามรูปของสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นอย่างไร โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 26 ไมโครเมตร ซึ่งได้ทำการกำหนดความถี่ที่จะใช้ในการทดสอบคือ 0.1, 0.5, 1, และ 5 Hz ด้วยสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ขนาดกระแสไฟฟ้า 4 A พบว่าที่ความถี่ 0.1 Hz เมื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกใน 1 วนรอบ พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่จะใกล้เคียงกับสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมากที่สุดเนื่องจากมีช่วงเวลาในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าที่นานที่สุด และให้ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกอยู่ที่ 80 – 90 ไมโครเมตร

ความถี่ที่ 0.5 และ 1 Hz นั้นจะใกล้เคียงกันคือกราฟใน 1 วนรอบ จะมีรูปร่างคล้ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากยิ่งความถี่สูงเวลาในการเปิดปิดไฟน้อยลงทำให้เวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้แอคชูเอเตอร์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าก็ลดลงตามซึ่งระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดกในช่วง 50-70 ไมโครเมตร ยกเว้นที่ความถี่ 5 Hz ซึ่งมีความเร็วในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าที่เร็วมาก ทำให้แอคชูเอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้ทันจึงวัดระยะการเคลื่อนที่ไปกลับไม่ได้

การทดสอบแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์ของระยะห่างระหว่างแขนเล็กและแขนใหญ่ที่ 200 ไมโครเมตร ซึ่งวิธีการวัดแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์ในงานวิจัยนี้คือ วิธีการวัดการโก่งของคาน โดยทำการสร้างคานจำลองขึ้นมาแล้วยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับผนังแล้วให้ปลายแขนแอคชูเอเตอร์ผลักดันตรงกลางคานให้ขยับลงจากนั้นวัดระยะที่คานเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเริ่มต้น แล้วนำไปเข้าสู่ตรรกการคำนวณการโก่งตัวของคานซึ่งคำนวณออกมาได้อยู่ที่ 221 GPa

การทดสอบแรงที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A และ 4A โดยใช้แอคชูเอเตอร์ทดสอบที่กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างละสามตัวโดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ที่ ± 0.4 มิลลินิวตัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสำหรับปลายแขนแอคชูเอเตอร์ชนิดนี้ที่กระทำคือหน่วยมิลลินิวตัน

โดยที่กระแสไฟฟ้าขนาด 3A ที่ป้อนเข้าไปนั้นจะให้แรงมากที่สุดเฉลี่ยที่ 1.7 มิลลินิวตัน และที่กระแสไฟฟ้าขนาด 4A ที่ป้อนเข้าไปนั้นจะให้แรงมากที่สุดเฉลี่ยที่ 4.7 มิลลินิวตัน เมื่อทดสอบความล้าของแรงที่กระทำของแอกซ์ฮิวเอเตอร์พบว่ากระแสไฟฟ้า 3 และ 4 A ไม่เห็นความล้าที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากจึงสรุปได้ว่าในรอบของการทดสอบทั้งหมด 21600 รอบนั้นไม่เกิดความเสียหายต่อแรงที่แอกซ์ฮิวเอเตอร์ไปกระทำกับคานานิกเกิล เพราะฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่ารูปแบบแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิกเกิลเชิงไฟฟ้าความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นรูปแบบโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและให้ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่ปลายแขนได้มากรวมถึงสามารถนำไปออกแบบเพิ่มเติมตามความต้องการได้

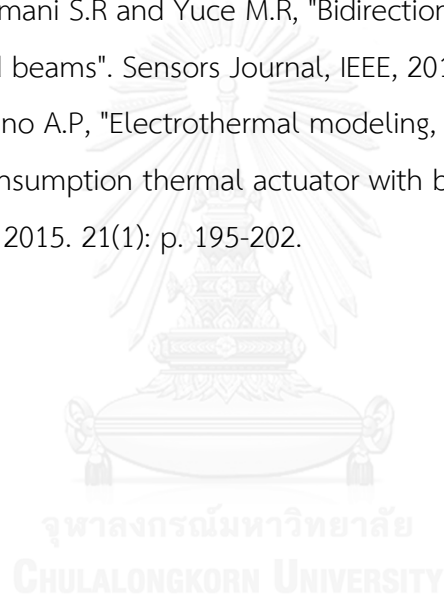


รายการอ้างอิง

- [1] A. Bruno Frazier and Mark G. Allen, "Metallic microstructures fabricated using photosensitive polyimide electroplating molds". *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 1993. 2(2): p. 87-94.
- [2] Lorenz. H, Paratte. L, Luthier. R, Nicholaas F. de Rooij, Renaud. P, "Low-cost technology for multilayer electroplated parts using laminated dry film resist". *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996. 53(1): p. 364-368.
- [3] Wenmin. Q, Christian. W, Andreas. J, Dieter. Z, "UV-LIGA: a promising and low-cost variant for microsystem technology". *Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices*, 1998. *Proceedings. 1998 Conference on*. 1999. IEEE.
- [4] Tsuru. Y, Nomura. M, and Foulkes. F, "Effects of chloride, bromide and iodide ions on internal stress in films deposited during high speed nickel electroplating from a nickel sulfamate bath". *Journal of applied electrochemistry*, 2000. 30(2): p. 231-238.
- [5] Lydon S. Stephens, Kevin W. Kelly, Seshu. S, Andy B, "Mechanical property evaluation and failure analysis of cantilevered LIGA nickel microposts". *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 2001. 10(3): p. 347-359.
- [6] Hemker K.J and H. Last, "Microsample tensile testing of LIGA nickel for MEMS applications". *Materials Science and Engineering: A*, 2001. 319: p. 882-886.
- [7] Moulton. T and Ananthasuresh. G, "Micromechanical devices with embedded electro-thermal-compliant actuation". *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001. 90(1): p. 38-48.
- [8] Fritz. T, Mokwa. W and Schnakenberg. U, "Material characterisation of electroplated nickel structures for microsystem technology". *Electrochimica acta*, 2001. 47(1): p. 55-60.
- [9] Fritz. T, Cho H.S, Mokwa. W, Hemker K.J, "Characterization of electroplated nickel". *Microsystem Technologies*, 2002. 9(1-2): p. 87-91.
- [10] Thomas E. Buchheit, David A. Lawan, Joseph R. Michael, "Microstructural and mechanical properties investigation of electrodeposited and annealed LIGA

- nickel structures". Metallurgical and Materials Transactions A, 2002. 33(3): p. 539-554.
- [11] Fritz. T, Griepentrog. M, Mokwa. W, "Determination of Young's modulus of electroplated nickel". Electrochimica Acta, 2003. 48(20): p. 3029-3035.
- [12] Chan H.Y. and Wen J. Li, "A thermally actuated polymer micro robotic gripper for manipulation of biological cells". Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on. 2003. IEEE.
- [13] Luo J.K, Flewitt A.J, Spearing S.M, Fleck N.A, "Young's modulus of electroplated Ni thin film for MEMS applications". Materials Letters, 2004. 58(17): p. 2306-2309.
- [14] Chronis. N and Luke P. Lee, "Electrothermally activated SU-8 microgripper for single cell manipulation in solution". Microelectromechanical Systems, Journal of, 2005. 14(4): p. 857-863.
- [15] Ivanova. K, Ali. B, Burkhard E.V, Ivo W.R, Daniela. A, "Thermally driven microgripper as a tool for micro assembly". Microelectronic Engineering, 2006. 83(4): p. 1393-1395.
- [16] Solano. B and Wood. D, "Design and testing of a polymeric microgripper for cell manipulation". Microelectronic Engineering, 2007. 84(5): p. 1219-1222.
- [17] Shane T. Todd and Xie. H, "An electrothermomechanical lumped element model of an electrothermal bimorph actuator". Microelectromechanical Systems, Journal of, 2008. 17(1): p. 213-225.
- [18] Saitou. M, Oshiro. S and Hossain S.A, "Effect of temperature on nickel electrodeposition from a nickel sulfamate electrolyte". Journal of Applied Electrochemistry, 2008. 38(3): p. 309-313.
- [19] Duc T.C, Lau J.K, "Electrothermal microgripper with large jaw displacement and integrated force sensors". Microelectromechanical Systems, Journal of, 2008. 17(6): p. 1546-1555.
- [20] Sawa. Y, Kenji. Y, Takeshi. K, Daiji. N, " Fabrication of High Hardness Micro Mold Using Double Layer Nickel Electroforming". Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2008. MHS 2008. International Symposium on. 2008. IEEE.

- [21] Basrour. S and Robert. L, "X-ray characterization of residual stresses in electroplated nickel used in LIGA technique". *Materials Science and Engineering: A*, 2000. 288(2): p. 270-274.
- [22] Rashidi. A and Amadeh. A, "Effect of electroplating parameters on microstructure of nanocrystalline nickel coatings". *Journal of Materials Science & Technology*, 2010. 26(1): p. 82-86.
- [23] Kim B.S, Park J.S, Kang B.H, Chanwoo. M, "Fabrication and property analysis of a MEMS micro-gripper for robotic micro-manipulation". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012. 28(1): p. 50-56.
- [24] Zhu. Y, Moheimani S.R and Yuce M.R, "Bidirectional electrothermal actuator with Z-shaped beams". *Sensors Journal, IEEE*, 2012. 12(7): p. 2508-2509.
- [25] So. H and Pisano A.P, "Electrothermal modeling, fabrication and analysis of low-power consumption thermal actuator with buckling arm". *Microsystem Technologies*, 2015. 21(1): p. 195-202.





ภาคผนวก ก
การทดสอบคุณสมบัติของนิกเกิล

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การศึกษาคุณลักษณะของชิ้นงานนิกเกิลในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาทำการศึกษาลักษณะระนาบการวางตัวของโครงสร้างผลึกในชิ้นงานนิกเกิลที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและนิกเกิลซัลเฟต โดยนำชิ้นงานนิกเกิลด้านที่จะทำการยิงรังสีเอ็กซ์มาทำการขัดให้เรียบจากนั้นวางลงบนแท่นเตรียมชิ้นงานซึ่งต้องวางตำแหน่งที่ต้องการยิงรังสีให้อยู่ตรงกลางแท่นแล้วใช้สก็อตเทปติดยึดไว้ไม่ให้มีการขยับแสดงดังรูปที่ ก.1 ในกรณีที่ชิ้นงานใหญ่เกินกว่าที่จะใช้สก็อตเทปยึดติดได้จะต้องทำการตัดชิ้นงานบริเวณที่ต้องการทำการวัดมาไว้ตำแหน่งตรงกลางแท่นเตรียมชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานควรมีขนาดที่ไม่เกิน 2x2 ตารางเซนติเมตร ลักษณะเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีแสดงดังรูปที่ ก.2 โดยสามารถติดต่อเพื่อขอส่งตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบได้ที่ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ติดต่อคุณจิระประภา เนียมปาน โทร 02-218-5442



รูปที่ ก.1 แท่นวางชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ ก.2 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกับการดูดหรือคายความร้อน

การหาคุณสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานนิกเกิลในงานวิจัยนี้ที่สร้างมาจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟตและนิกเกิลซัลฟาเมตจะใช้เครื่องมือที่มีชื่อทางวิชาการว่า Simultaneous thermal analyzer ซึ่งหลักการทดสอบคือนำชิ้นงานนิกเกิลไปวางไว้ในเครื่องทดสอบแล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป โดยช่วงอุณหภูมิที่วัดได้อยู่ที่ 25 - 1200 องศาเซลเซียส ด้วยช่วงอุณหภูมินี้ทำให้สามารถทราบถึงจุดหลอมเหลวของชิ้นงานหรือจุดที่ชิ้นงานพังเสียหายว่าอยู่ที่อุณหภูมิเท่าใด โดยทางผู้ทดสอบต้องกำหนดอัตราการให้ความร้อน (HR) และบรรยากาศของตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ซึ่งมีให้เลือกเป็น N_2 และ Air ซึ่งลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างที่สามารถนำมาทดสอบได้คือ ของแข็ง ผงละเอียด เส้นใย หรือ ของเหลว โดยเครื่องที่ทำการทดสอบคือ STA409C Netzsch แสดงดังรูปที่ ก.3 สามารถติดต่อเพื่อขอส่งตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบได้ที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร 02-218-8032



รูปที่ ก.3 เครื่องทดสอบ STA409C Netzsch

การวัดความแข็งของชิ้นงานนิกเกิล

การวัดความแข็งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิควิกเกอร์เนื่องจากชิ้นงานนิกเกิลมีขนาดเล็ก โดยตัวอย่างชิ้นงานที่จะนำมาใช้วัดจะต้องขัดผิวให้มีความเรียบก่อนเนื่องจากเมื่อกดด้วยเพชรของเทคนิควิกเกอร์มันจะแสดงเป็นรอยบวมที่ทำการกดลงไปโดยรอยที่ถูกกดนี้จะนำมาวัดค่าเมื่อทำการคำนวณหาความแข็งต่อไป ซึ่งถ้าผิวไม่มีความเรียบมากพอหรือมีรอบขีดข่วนจะส่งผลต่อค่าความแข็งที่คำนวณออกมาและผิวต้องเป็นระนาบเดียวกันไม่มีการโก่งงอ โดยเครื่องมือที่ทำการทดสอบด้วยเทคนิควิกเกอร์รุ่น Zwick-3212 แสดงดังรูปที่ ก.4 ตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร 02-218-8032

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ก.4 เครื่องทดสอบความแข็ง Zwick-3212

การทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างในรูปแบบค้อน

การทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกนข้อมูล และการคำนวณการทดสอบแรงดึงทั่วไปได้แก่ ร้อยละการยืดตัว (Percent elongation) โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความเค้นแรงดึงจุดคราก (Yield strength) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เป็นต้น การทดสอบแรงดึงลักษณะนี้จะใช้ชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปค้อน โดยผลการทดสอบที่ได้จะอ้างอิงกับกราฟความสัมพันธ์ Stress & Strain ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการกระบวนการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 ด้วยเครื่องมือทดสอบ Universal testing machine (Hounsfield H10KM) ดังแสดงในรูปที่ ทางผู้วิจัยได้ทดลองสร้างเป็นรูปค้อนอย่างง่ายด้วยการสร้างชิ้นงานแบบเดียวกับการสร้างชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์นิกเกิลด้วยสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและซัลเฟตแล้วยืดความหนาให้ใกล้เคียงกับความหนาที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 120-150 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูป ก.5 ทำการทดสอบสามตัวต่อสารละลาย ผลการทดสอบแสดงในรูป ก.6.1-6.2 ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างของข้อมูลในบางตัวซึ่งอาจมาจากความผิดพลาดที่นำมาสร้างที่ไม่สมบูรณ์และการเลื่อนของตัวอย่างระหว่างทำการทดลองอันเนื่องมาจากขนาดของชิ้นงานที่เล็กกว่าปกติที่เครื่องจะใช้ทำการทดสอบ จากรูปที่ ก.6.2 จะเห็นเป็นเลข 4 และ 4-1 ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานหมายเลข 4 มีการเลื่อนจากตำแหน่งการจับเดิมจึงต้องทำการดึงใหม่รวมถึงเลขอื่นด้วยเช่นกัน โดยสามารถติดต่อส่งตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบได้ที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร 02-218-8032



รูปที่ ก.4 ชิ้นงานตัวอย่างนิกเกิลรูปค้อน

ความหนาชิ้นงานเท่ากับ 142 ไมโครเมตร

ความยาวชิ้นงานเท่ากับ 4.5 เซนติเมตร

ความกว้างชิ้นงานบริเวณคอคอดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร



รูปที่ ก.5 เครื่องทดสอบแรงดึง Universal testing machine (Hounsfield H10KM)

ASTM D 882; Tensile-E.Mod Test

Results for Product Code: mtl/15/027-032

Wednesday 28 January 2015

Individual Specimens

[ASD8-82A.TSX]

Batch Reference	E.Mod MPa	Yield Str. MPa	Yield Ext. %	Brk. Factor N/mm	Max Stress MPa	Brk. Stress MPa	Brk. Ext %	TEA J
astm D882 E.mod - 1	12570	923	7.41	129.2	923	923	7.41	0.0666
astm D882 E.mod - 2	12059	223.2	1.720	73.3	458.3	458.3	4.720	0.0229
astm D882 E.mod - 3	4332	185.5	2.140	93.8	670	670	6.10	0.0286
n	3	3	3	3	3	3	3	3
Mean	9653	443.9	3.757	98.78	683.7	683.7	6.077	0.0394
Std. Dev.	4616.0	415.38	3.1708	28.284	232.69	232.69	1.3452	0.0238

รูปที่ ก.6.1 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานนิกเกิลรูปค้อนที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต

ASTM D 882; Tensile-E.Mod Test

Results for Product Code: mtl/15/027-032

Wednesday 28 January 2015

Individual Specimens

[ASD8-82A.TSX]

Batch Reference	E.Mod MPa	Yield Str. MPa	Yield Ext. %	Brk. Factor N/mm	Max Stress MPa	Brk. Stress MPa	Brk. Ext %	TEA J
astm D882 E.mod - 4	19176	193.7	0.900	59.1	422.0	412.3	7.80	0.0340
astm D882 E.mod - 4-1	23911	278.7	1.580	39.02	278.7	253.7	1.880	0.0070
astm D882 E.mod - 5	19015	249.7	1.120	34.96	249.7	249.7	2.070	0.0073
astm D882 E.mod - 5-1	6162	129.5	0.4500	61.2	437.5	373.6	3.550	0.0157
astm D882 E.mod - 6	-	57.3	-	-	-	57.3	-	-
astm D882 E.mod - 6	34392	121.5	0.800	18.23	121.5	100.7	1.250	0.0025
n	5	6	5	5	5	6	5	5
Mean	20531	171.74	0.9700	42.51	301.9	241.2	3.310	0.0133
Std. Dev.	10176	84.16	0.4180	17.919	130.95	141.83	2.6478	0.0125

รูปที่ ก.6.2 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานนิกเกิลรูปค้อนที่สร้างจากสารละลายนิกเกิลซัลเฟต

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย

งานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและนิกเกิลซัลเฟตในการสร้างชิ้นงานนิกเกิลออกมา ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการที่จะเก็บข้อมูลของสารละลายทั้งสองว่ามีปริมาณธาตุเป้าหมายซึ่งก็คือนิกเกิลอยู่ประมาณเท่าไรซึ่งสารละลายที่ซื้อมาอ้างอิงส่วนประกอบทางเคมีตามที่ทางร้านใช้งานจริงผลการวิเคราะห์แสดงเป็น Data sheet โดยการวิเคราะห์ครั้งได้ใช้เครื่องมือการทดสอบที่ชื่อว่า Atomic Absorption Spectrometry รุ่น Varian Model AA280FS แสดงดังรูปที่ ก.7 โดยสามารถติดต่อส่งตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบได้ที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร 02-218-8032



รายงานสรุปผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	สารละลายนิกเกิล
รหัสใบส่งตัวอย่าง	S573296
เจ้าของตัวอย่าง	คุณ อธิพิณ เจริญบุญญาฤทธิ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วัตถุประสงค์	เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุนิกเกิล (Ni)
วิธีวิเคราะห์	Air-C ₂ H ₂ Flame Atomic Absorption Spectrometry
เครื่องมือวิเคราะห์	Atomic Absorption Spectrophotometer, Varian Model AA280FS
ชื่อ Worksheet data	Ni-Ittpol-S573296
วันที่ทำการวิเคราะห์	14 พฤศจิกายน 2557

ผลการวิเคราะห์

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณธาตุนิกเกิล (กรัม ต่อ ลิตร)
สารละลายนิกเกิลซัลเฟต	119.6 (11.96 % w/v)
สารละลายนิกเกิลซัลฟาเมต	139.1 (13.91 % w/v)

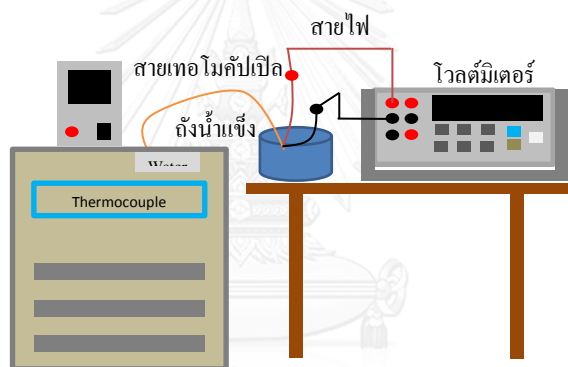
รูปที่ ก.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลายนิกเกิลซัลฟาเมตและนิกเกิลซัลเฟต

ภาคผนวก ข

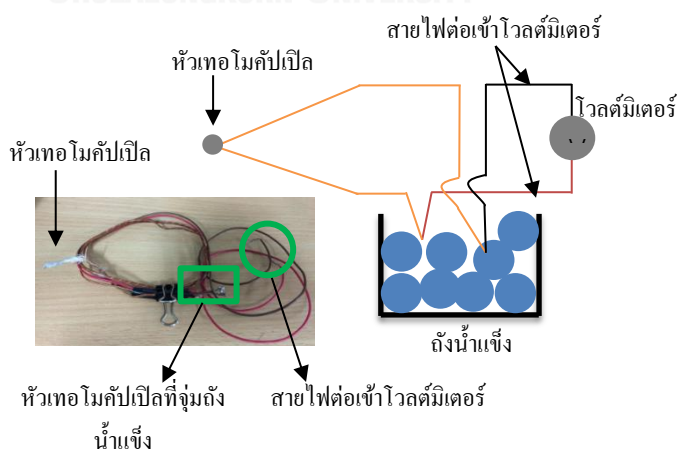
วิธีการทดสอบสมรรถนะแอกซ์เวเตอร์เชิงไฟฟ้าความร้อน

การวัดอุณหภูมิของแอกซ์เวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้ใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ ซึ่งต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดก่อนที่จะนำมาวัด โดยทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 3 ตัว ด้วยช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 – 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการจดบันทึกค่าความต่างศักย์ที่อ่านได้ทุกๆ 5 องศาเซลเซียส และทำการวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง โดยนำหัวเทอร์โมคัปเปิลที่ต้องการวัดลงไปจุ่มในฮีตเตอร์และหัวเทอร์โมคัปเปิลฝั่งที่ต่อกับสายไฟเอาไปจุ่มในถังน้ำแข็ง ส่วนสายไฟนำไปต่อเข้าเครื่องวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ซึ่งวิธีการต่ออุปกรณ์เพื่อทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแสดงในรูปที่ ข.1



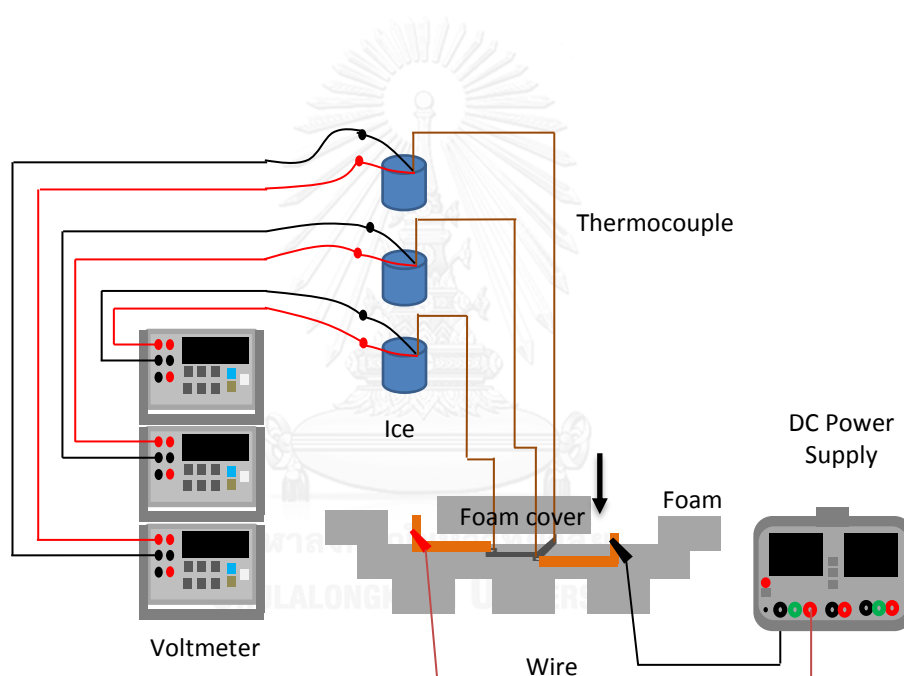
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY (ก)



(ข)

รูปที่ ข.1 (ก) วิธีการต่ออุปกรณ์เพื่อสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล, (ข) รายละเอียดของสายเทอร์โมคัปเปิล

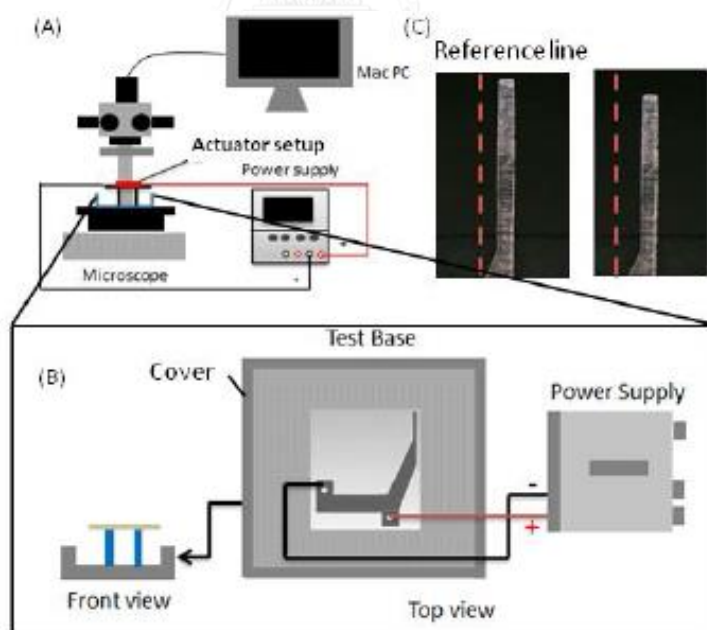
ขั้นตอนหลังจากทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแล้วคือ การนำเทอร์โมคัปเปิลไปวัดอุณหภูมิแอกซ์ฮิวเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูปที่ ข.2 โดยวิธีการต่ออุปกรณ์เพื่อทำการวัดนั้นแสดงในรูปที่ ข.2 ซึ่งการต่อนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับการสอบเทียบ แต่หัวที่เคยจุ่มลงในฮีทเตอร์นั้นเปลี่ยนมาสัมผัสกับผิวแอกซ์ฮิวเตอร์ตามตำแหน่งที่ต้องการวัดซึ่งมีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง โดยให้สายเทอร์โมคัปเปิลที่จะไปวัดนั้นเจาะผ่านโฟมเพื่อให้โฟมซึ่งมีความแข็งแรงอยู่แล้วช่วยในการล๊อคสายเทอร์โมคัปเปิลไม่ให้เคลื่อนจากตำแหน่งที่ทำการวัด จากนั้นจึงป้อนกระแสไฟฟ้าตรงเข้าสู่แอกซ์ฮิวเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 3, 4 และ 5 A เป็นเวลา 30 วินาที แล้วบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์ทุกๆ 5 วินาที จนครบ 30 วินาที แล้วจึงนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแปลงเป็นอุณหภูมิด้วยสมการที่ได้จากการสอบเทียบของเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ ข.2 วิธีการต่ออุปกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิของแอกซ์ฮิวเตอร์

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

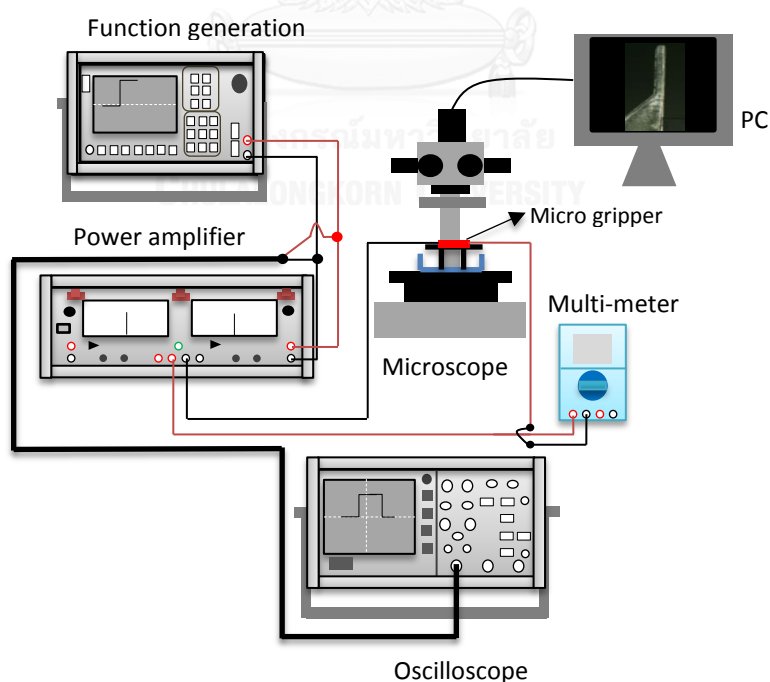
การทดสอบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าตรงขนาด 3, 4, และ 5 A ปล่องเข้าไปที่แอคชูเอเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างแกนเล็กและแกนใหญ่ที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ คือ 100, 200, 300 และ 400 ไมโครเมตร พร้อมกับบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอคชูเอเตอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยทำการบันทึกวิดีโอเป็นเวลา 30 วินาทีที่ปล่องกระแสไฟฟ้าเข้าไปและบันทึกวิดีโอต่ออีก 30 วินาทีหลังจากปิดกระแสไฟฟ้าเพื่อดูการคืนกลับของแอคชูเอเตอร์ ซึ่งในแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบกระแสไฟฟ้าเสร็จจควรจะพักแอคชูเอเตอร์ไว้ประมาณ 3 นาที ก่อนทำการทดสอบที่กระแสไฟฟ้าอื่น เพื่อระบายความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่ทำการทดสอบไป เมื่อได้วิดีโอที่บันทึกการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์แล้วจะนำมาแปลงเป็นไฟล์ภาพแต่ละเฟรมด้วยโปรแกรมแปลงไฟล์ Free video to JPG Converter แล้วนำไปเข้าโปรแกรม Photoshop เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอคชูเอเตอร์ โดยทำการสอบเทียบสเกลไมโครเมตรกับสเกลพิกเซล แล้วจึงสามารถวัดการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอคชูเอเตอร์ในแต่ละเฟรมได้ ซึ่งวิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติแสดงในรูป ข.3



รูปที่ ข.3 วิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

การทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต

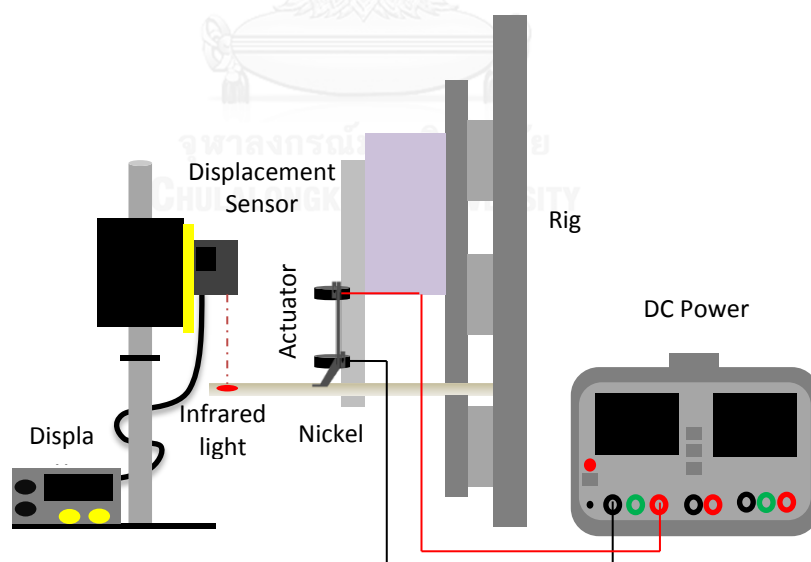
วิธีการทดลองการตอบสนองเชิงพลวัตนั้นจะสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยเครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้า 4A ที่ความถี่ 0.1 ,0.5 1, 5 Hz เข้าไปที่เครื่องเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์เพื่อขยายสัญญาณเป็นกำลังไฟฟ้าไปที่แอกซ์เวเตอร์ให้ทำงาน โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปต่อที่สัญญาณขาออกของเครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เพื่อเช็คสัญญาณที่สร้างออกมาว่าเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม โดยทั่วไปที่เครื่องเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์จะมีเข็มบอกค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าบอกไว้อยู่แล้วแต่ทางผู้วิจัยต้องการยืนยันว่ากระแสไฟฟ้าจริงๆที่ออกมาจากเครื่องเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์มีค่าเท่าไร จึงได้ใช้มัลติมิเตอร์มาต่อให้เป็นแบบอนุกรมในช่วงไฟขาออกจากเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์ไปขั้วตัวแอกซ์เวเตอร์ โดยในการปรับค่ากระแสไฟฟ้านั้นทางผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวปรับขนาดกระแสไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนค่า V_{pp} ในโหมดของฟังก์ชันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถหมุนปรับซ้ายขวาแล้วตรวจสอบที่มัลติมิเตอร์ได้ว่ากระแสไฟฟ้าขาออกจากเพาเวอร์แอมพลิฟายเออร์มีค่าตามต้องการหรือไม่ โดยการวัดการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นเวลา 30 วินาที แล้วใช้เทคนิคการวัดเหมือนกับการตอบสนองเชิงสถิต เพียงแต่การวัดครั้งนี้จะวัดการเคลื่อนที่เพียงแค่ 1 วงรอบเท่านั้น เพื่อดูการตอบสนองของแอกซ์เวเตอร์ต่อความถี่ใดๆที่ได้กำหนดไปก่อนหน้านี้ ซึ่งรายละเอียดการต่ออุปกรณ์นั้นแสดงในรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 วิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบการตอบสนองเชิงพลวัต

การวัดแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์

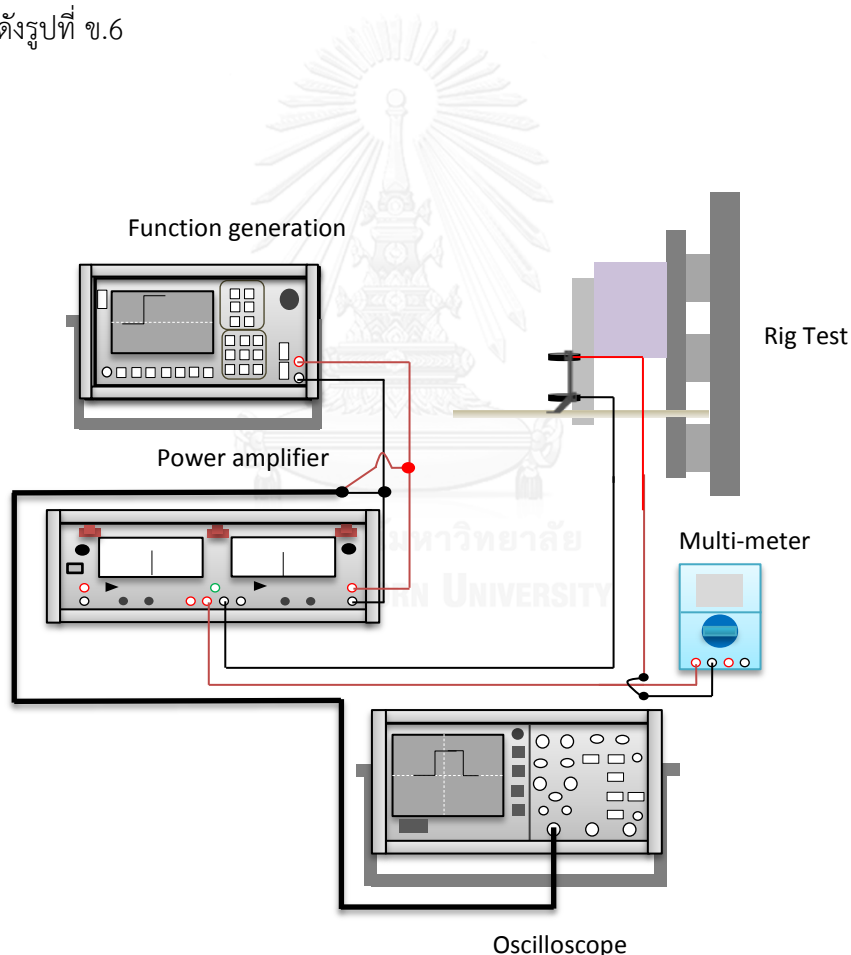
วิธีการวัดแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์นั้นจะใช้หลักการการโก่งตัวของคานโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงไปที่แอคชูเอเตอร์เหมือนกับการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิต โดยออกแบบให้แท่นทดสอบสามารถยึดแอคชูเอเตอร์ให้ทำงานได้ในแนวตั้งและสร้างคานจำลองไว้ให้ปลายแขนแอคชูเอเตอร์เคลื่อนที่ตกลงมาที่คานซึ่งทางผู้วิจัยกำหนดให้กระทำที่ตรงกลางคาน โดยทำการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงขนาด 3 และ 4 A เข้าไปที่แอคชูเอเตอร์ แล้วใช้ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์เป็นการวัดที่ปลายคานว่ามีการขยับลงไปเท่าไรจากเดิม ซึ่งการวางตำแหน่งดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์เพื่อทำการวัดระยะนั้นจะต้องให้แสงอินฟราเรดสูงห่างจากตำแหน่งที่ทำการวัด 8 – 15 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงการวัดที่ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์ชนิดนี้สามารถอ่านค่าได้ จากนั้นเมื่อเริ่มทำการป้อนกระแสไฟฟ้าทางผู้วิจัยจะทำการบันทึกระยะการเคลื่อนที่ที่อ่านได้จากดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์ทุกๆ 5 วินาที จนครบตามเวลา 30 วินาที ทั้งสองกระแสไฟฟ้า แล้วจึงนำระยะการเคลื่อนที่ของคานไปคำนวณหาแรงที่เกิดจากการกดของปลายแขนแอคชูเอเตอร์ สิ่งสำคัญในการทดสอบคือต้องให้ปลายแขนแอคชูเอเตอร์สัมผัสกับคานก่อนทุกครั้งและใช้สก็อตเทปใสบางๆพันรอบคานบริเวณที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์สัมผัสเพื่อป้องกันการขีดกันจากการสัมผัสของโลหะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับวัดแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์แสดงในรูป ข.5



รูปที่ ข.5 วิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับการวัดแรงที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์

การวัดความถี่ของแอกซ์เวเตอร์

หลักการวัดความถี่ของแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตอบสนองเชิงพลวัตควบคู่กับวิธีการวัดแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ โดยทำการใส่แรงกระทำกลับไปกลับมาที่ตรงกลางคานจำลองด้วยสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 1 Hz กระแสไฟฟ้าขนาด 3 และ 4 แอมแปร์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยที่ทุกๆชั่วโมงจะนำชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์มาทำการวัดแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์ที่เวลา 30 วินาที เพื่อดูว่าแรงที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงหรือไม่ในแต่ละชั่วโมงหรือในทุกๆ 3600 รอบของการทำงานเมื่อแอกซ์เวเตอร์ทำงานอย่างต่อเนื่องจนครบ 6 ชั่วโมง โดยการต่ออุปกรณ์เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าและสัญญาณไชนั้นจะใช้วิธีการต่อเหมือนการทดสอบเชิงพลวัตแต่การยึดจับแอกซ์เวเตอร์และคานจำลองนั้นจะใช้เป็นแทนทดสอบของวิธีการวัดแรงที่ปลายแขนแอกซ์เวเตอร์แสดงวิธีการต่อดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 วิธีการต่ออุปกรณ์สำหรับการวัดความถี่ของแอกซ์เวเตอร์

ภาคผนวก ค
ตารางค่าจากกราฟ

ตารางที่ ค.1 ค่าอุณหภูมิของแอกซ์เวเตอร์ที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ 1

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1 ($^{\circ}\text{C}$)		
	3A	4A	5A
0	26.9	26.9	27.1
5	26.9	26.9	27.1
10	26.9	26.9	27.1
15	26.9	26.9	27.1
20	26.9	26.9	27.1
25	26.9	26.9	27.1
30	26.9	26.9	27.1
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.3	0.2	0.1

ตารางที่ ค.2 ค่าอุณหภูมิของแอกซ์ฮิวเตอร์ที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ 2

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 2 ($^{\circ}\text{C}$)		
	3A	4A	5A
0	26.7	27.1	26.9
5	27.2	27.8	29.1
10	27.9	29.2	32.4
15	28.6	30.5	35.8
20	29.1	32.6	39.4
25	29.7	33.1	41.9
30	30.1	34	44.8
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.7	2.3	2.2

ตารางที่ ค.3 ค่าอุณหภูมิของแอกซ์ฮิวเตอร์ที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ 3

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 3 ($^{\circ}\text{C}$)		
	3A	4A	5A
0	24.8	25.6	25.6
5	25	27	28.3
10	25.6	28.5	33.5
15	26.2	29.9	37.7
20	26.7	30.9	41.2
25	27	31.8	44.2
30	27.4	32.6	46.8
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	1	2.6	5

ตารางที่ ค.4 ระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนแอคชูเอเตอร์หรือระยะกระดก

ระยะห่างระหว่าง แขนเล็กและแขน ใหญ่ (μm)	ระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนแอคชูเอเตอร์ (μm)		
	3A	4A	5A
100	42	101	152
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	14	22	25
200	67	142	250
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	8	16	18
300	32	68	103
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	4	6	7
400	28	51	88
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (μm)	5	6	8

ตารางที่ ค.5 ค่าแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 3 แอมแปร์

เวลา (วินาที)	แรงที่ปลายแขน (mN)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mN)
0	0	0
5	1.2	0.1
10	1.4	0.08
15	1.5	0.08
20	1.6	0.13
25	1.68	0.13
30	1.68	0.13

ตารางที่ ค.6 ค่าแรงที่ปลายแขนแอกซ์ฮิวเตอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 4 แอมแปร์

เวลา (วินาที)	แรงที่ปลายแขน (mN)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mN)
0	0	0
5	3.3	0.32
10	3.7	0.35
15	4.2	0.22
20	4.4	0.21
25	4.6	0.21
30	4.7	0.3

ตารางที่ ค.7 ค่าแรงที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์จากการทดสอบความล้าของแอคซิวเอเตอร์
ด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 3 แอมแปร์

เวลา (ชั่วโมง)	แรงที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ (mN)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	2.7	2.4	2
2	4.3	3.5	4
3	3.5	3.5	3.5
4	2.9	3.5	2.7
5	2.9	2.7	2.7
6	2.9	2.7	2.7

ตารางที่ ค.8 ค่าแรงที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์จากการทดสอบความล้าของแอคซิวเอเตอร์ด้วย
กระแสไฟฟ้าขนาด 4 แอมแปร์

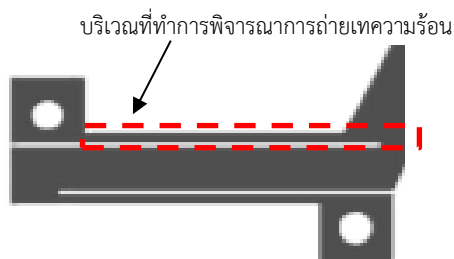
เวลา (ชั่วโมง)	แรงที่ปลายแขนแอคซิวเอเตอร์ (mN)		
	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
1	5.4	5.1	5.4
2	6.7	6.2	6.7
3	6.2	5.4	6.2
4	5.4	5.1	5.6
5	5.1	5.1	5.4
6	5.1	4.8	5.1

ตารางที่ ค.9 ค่าการสอบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิในช่วง 20-80 องศาเซลเซียส

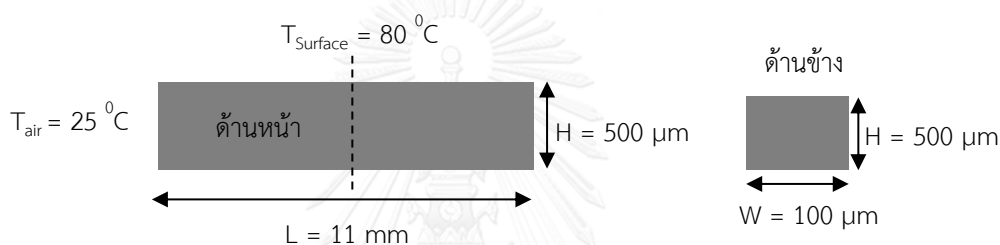
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (mV)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
20	0.74	0.72	0.72	0.73	0.73
25	0.97	0.97	0.95	0.96	0.94
30	1.17	1.17	1.17	1.17	1.14
35	1.38	1.37	1.38	1.37	1.35
40	1.58	1.56	1.58	1.6	1.56
45	1.79	1.78	1.8	1.8	1.78
50	1.99	1.99	2.01	2	1.99
55	2.2	2.2	2.21	2.22	2.2
60	2.41	2.41	2.43	2.43	2.41
65	2.62	2.62	2.63	2.63	2.61
70	2.83	2.84	2.85	2.85	2.82
75	3.02	3.05	3.06	3.06	3.04
80	3.24	3.27	3.27	3.28	3.26

ภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้างแอกซ์เอเตอร์



รูป ง.1 ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน



รูป ง.2 รายละเอียดทางกายภาพของแกนเล็กที่วางตั้งฉากกับพื้น

การวิเคราะห์การนำความร้อนและการพาความร้อนภายในแอกซ์เอเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกทำเฉพาะบริเวณที่มีอุณหภูมิเกิดขึ้นมากที่สุดเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้ ซึ่งบริเวณที่เลือกมาทำการวิเคราะห์คือ บริเวณแกนเล็กดังรูปที่ ง.1 โดยการวิเคราะห์นี้ได้กำหนดการวางตัวของแอกซ์เอเตอร์ให้ตั้งฉากกับพื้น รวมถึงขนาดและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแกนเล็กเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่แอกซ์เอเตอร์แสดงดังรูปที่ ง.2 ซึ่งวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแสดงได้ดังต่อไปนี้

กำหนดสมมุติฐานสำหรับการวิเคราะห์

1. One dimensional heat transfer by conduction
2. One dimensional heat transfer by natural convection
3. Steady-state conditions.
4. Thermal conductivities are uniform
5. Constant properties.
6. Radiation is negligible

คุณสมบัติทางกายภาพของแขนเล็กและอากาศโดยรอบ

$$T_f = (T_s + T_{air})/2 = (80+25)/2 = 52.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 325.52 \text{ K}$$

$$\nu @ (325.52 \text{ K}) = 18.45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha @ (325.52 \text{ K}) = 26.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\beta = 1/T_f = 0.003 \text{ K}^{-1}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$k_{air} @ (325.52 \text{ K}) = 28.18 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$$

$$k_{nickel} @ (353 \text{ K}) = 84.93 \text{ W/m K}$$

โหมดการนำความร้อน



รูป ง.3 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการนำภายในแขนเล็กของ
แอกซ์ไอเตอร์

พื้นที่ที่มีการนำความร้อนในแขนเล็ก

$$A = 100 \text{ } \mu\text{m} \times 500 \text{ } \mu\text{m} = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

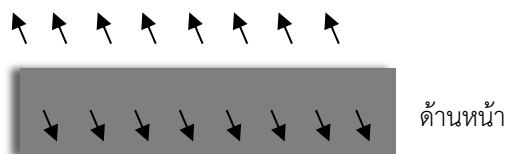
คำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ

$$q_{cond} = \frac{kA\Delta T}{L}$$

$$q_{cond} = (84.93) \times (5 \times 10^{-8}) \times (80 - 25) \div (0.011)$$

$$q_{cond} = 21.2 \text{ mW}$$

โหมดการพาความร้อน (การพาความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ)



รูป ง.4 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบวิธีธรรมชาติของแขน
เล็กที่แอกซ์ฮอเตอร์วางตั้งฉากกับพื้น

พื้นที่ที่มีการพาความร้อนในแนวแกนนอนของแขนเล็กผิวบน

$$A_U = [(500 \mu\text{m} \times 11 \text{ mm})] = 55 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

พื้นที่ที่มีการพาความร้อนในแนวแกนนอนของแขนเล็กผิวล่าง

$$A_B = [(500 \mu\text{m} \times 11 \text{ mm})] = 55 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

ความยาวเฉพาะตัว(Characteristics length)

$$L = 5 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (\text{ใช้ความสูงของแขนเล็กที่วางตั้งฉากกับพื้น})$$

คำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาในแนวแกนนอนของแขนเล็กทั้งสองผิว(ผิวบน+ผิวล่าง)

$$\text{Reyleigh No.} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = \frac{(9.81) \times (0.003) \times (80 - 25) \times (5 \times 10^{-4})^3}{(18.45 \times 10^{-6}) \times (26.27 \times 10^{-6})} = 0.4174$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(0.4174)^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / 0.7034)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\overline{Nu}_L = 1.22$$

$$\bar{h} = \overline{Nu}_L \times \frac{k_{air}}{L} = \frac{(1.22) \times (28.18 \times 10^{-3})}{(5 \times 10^{-4})} = 68.82 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

คำนวณค่าการพาความร้อนของผิวบนและผิวล่าง

$$q_{conv} = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) = (68.82) \times ((55 + 55) \times 10^{-7}) \times (80 - 25) = 41.6 \text{ mW}$$

สรุปได้ว่าการพาความร้อนภายในโครงสร้างแอกซ์ฮอเตอร์ส่งผลมากกว่าการนำความร้อน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอิทธิพล เจริญบุญญาฤทธิ เกิดเมื่อวันที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนโตของนายพิมล เจริญบุญญาฤทธิ และนางสุพร เจริญบุญญาฤทธิ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2553 และได้เข้ามาศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

