

การประยุกต์ใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและเทคนิคการสเปกโตรริงในการสร้างแอคซัวเตอร์
ลักษณะคานสองชั้นแบบโลหะผสมจำรูป

นายเอกยุทธ ว่องวีระยุทธ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

APPLICATION OF ELECTROPLATING AND SPUTTERING TECHNIQUES IN
FABRICATION OF SHAPE MEMORY ALLOY BIMORPH ACTUATOR

Mr.Eakayoot Wongweerayoot

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและ
เทคนิคการสเปกโตรริงในการสร้างแอคซิวเอเตอร์
ลักษณะคานสองชั้นแบบโลหะผสมจำรูป

โดย

นายเอกยุทธ ว่องวีระยุทธ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

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

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรมวานิช)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

เอกยุทธ ว่องวีระยุทธ : การประยุกต์ใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและเทคนิคการสเป็คเตอรืงในการสร้างแอคชูเอเตอร์ลักษณะคานสองชั้นแบบโลหะผสมจำรูป. (APPLICATION OF ELECTROPLATING AND SPUTTERING TECHNIQUES IN FABRICATION OF SHAPE MEMORY ALLOY BIMORPH ACTUATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน, 119 หน้า.

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนากระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นซึ่งประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดง โดยกระบวนการสร้างเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อนและไม่ใช้แผ่นซิลิกอนเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาเริ่มจากสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวที่มีความหนา 12 ไมโครเมตร ด้วยเทคนิคการชุบโลหะไฟฟ้าเคมีลงบนแผ่นสแตนเลสที่มีการสร้างแบบหล่อด้วยโฟโตรีซิสเป็นรูปร่างของไมโครแอคชูเอเตอร์อยู่ด้านบน หลังจากนั้นจึงนำไปล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างทองแดงหลุดออกมา ในขั้นตอนต่อไปจึงนำโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวไปเคลือบฟิล์มนิทินอลที่มีความหนา 5 ไมโครเมตร ด้วยเทคนิคการสเป็คเตอรืงแล้วจึงนำไมโครแอคชูเอเตอร์ไปทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิสูงด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์ โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน ไมโครแอคชูเอเตอร์ที่สร้างขึ้นมีรูปร่างคล้ายตัวคว่ำประกอบด้วยขา 2 ข้าง (0.25x22 ตารางมิลลิเมตร) และส่วนปลาย (3x3 ตารางมิลลิเมตร) งานวิจัยได้ทำการทดลองอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิ 500, 600 และ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที และทำการทดสอบคุณลักษณะจำเพาะของฟิล์มนิทินอลด้วยวิธีต่างๆพบว่า การอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียส สามารถสร้างฟิล์มนิทินอลที่มีโครงสร้างผลึกได้ แต่จะเกิดออกไซด์บนผิวฟิล์มหลังการอบแล้ว หลังจากนั้นได้นำไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตลักษณะเบนราบและโค้ง (รัศมีความโค้ง 22 มิลลิเมตร) ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มาทำการทดสอบด้วยการวัดระยะกระดกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนแก่ไมโครแอคชูเอเตอร์ โดยตรงพบว่า ไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ทำการอบจะมีระยะกระดกที่สูงกว่าไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการอบแต่ลักษณะในการอบส่งผลต่อระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการอบกับไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อเบนราบและโค้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 0.57, 0.94 และ 0.84 มิลลิเมตร ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบวัดระยะกระดกของไมโครแอคชูเอเตอร์ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 0.50-1.25 แอมแปร์ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0.5-2.5 เฮิรตซ์แก่ไมโครแอคชูเอเตอร์พบว่า ระยะระหว่างระยะกระดกสูงสุดกับระยะกระดกต่ำสุดของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการอบกับไมโครแอคชูเอเตอร์ที่อบด้วยแบบหล่อเบนราบและโค้ง ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์และความถี่ 0.5 เฮิรตซ์จะมีค่าเท่ากับ 0.12, 1.7 และ 1.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา..... 2555.....

5370391521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MICRO-ACTUATOR / SHAPE MEMORY ALLOY / BIMORPH / FABRICATION PROCESS / ELECTROPLATING TECHNIQUE / SPUTTERING TECHNIQUE

EAKAYOOT WONGWEERAYOOT : APPLICATION OF ELECTROPLATING AND SPUTTERING TECHNIQUES IN FABRICATION OF SHAPE MEMORY ALLOY BIMORPH ACTUATOR. ADVISOR : ASSIST. PROF. ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., 119 pp.

This study aims to develop a new fabrication process of SMA nitinol-copper bimorph actuator that is simple and does not require a silicon substrate. For proposed fabrication process, a 12- μm freestanding copper's structure is initially formed by electroplating technique to deposit copper on stainless substrate between photoresist molds. After achieving the desired thickness, the photoresist mold is removed using Sodium Hydroxide to release copper's structure. Consequently, a 5- μm nitinol thin film is deposited on freestanding copper's structure by sputtering technique, and the crystallization is then performed at high temperature in a quartz tube furnace with argon overflow. The geometry of actuator is designed as reverse U shape including two legs ($0.25 \times 22 \text{ mm}^2$) and square tip ($3 \times 3 \text{ mm}^2$). The effect of the crystallization is investigated under various temperature conditions, i.e. 500, 600 and 650 °C, for 30 minutes and pre-stressing condition inside mold, i.e. straight and curve molds (radius of curvature of 22 mm). With X-ray diffraction, Energy-dispersive spectroscopy and Differential scanning calorimetry, the results show that, crystallizing temperature at 600 and 650 °C are able to organize crystal structure of nitinol. However, oxide on surface is still unavoidable after crystallization. To compare the performance of actuator at these different crystallization conditions, three bimorph actuators, i.e. without crystallization, with crystallization at 650 °C in straight and curve molds, are tested in two experiments. In the first experiment, the deflection of actuator while applying temperature between 20-100 °C to actuator directly is examined. The results show that, crystallized actuators have larger deflection than that without crystallization. In addition, the effect of pre-stressing condition on the deflection is relatively small. The deflection of the actuator without crystallization and that is crystallized in straight and curve molds are 0.57, 0.94 and 0.84 mm at 80 °C, respectively. In the second experiment, the deflection of actuator while applying current of 0.50-1.25 A at frequency of 0.5-2.5 Hz is examined. The results are quite similar to the previous experiment. The deflection amplitude of the actuator without crystallization actuator and that is crystallized in straight and curve molds are 0.12, 1.7 and 1.3 mm at 1.25 A and 0.5 Hz, respectively.

Department : ...Mechanical Engineering... Student's Signature.....

Field of Study : ...Mechanical Engineering... Advisor's Signature.....

Academic Year : ...2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการช่วยเหลือจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ "ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ" ซึ่งท่านได้เสียสละทั้งเวลางานและเวลาส่วนตัวให้ความรู้ คำแนะนำและแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ทั้งด้านงานวิจัยและการดำเนินชีวิตที่เป็นประโยชน์ ยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ได้ผลักดันผู้วิจัยให้มีกำลังใจในการทำงานวิจัยฉบับนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก "ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย" จากกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 18 (2/2555)

ขอขอบพระคุณดร.อนุรัตน์ วิสิษฐสุวรรณ และนักวิจัยของหน่วยปฏิบัติการนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ขอขอบคุณพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาชาย เหลืองวรรณท์ และนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณนิสิตของห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์เอ็นจิเนียริง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนและเอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและนาโนเทคโนโลยีแห่งนี้ ผู้วิจัยได้รับกำลังใจ ความสุข ความเอื้อเฟื้อ และคำแนะนำมากมายจาก พี่ เพื่อน และน้องในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งแก่ พี่กฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ พี่กรกช เพชรดี พี่ภากร นนทวัฒน์วิช พี่ปริญเอก ร่มไตรรัตน์ พี่เชาวนพันธ์ เหล็กขำ พี่สมพงษ์ เจริญบุญลย์วิวัฒน์ พี่เกษม ดันธนะศิริวงศ์ พี่ในห้องปฏิบัติการที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยด้วยความยินดีมาตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ นายเกริกฐากร พันธุ์พัฒนกุล นายสรายุทธ แสงผล รวมถึงเพื่อนที่เรียนปริญญาโทมาด้วยกันทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและร่วมฟันฝ่าอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน และขอขอบคุณน้องวิศวกรรมนาโนรุ่นที่ 3 และรุ่นที่ 4 ที่คอยให้กำลังใจและสร้างความสนุกสนานแก่ผู้วิจัยมาตลอด

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณ นายไพบูลย์ ว่องวีระยุทธ และนางลัดดา ว่องวีระยุทธ บิดา-มารดาของผู้วิจัยที่ได้เลี้ยงดูและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 หลักการของไมโครแอกซ์เอเตอร์.....	2
1.3 หลักการโลหะผสมจำรูปและการประยุกต์ใช้งานที่ผ่านมา	5
1.4 ปัญหาของการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบคานสองชั้น.....	8
1.5 กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ใช้เทคนิคเป็นส่วนประกอบ.....	16
1.5.1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยเทคนิค.....	16
1.5.2 กระบวนการอบหลังจากเคลือบผิวด้วยเทคนิค	17
1.6 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย	18
1.7 วัตถุประสงค์.....	19
1.8 ขอบเขตงานวิจัย	19
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	20
1.10 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย	20
บทที่ 2 แนวคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของไมโครแอกซ์เอเตอร์	22
2.1 การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทาง ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	23
2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มี ลักษณะเป็นคานสองชั้น	28
2.3 สรุปผลการศึกษาพารามิเตอร์ของไมโครแอกซ์เอเตอร์	32
บทที่ 3 กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์	34
3.1 กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว.....	34

3.1.1	ขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ.....	35
3.1.2	ข้อจำกัดในการสร้างแบบหล่อ	37
3.1.3	ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี.....	38
3.1.4	ข้อจำกัดในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี.....	41
3.2	กระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิตินอล	43
3.2.1	ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอล	43
3.2.2	ข้อจำกัดในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอล	44
3.2.3	ขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอล.....	45
3.2.4	ข้อจำกัดในขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอล	47
3.3	อิทธิพลของการอบฟิล์มที่อุณหภูมิสูงต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิตินอล	48
3.3.1	การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	49
3.3.2	การทดสอบฟิล์มนิตินอลด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน	51
3.3.3	การทดสอบฟิล์มนิตินอลด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน	57
3.4	สรุปผลการสร้างไมโครแอคชัวเอเตอร์แบบใหม่	60
บทที่ 4	การทดสอบไมโครแอคชัวเอเตอร์.....	64
4.1	การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์.....	65
4.2	สรุปผลการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์.....	68
4.3	การทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์	71
4.4	สรุปผลการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์.....	75
4.5	การประยุกต์ใช้งานไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่สร้างขึ้น	79
4.6	สรุปผลการทดสอบไมโครแอคชัวเอเตอร์.....	82
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย	84
	รายการอ้างอิง	90
	ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก	วัสดุอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างไมโครแอคชัวเอเตอร์	94
ภาคผนวก ข	เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะจำเพาะของไมโครแอคชัวเอเตอร์	106
ภาคผนวก ค	การทดสอบไมโครแอคชัวเอเตอร์เบื้องต้น.....	110
ภาคผนวก ง	ชุดอุปกรณ์และการจัดการผลในการทดสอบไมโครแอคชัวเอเตอร์.....	114

ณ

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 119

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่สำคัญของหลักการต่างๆที่นำมาประยุกต์ใช้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	4
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเงิน ทองแดงและนิกเกิล	22
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดในการกำหนดค่าภายในโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ANSYS.....	23
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุในการทำนายระยะครัคด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ANSYS	24
ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของคานร่วมกับความหนาของทองแดงในโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ANSYS	25
ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	31
ตารางที่ 2.6 พารามิเตอร์ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของคานร่วมกับความหนาของทองแดง.....	32
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี	40
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในขั้นตอนการอบฟิล์มนิกเกิล.....	49
ตารางที่ 3.3 กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว.....	62
ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล	63
ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการอบฟิล์มนิกเกิล	63
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์กับสอตเพลตและอากาศภายนอก	71
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์	73
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบเมื่อได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์.....	79

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1	กราฟระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับระยะขยับสูงสุดของแอกซ์ฮูเอเตอร์ [1]3
ภาพที่ 1.2	กราฟระหว่างความถี่สูงสุดในการใช้งานและระยะขยับสูงสุดของ แอกซ์ฮูเอเตอร์ [1] 3
ภาพที่ 1.3	กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุโลหะผสมจำรูป6
ภาพที่ 1.4	โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะผสมจำรูป7
ภาพที่ 1.5	ปั๊มขนาดเล็กที่มีนิตินอลทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม [5].....7
ภาพที่ 1.6	วาล์วขนาดเล็กที่มีนิตินอลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแผ่นเมมเบรน [6].....7
ภาพที่ 1.7	วาล์วนิตินอลขนาดเล็กที่มีการเปิดปิดการไหลจากภายนอกของท่อลำเลียง ของเหลว [7] 8
ภาพที่ 1.8	ตะขอนิตินอลขนาดเล็ก [8]..... 8
ภาพที่ 1.9	ลักษณะการขยับตัวหรือการกระดกของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็น คานสองชั้น9
ภาพที่ 1.10	กรงเล็บขนาดเล็ก [9]..... 10
ภาพที่ 1.11	ไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายหูด [10] 10
ภาพที่ 1.12	อุปกรณ์หีบจับขนาดเล็ก [11]..... 10
ภาพที่ 1.13	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัย Luo et al. [9]..... 13
ภาพที่ 1.14	กระบวนการสร้างในงานวิจัยของ Kim et al. [12]..... 13
ภาพที่ 1.15	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Qu et al. [13]..... 14
ภาพที่ 1.16	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Lin et al. [14]..... 14
ภาพที่ 1.17	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Bullen et al. [15]..... 15
ภาพที่ 1.18	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Gill et al. [11] 15
ภาพที่ 1.19	ลักษณะการเสียหายของไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Gill et al. [11] 16
ภาพที่ 1.20	หลักการทำงานของเทคนิคการสปีดเตอริง..... 17
ภาพที่ 1.21	กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์ฮูเอเตอร์แบบใหม่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ 19
ภาพที่ 2.1	ลักษณะของคานที่นำมาศึกษาในโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ANSYS24
ภาพที่ 2.2	แนวคิดในการหาระยะของคานจากการคำนวณ25

ภาพที่ 2.3	ลักษณะการกระดกของคานที่มีทองแดงหนา 12 ไมโครเมตรในโปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์ ANSYS	27
ภาพที่ 2.4	ระยะกระดกของคานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของทองแดงโดยมี ความหนานิทีนอลเท่ากับ 5 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิต่างๆ โดยระเบียบวิธีการ ไฟไนต์อิลิเมนต์ (เส้นทึบ) และการคำนวณ (เส้นประ)	28
ภาพที่ 2.5	รูปแบบการนำความร้อนทางเดียว (One-dimensional heat conduction)	29
ภาพที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์มีค่า เท่ากับ 80 องศาเซลเซียสกับขนาดต่างๆของไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	32
ภาพที่ 3.1	กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว	34
ภาพที่ 3.2	แผ่นสแตนเลสที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ.....	36
ภาพที่ 3.3	แผ่นแบบลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง.....	37
ภาพที่ 3.4	แผ่นสแตนเลสหลังจากการสร้างแบบหล่อ	37
ภาพที่ 3.5	ขนาดขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ	38
ภาพที่ 3.6	ไดอะแกรมของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี	39
ภาพที่ 3.7	โครงสร้างทองแดงลอยตัวที่งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างขึ้น	41
ภาพที่ 3.8	ภาพตัดขวางของโครงสร้างทองแดงลอยตัวซึ่งมีความหนาเท่ากับ 12.2±0.8 ไมโครเมตร.....	41
ภาพที่ 3.9	ลักษณะของไมโครแอกซ์เวเตอร์หลังจากทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีโดยจ่าย กระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.5 แอมแปร์	42
ภาพที่ 3.10	กระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิทีนอล และการอบที่อุณหภูมิสูง	43
ภาพที่ 3.11	ลักษณะการวางโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวบนฐาน	44
ภาพที่ 3.12	ภาพตัดขวางของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยนิทีนอลบนโครงสร้างทองแดง ลอยตัวมีความหนาเท่ากับ 5.8±0.4 ไมโครเมตร	45
ภาพที่ 3.13	แผนผังของเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน	46
ภาพที่ 3.14	ลักษณะการจัดวางไมโครแอกซ์เวเตอร์ภายในแบบหล่อคอนกรีต.....	47
ภาพที่ 3.15	แบบหล่อคอนกรีตและลักษณะการวางไมโครแอกซ์เวเตอร์ภายในแบบหล่อ คอนกรีต.....	47
ภาพที่ 3.16	ลักษณะของผิวฟิล์มนิทีนอลบนโครงสร้างทองแดง	49

ภาพที่ 3.17	ผลการทดสอบของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ ที่ทำการอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ	51
ภาพที่ 3.18	พื้นผิวของฟิล์มนิตินอล	53
ภาพที่ 3.19	ผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของฟิล์มนิตินอลที่ไม่ ทำการอบ	54
ภาพที่ 3.20	ผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของฟิล์มนิตินอลที่ทำการอบ ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที	54
ภาพที่ 3.21	แสดงตำแหน่งการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่ด้านตัดขวางของ ไมโครแอกซ์เวเตอร์	55
ภาพที่ 3.22	อัตราส่วนของธาตุนบนด้านตัดขวางของฟิล์มนิตินอลที่ไม่ทำการอบ ณ ตำแหน่ง ต่างๆ (ภาพที่ 3.21(ก)).....	56
ภาพที่ 3.23	อัตราส่วนของธาตุนบนด้านตัดขวางของฟิล์มนิตินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ณ ตำแหน่งต่างๆ (ภาพที่ 3.21(ข)).....	56
ภาพที่ 3.24	ผลทดสอบเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มนิตินอลที่ไม่ทำการอบและ ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที.....	58
ภาพที่ 3.25	ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มนิตินอล	59
ภาพที่ 4.1	ลักษณะในการจับยึดไมโครแอกซ์เวเตอร์สำหรับการทดสอบ	65
ภาพที่ 4.2	อุปกรณ์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ	66
ภาพที่ 4.3	ลักษณะการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส	69
ภาพที่ 4.4	ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์เมื่อทำการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิด้วยเครื่อง ฮอตเพลต	70
ภาพที่ 4.5	การเปรียบเทียบระยะกระดกต่ออุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบต่างๆ	71
ภาพที่ 4.6	อุปกรณ์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์	72
ภาพที่ 4.7	ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ ด้วยขนาดของกระแสไฟฟ้าคลื่น สี่เหลี่ยมต่างๆ.....	76
ภาพที่ 4.8	ลักษณะการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์หลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์	77

ภาพที่ 4.9	ระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ	78
ภาพที่ 4.10	อุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้น	80
ภาพที่ 4.11	หลักการการใช้งานอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้น.....	80
ภาพที่ 4.12	การจับเม็ด โฟม.....	81
ภาพที่ 4.13	การจับชิ้นพลาสติก	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างก้าวกระโดด โดยมีแนวโน้มที่จะสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดที่เล็กลง เพื่อเพิ่มสมรรถนะของอุปกรณ์ให้สูงขึ้นและลดต้นทุนในการผลิต ดังนั้นเทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (micro electro-mechanical system, MEMS) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตอุปกรณ์และวัสดุขนาดเล็ก เทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งานคือ ไมโครเซนเซอร์ (microsensor) และไมโครแอคชูเอเตอร์ (microactuator) ตัวอย่างอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้งานในลักษณะแบบเซนเซอร์ ได้แก่ เครื่องตรวจวัดความดันขนาดเล็ก (pressure sensor) เครื่องตรวจวัดความเร่งขนาดเล็ก (accelerometer) เป็นต้น ส่วนอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ใช้งานในลักษณะไมโครแอคชูเอเตอร์ ได้แก่ ปั๊มขนาดเล็ก (micropump) อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเชิงแสง (micromirror) วาล์วขนาดเล็ก (microvalve) มือจับขนาดเล็ก (microgripper) และอุปกรณ์รบกวนการไหลของของไหลขนาดเล็ก เป็นต้น โดยอุปกรณ์ทั้งสองอย่างมีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้สนใจในไมโครแอคชูเอเตอร์ในเทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค โดยไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ให้ความสนใจจะมีลักษณะเป็นคานสองชั้น (bimorph) และใช้หลักการโลหะผสมจำรูป (shape memory alloy) เข้ามาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนแต่อย่างไรก็ตามการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นโดยทั่วไปมีความซับซ้อนและทำให้อาจจะเกิดการเสียหายแก่ไมโครแอคชูเอเตอร์หรือตัวชิ้นงานได้ง่ายในระหว่างการผลิต ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงและมีระยะเวลาในการสร้างนาน สาเหตุหนึ่งของความซับซ้อนคือกระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์โดยทั่วไปดังกล่าวจำเป็นต้องสร้างบนแผ่นซิลิกอนและต้องอาศัยการกัดชิ้นงานจากด้านล่าง (under Etching) เพื่อปล่อยไมโครแอคชูเอเตอร์ให้เป็นอิสระ

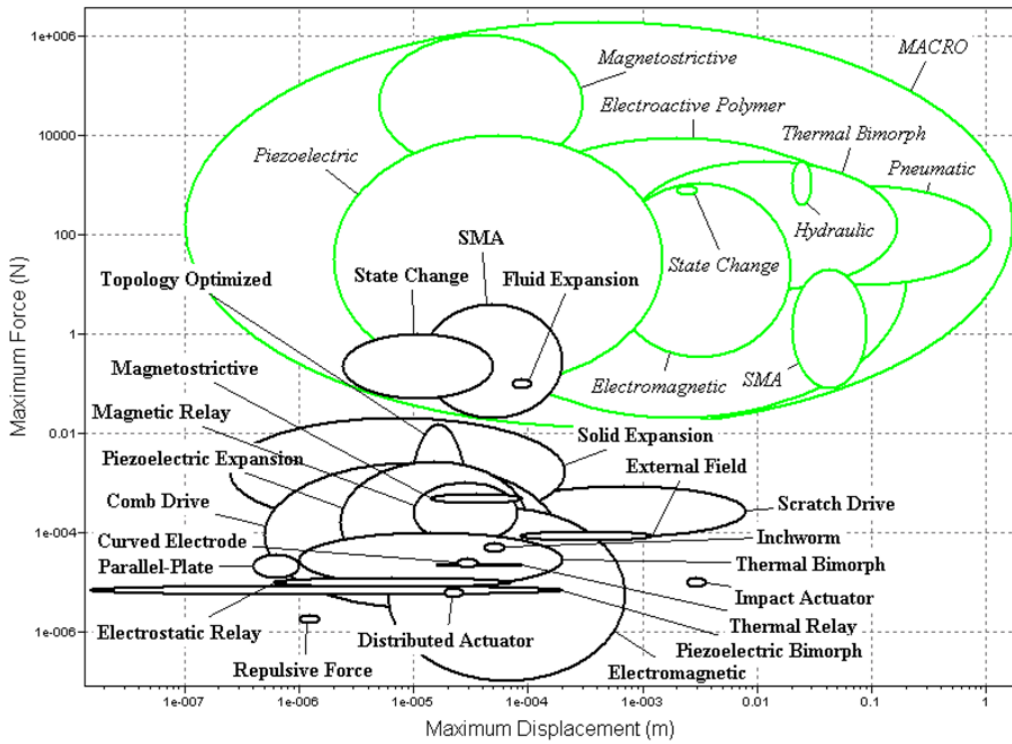
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์แบบใหม่โดยไม่ใช่แผ่นซิลิกอน เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนและความเสียหายของตัวไมโครแอคชูเอเตอร์หรือชิ้นงานเอง โดยกระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์แบบใหม่จะประกอบด้วยกระบวนการสร้างเพียง 2 ขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว (freestanding) โดยนำเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี (electroplating technique) มา

ประยุกต์ใช้ และกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้าง โดยนำเทคนิคการสปัตเตอร์ริง (sputtering technique) มาประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น ตัวอย่างเช่น คุณลักษณะจำเพาะของนิทินอล คุณสมบัติเชิงกลของไมโครแอคชูเอเตอร์ เป็นต้น โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยจะมีประโยชน์ในการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีความสมรรถนะที่ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นไมโครแอคชูเอเตอร์สำหรับงานวิศวกรรมในหลากหลายรูปแบบได้

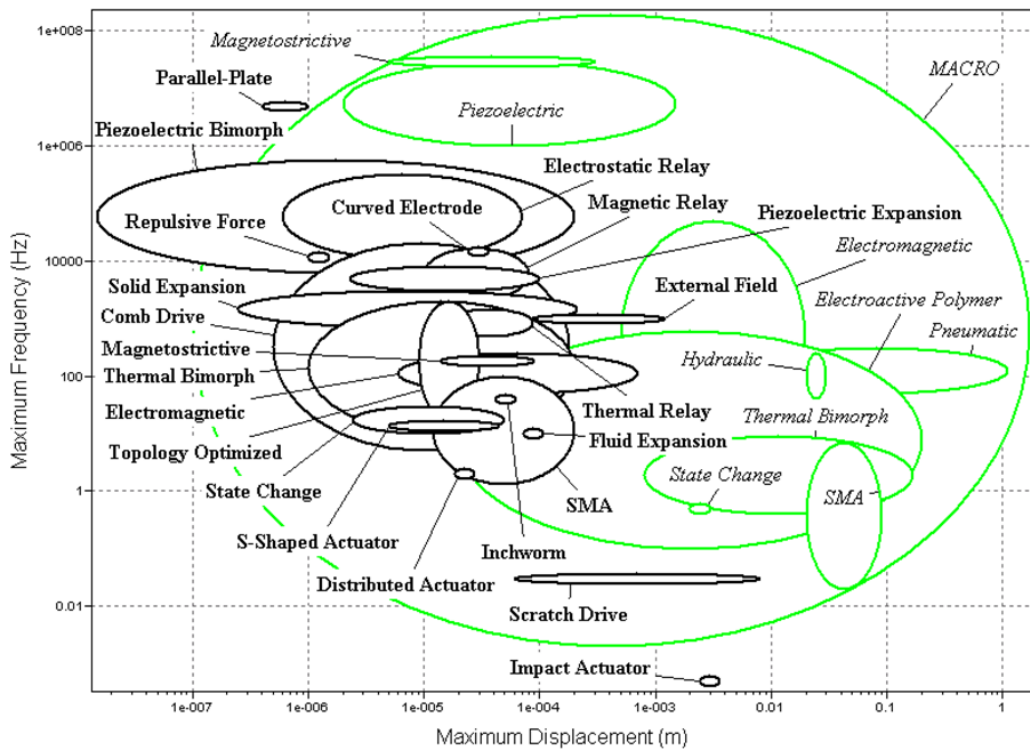
1.2 หลักการของไมโครแอคชูเอเตอร์

จากงานวิจัยของ Bell et al. [1] ที่ผ่านมามีการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์หลักการต่างๆ ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้กับไมโครแอคชูเอเตอร์ซึ่งแสดงในภาพที่ 1.1 และ ภาพที่ 1.2 โดยรูปดังกล่าวแสดงถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะซึ่งประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์หลักที่สำคัญคือ แรงกระทำสูงสุด (maximum force) ระยะขยับสูงสุด (maximum displacement) และความถี่สูงสุดในการใช้งาน (maximum frequency) จากรูปทั้งสองสามารถสรุปค่าเฉลี่ยของแรงกระทำ ค่าเฉลี่ยของระยะขยับ และค่าเฉลี่ยของความถี่ในการใช้งานของไมโครแอคชูเอเตอร์แต่ละหลักการได้ดังตารางที่ 1.1

ในการใช้งานทั่วไปไมโครแอคชูเอเตอร์ควรมีสมรรถนะในการทำงานดังนี้คือ มีระยะการขยับหรือระยะกระดกที่สูงและมีความถี่ในการใช้งานที่สูง เพื่อที่จะทำให้ไมโครแอคชูเอเตอร์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งจากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่า มีหลักการทั้งหมด 5 หลักการที่มีแนวโน้มที่ดีในสมรรถนะที่กล่าวถึง ได้แก่ หลักการดังนี้คือ Piezoelectric expansion, Shape memory alloy, Fluid expansion, Electromagnetic และ External magnetic field แต่อย่างไรก็ตามแต่ละหลักการยังมีข้อจำกัดในหลายๆด้าน ตัวอย่างเช่น ในหลักการ Electromagnetic จำเป็นต้องมีการติดตั้งแม่เหล็กลงไปทำให้ไม่สามารถสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กได้ ในหลักการ Piezoelectric จำเป็นต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง ในหลักการ Fluid expansion ไม่สามารถใช้ในสภาวะอุณหภูมิที่สูงได้ เนื่องจากจะทำให้ของเหลวในระบบเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซสำหรับหลักการ External field ก็ไม่สามารถนำไปใช้งานในสภาวะที่อุณหภูมิสูงได้เพราะจะทำให้สนามแม่เหล็กเสื่อมลงไป ดังนั้นหลักการที่เหมาะสมสำหรับการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีสมรรถนะที่สูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบคือ Shape memory alloy หรือหลักการโลหะผสมจำรูป



ภาพที่ 1.1 กราฟระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับระยะขยับสูงสุดของแอคชูเอเตอร์ [1]



ภาพที่ 1.2 กราฟระหว่างความถี่สูงสุดในการใช้งานและระยะขยับสูงสุดของแอคชูเอเตอร์ [1]

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่สำคัญของหลักการต่างๆที่นำมาประยุกต์ใช้กับไมโครแอกชูเอเตอร์

Principle	Displacement (mm)	Frequency (Hz)	Force (N)
Electrostatic			
- Scratch drive	0.7	0.225	0.002
- Impact actuator	3	0.003	0.00005
- Electrostatic relay	0.007	4×10^5	0.00005
Piezoelectric			
- Piezoelectric bimorph	0.0015	4×10^5	0.00004
- Piezoelectric expansion	0.015	8×10^3	0.001
Thermal			
- Thermal bimorph	0.015	900	0.00007
- Solid expansion	0.001	5×10^5	0.006
- Shape memory alloy	0.05	54	0.7
- Fluid expansion	0.09	50	0.5
- State change	0.01	63	0.65
Magnetic			
- Electromagnetic	0.06	100	0.00003
- External field	0.3	5×10^3	0.0001

จากการเปรียบเทียบข้างต้นจะเห็นได้ว่าหลักการโลหะผสมจำรูปเป็นหลักการหนึ่งในหลายๆหลักการที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับไมโครแอกชูเอเตอร์ เนื่องจากหลักการโลหะผสมจำรูปจะมีแอกชูเอเตอร์ที่กระทัดรัดเนื่องจากไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมจำนวนมาก โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนทำให้สะดวกต่อการประกอบอุปกรณ์และการควบคุมในการใช้งานทำได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามหลักการโลหะผสมจำรูปก็มีข้อเสียบางประการเช่น ประสิทธิภาพทางด้านพลังงานที่ต่ำ (<10%) เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่ต้องเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนเฟสของวัสดุ ความไวในการตอบสนองที่ค่อนข้างต่ำและพฤติกรรมของวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่อย่างไรก็ตามหลักการโลหะผสมจำรูปก็ยังมีข้อดีกว่าหลักการอื่นๆคือ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานต่อน้ำหนักอยู่ในระดับสูง [2] จึงทำให้หลักการโลหะผสมจำรูปเป็นทางเลือกที่ดี

สำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานที่ต้องการไมโครแอกซ์เวเตอร์ขนาดเล็กแต่มีกำลังงานสูงและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครแอกซ์เวเตอร์ในรูปแบบต่างๆได้มากมาย

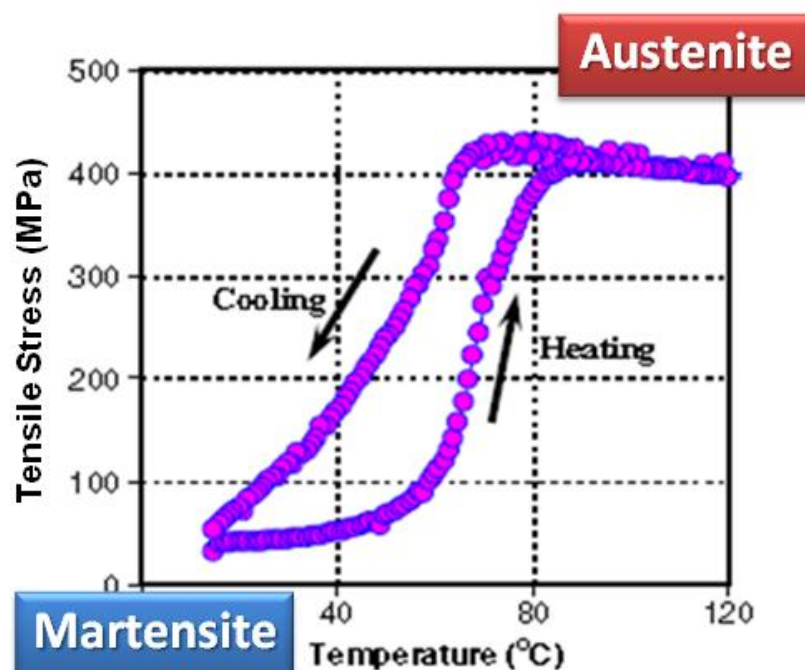
1.3 หลักการโลหะผสมจำรูปและการประยุกต์ใช้งานที่ผ่านมา

วัสดุโลหะผสมจำรูปเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำ เฟสของวัสดุโลหะผสมจำรูปจะเป็นมาร์เทนไซต์ (martensite) มีค่ามอดูลัสของยัง (young's modulus) และความเค้น (tensile stress) ในวัสดุค่อนข้างต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 1.3 ซึ่งทำให้วัสดุโลหะผสมจำรูปในเฟสมาร์เทนไซต์มีลักษณะอ่อนนุ่มและเหนียวสามารถออกแรงกระทำให้บิดงอเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย และหากวัสดุโลหะผสมจำรูปถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนรูป (transformation temperature) จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากมาร์เทนไซต์เป็นออสเทนไนต์ (austenite) ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยจะมีค่ามอดูลัสของยังและความเค้นในวัสดุเพิ่มขึ้น [3][4]

หากพิจารณาลักษณะของโครงสร้างจุลภาค (microstructure) หรือโครงสร้างผลึก (crystal structure) ของวัสดุโลหะผสมจำรูป จากภาพที่ 1.4 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างของวัสดุโลหะผสมจำรูปก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเป็นโครงสร้างแบบทวินด์มาร์เทนไซต์ (twinned martensite) เมื่อทำการตัดแปลงรูปร่างหรือมีแรงกระทำกับวัสดุโลหะผสมจำรูป นอกจากลักษณะของวัสดุโลหะผสมจำรูปที่ปรากฏจะเปลี่ยนไปแล้ว โครงสร้างภายในจะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่ถูกเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformed martensite) แต่เมื่อทำให้วัสดุโลหะผสมจำรูปร้อนขึ้นจนอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิเปลี่ยนรูป โครงสร้างของวัสดุโลหะผสมจำรูปจะเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ ซึ่งจะส่งผลให้รูปร่างของวัสดุโลหะผสมจำรูปมีลักษณะเหมือนรูปร่างเดิมก่อนที่จะถูกแรงภายนอกมากระทำ เมื่อปล่อยให้วัสดุโลหะผสมจำรูปเย็นลง โครงสร้างของวัสดุโลหะผสมจำรูปจะกลับไปเป็นทวินด์มาร์เทนไซต์อีกครั้งแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเลย

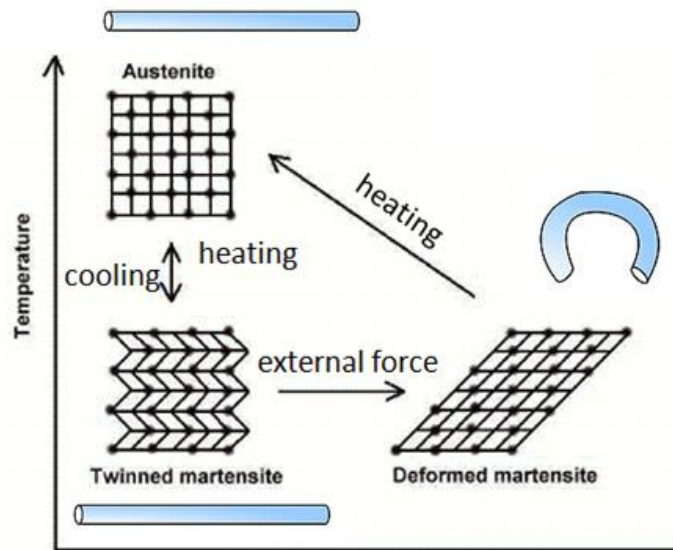
วัสดุโลหะผสมจำรูปนี้มีหลายชนิด เช่น Cu-Zn-Al, Au-Cd, Ni-Ti-Cu และโลหะผสมกลุ่มเหล็กอีกหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Ni-Ti หรือนินิทินอลเป็นวัสดุโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับไททานเนียมซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่นและมีการใช้งานกันแพร่หลายกว่าวัสดุโลหะผสมจำรูปชนิดอื่น เช่น อุณหภูมิในการใช้งานที่ไม่สูงนัก มีระยะขยับที่สูง มีแรงกระทำใช้งานที่สูง ทนต่อการกัดกร่อนและมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง ซึ่งนินิทินอลในหลักการของโลหะผสมจำรูปนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้หลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น ปืนขนาดเล็ก [5] ที่มีนินิทินอลทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรมเพื่อทำการดูดและส่งของไหลตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 1.5 โดยปืนขนาดเล็กแบบโลหะผสมจำรูปนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบลำเลียงยา

อีกตัวอย่างหนึ่งคือวาล์วขนาดเล็ก [6] ที่มีนิตินอลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแผ่นเมมเบรนโดยนำคุณสมบัติของนิตินอลไปประยุกต์ในการเปิด - ปิดของวาล์ว ดังแสดงดังภาพที่ 1.6 โดยเมื่อเพิ่มความร้อนให้นิตินอลจะทำให้นิตินอลมีอุณหภูมิสูงขึ้น นิตินอลจะหดตัวทำให้แผ่นเมมเบรนขยับขึ้นเป็นการเปิดวาล์วและเมื่ออุณหภูมิของนิตินอลเย็นลง นิตินอลจะยืดกลับที่ตำแหน่งเดิมทำให้แผ่นเมมเบรนขยับลงเป็นการปิดวาล์ว วาล์วยังมีหลายรูปร่างตัวอย่างหนึ่งคือวาล์วที่ใช้สำหรับท่อของเหลวขนาดเล็ก [7] ดังแสดงในภาพที่ 1.7 โดยแผ่นนิตินอลขนาดเล็กจะทำหน้าที่เป็นเหมือนวาล์วในการเปิด - ปิดการลำเลียงของสารแต่มีการควบคุมโดยการหนีบสายยางลำเลียงของเหลว นอกจากนี้ไมโครแอกชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่ใช้นิตินอลก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ตะขอนิตินอลขนาดเล็ก [8] แสดงในภาพที่ 1.8 เป็นการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์แบบโครงสร้างสองชั้นระหว่างนิตินอลกับไททาเนียมที่มีรูปแบบเป็นตะขอ โดยมีหลักการใช้งานคือที่อุณหภูมิต่ำตะขอจะมีรูปร่างคล้ายตัวซี เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตะขอนิตินอลจะหดกลับและทำการจับยึดสิ่งที่ต้องการได้ สำหรับโครงสร้างแบบคานสองชั้นนี้จะทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์มีสมรรถนะสูงขึ้นและออกแบบให้มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรมในรูปแบบหลากหลายมากขึ้น

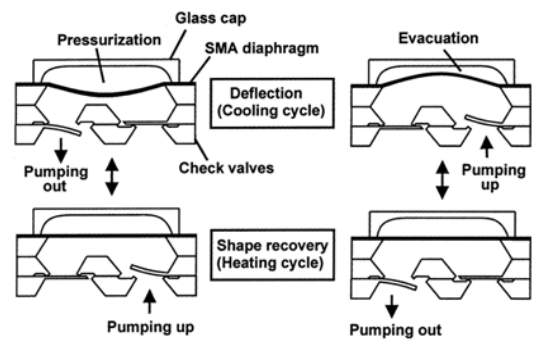
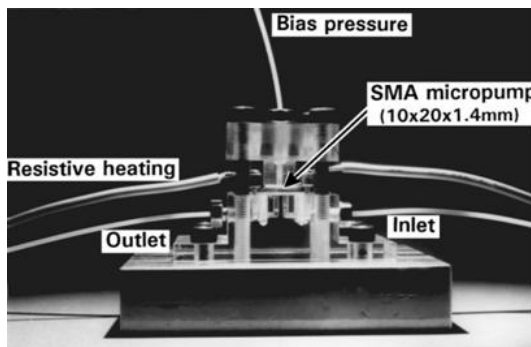


Stress evolution VS Temperature of SMA film

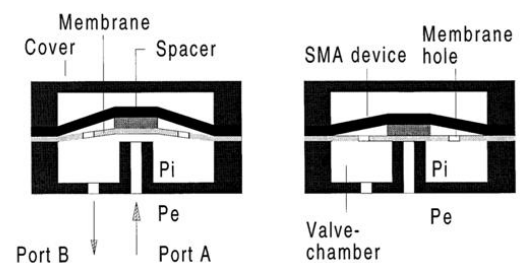
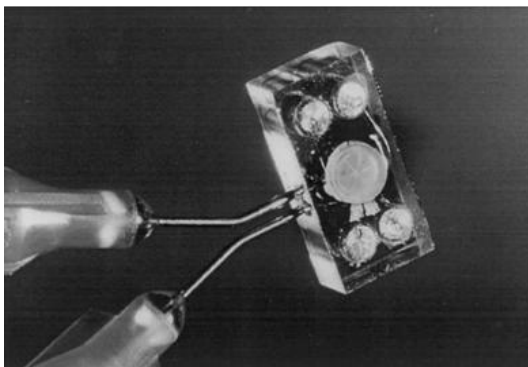
ภาพที่ 1.3 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุโลหะผสมจำรูป



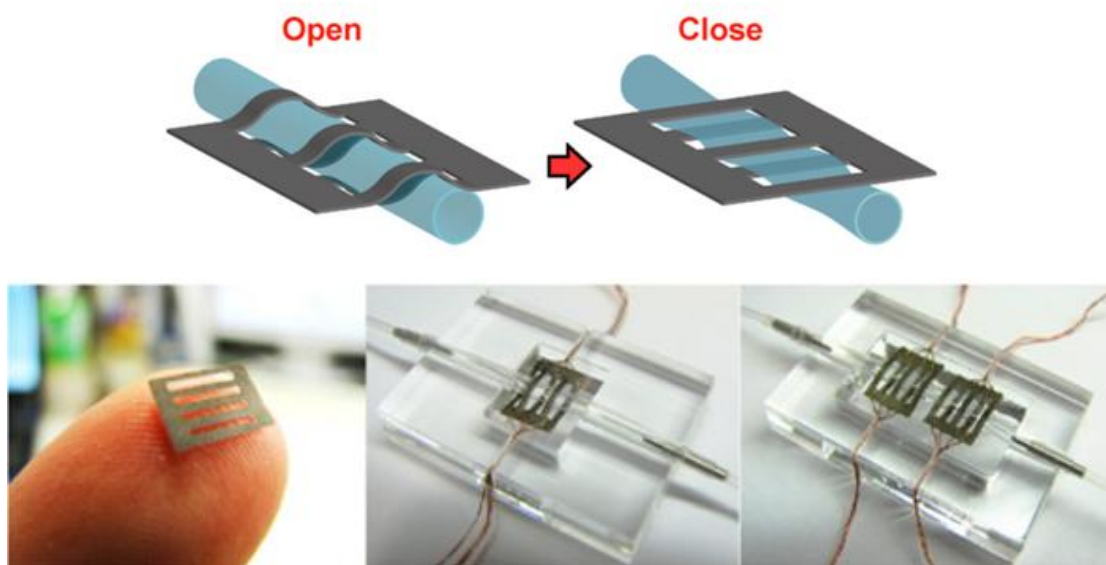
ภาพที่ 1.4 โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะผสมจำรูป



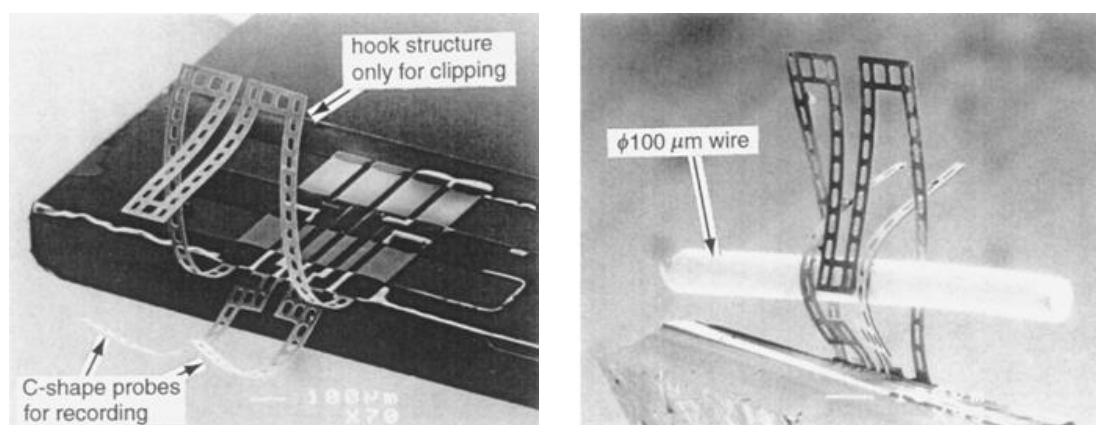
ภาพที่ 1.5 ปัมขนาดเล็กที่มีนิทินอลทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรม [5]



ภาพที่ 1.6 วาล์วขนาดเล็กที่มีนิทินอลทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแผ่นเมมเบรน [6]



ภาพที่ 1.7 วาล์วนิทินอลขนาดเล็กที่มีการเปิดปิดการไหลจากภายนอกของท่อลำเลียงของเหลว [7]



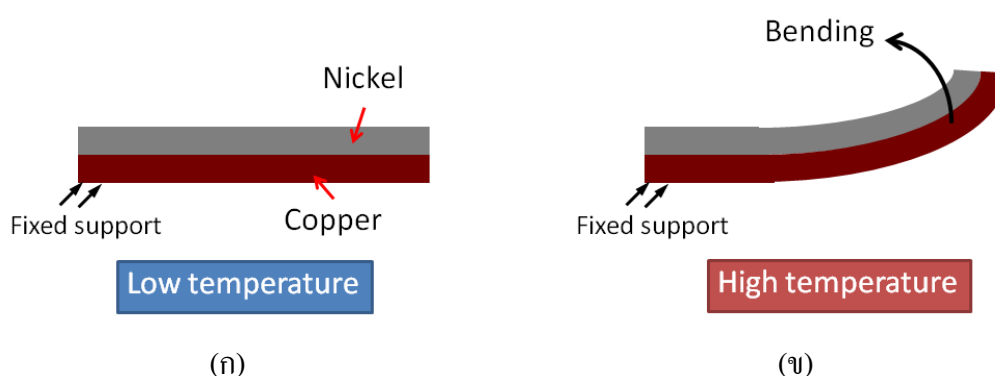
ภาพที่ 1.8 ตะขอนิทินอลขนาดเล็ก [8]

1.4 ปัญหาของการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์แบบคานสองชั้น

ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นนี้จะประกอบด้วยวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันนำมาเชื่อมต่อกันอยู่โดยวัสดุสองชนิดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion, CTE) ไม่เท่ากัน โดยมีหลักการการใช้งานดังนี้คือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นนี้ ไมโครแอกชูเอเตอร์จะเกิดการขยับหรือเกิดการกระดกโดยมีทิศทางในการขยับเข้าหาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ต่ำกว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ วัสดุทั้งสองชนิดจะขยายตัวแต่วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่มากกว่า

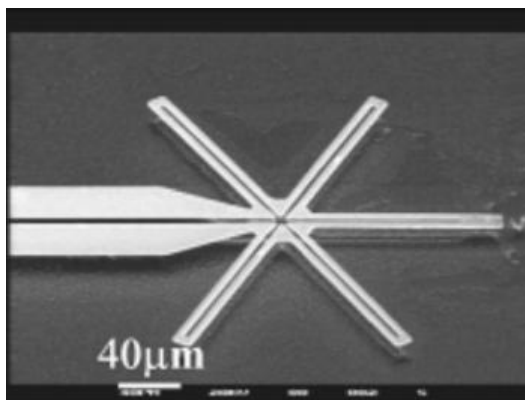
จะมีการขยายตัวมากกว่าอีกวัสดุหนึ่ง จึงทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นเกิดการขยับตัวหรือการกระดกขึ้นไปในทิศทางที่วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อยกว่า ตัวอย่างเช่น ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยทองแดงกับนิกเกิลซ้อนทับกันอยู่ โดยที่ทองแดงและนิกเกิลมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับ $16.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ และ $13.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกชูเอเตอร์แล้วไมโครแอกชูเอเตอร์จะเกิดการขยับหรือกระดกขึ้นโดยมีทิศทางในการขยับเข้าหานิกเกิลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อยกว่าดังแสดงการกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์แบบคานสองชั้นในภาพที่ 1.9 สำหรับคานสองชั้นจะประกอบด้วยวัสดุโลหะผสมจำรูปประกอบติดกับวัสดุอีกชนิดหนึ่งซึ่งสามารถเลือกวัสดุได้หลากหลายตามการใช้งานที่ต้องการเช่น DLC PDMS และ polyimide เป็นต้น

ไมโครแอกชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นนี้เป็นอีกประเภทหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายรูปแบบ เนื่องจากไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นจะสามารถควบคุมทิศทางในการขยับได้แน่นอน มีแรงกระทำในการใช้งานที่สูงและยังถือว่าเป็นรูปแบบของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ไม่ซับซ้อน ตัวอย่างเช่น กรงเล็บขนาดเล็ก (microcages) [9] ดังแสดงในภาพที่ 1.10 ซึ่งประกอบด้วย DLC กับนิตินอลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจับวัสดุขนาดเล็กๆ ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายหูรูด (sphincter actuator) [10] ดังแสดงในภาพที่ 1.11 นำมาประยุกต์ใช้งานในทางการแพทย์ ไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นคานสองชั้นซึ่งประกอบด้วย PDMS กับวัสดุโลหะผสมจำรูป หรืออุปกรณ์หีบจับขนาดเล็ก (microwrapper) [11] ดังแสดงในภาพที่ 1.12 ไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วย polyimide กับนิตินอล โดยจะนำมาประยุกต์ใช้งานในทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ในการหีบจับวัสดุทางชีวภาพขนาดเล็กๆ เป็นต้น

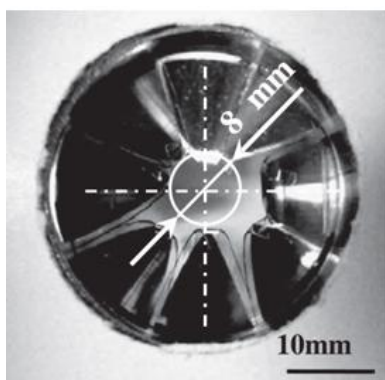


ภาพที่ 1.9 ลักษณะการขยับตัวหรือการกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น

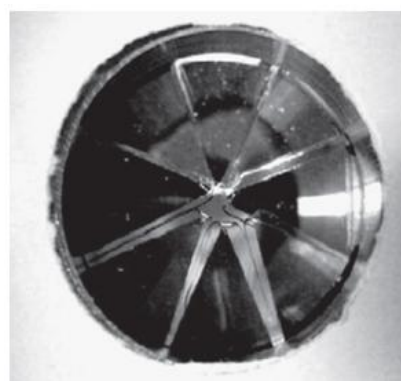
(ก) รูปร่างที่อุณหภูมิต่ำ (ข) รูปร่างที่อุณหภูมิสูง



ภาพที่ 1.10 กรงเล็บขนาดเล็ก [9]



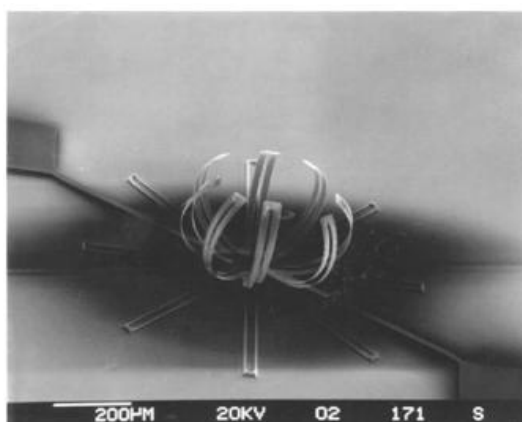
(ก)



(ข)

ภาพที่ 1.11 ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายหุรูด [10]

(ก) รูปร่างที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ข) รูปร่างที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 1.12 อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็ก [11]

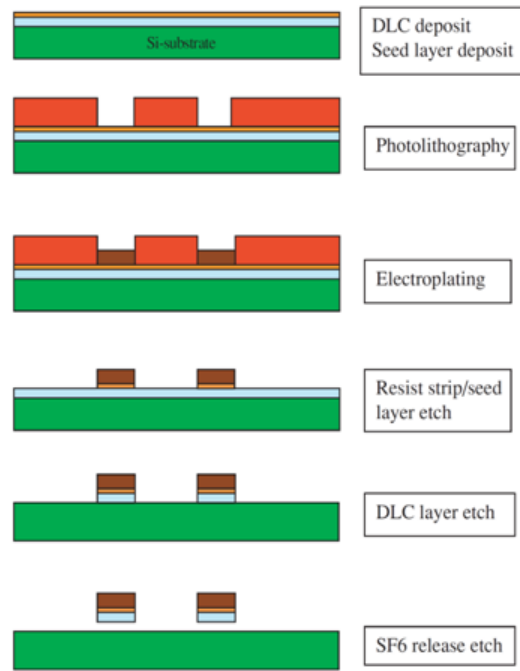
แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะคานสองชั้นจะค่อนข้างมีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งจะเห็นได้จากในงานวิจัยต่างๆ ตัวอย่างเช่น กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัย Luo et al. [9] เป็นการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วย DLC (Diamond like Carbon) กับนิกเกิล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นมือจับขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 1.13 โดยเริ่มจากการปลูกฟิล์ม DLC ลงบนซิลิกอนแล้วจึงทำการปลูกฟิล์มทองแดงลงบน DLC อีกครั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะบนผิวฟิล์ม DLC หลังจากนั้นทำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (photolithography) และปลูกฟิล์มนิกเกิลตามลวดลายที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการกัดชิ้นงานแบบแห้ง (dry etching) ด้วยออกซิเจนพลาสมา ในขั้นตอนสุดท้ายจึงกัดชิ้นงานจากด้านล่างเพื่อทำให้ชิ้นงานหลุดออกมา ซึ่งจากกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นในงานวิจัยของ Luo et al. จะเห็นได้ว่า กระบวนการสร้างมีความซับซ้อน โดยที่มีการเพิ่มขึ้นตอนในการปลูกฟิล์มทองแดงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของ DLC อีกทั้งยังมีขั้นตอนอีกหลายขั้นตอนในการสร้างซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานหรือไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการกัดชิ้นงานจากด้านล่างอาจจะส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดการหักหรือเสียหายในระหว่างกระบวนการสร้างด้วย

อีกตัวอย่างหนึ่งเป็นกระบวนการสร้างในงานวิจัยของ Kim et al. [12] สำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิกเกิลและซิลิกอนไนไตรด์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งเชิงแสง จากภาพที่ 1.14 เป็นกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยนี้ โดยในขั้นตอนแรกจะทำการปลูกฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ แล้วทำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงและกัดซิลิกอนไดออกไซด์ตามลวดลายที่สร้างขึ้น หลังจากนั้นทำการปลูกฟิล์มนิกเกิลและทำการ lift off ตามลำดับ ต่อจากนั้นทำการปลูกชั้นฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์และทำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงและกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดชิ้นงานแบบรีแอกทีฟไอออนเอชซึ่ง (reactive ion etching, RIE) หลังจากนั้นทำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง ทำการปลูกฟิล์มนิกเกิลและทำการ lift off ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายทำการกัดชิ้นงานด้วย MERIE (magnetically enhanced reactive ion etching) และ XeF_2 ตามลำดับเพื่อให้ได้ชิ้นงานออกมา ซึ่งจากกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นในงานวิจัยของ Kim et al. จะเห็นได้ว่า กระบวนการสร้างจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก มีกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงและต้องทำการกัดชิ้นงานในหลายขั้นตอน อีกทั้งยังใช้เวลานานในการสร้างอีกด้วย

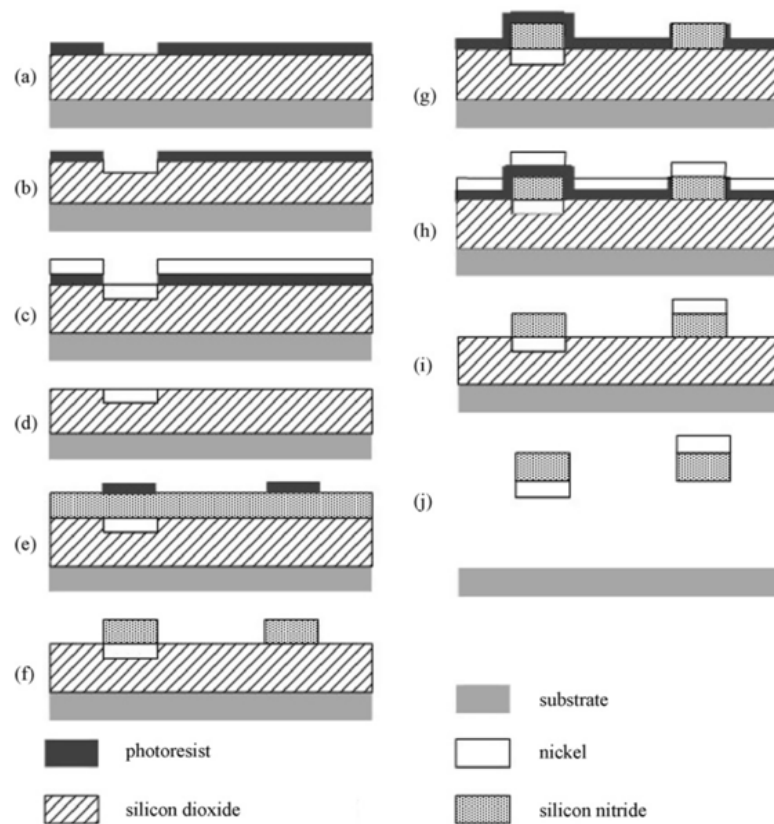
กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยของ Qu et al. [13] และ Lin et al. [14] แสดงดังภาพที่ 1.15 และ ภาพที่ 1.16 ตามลำดับ เป็นการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ลักษณะเป็น

คานสองชั้น ซึ่งในกระบวนการสร้างของทั้งสองงานวิจัยนี้จะใช้แผ่นซิลิกอนเป็นฐานในการสร้าง และในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างจะทำการกำจัดชั้นรองพื้นในการสร้าง (sacrificial layer) ออก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เสี่ยงทำให้เกิดการเสียหายแก่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้น เนื่องจากการกำจัดชั้นรองพื้นในการสร้างจำเป็นต้องใช้วิธีการกัดชิ้นงานจากด้านล่าง สารละลายที่ใช้ อาจไปกัดชิ้นงานส่วนอื่นจนทำให้เกิดการเสียหายได้

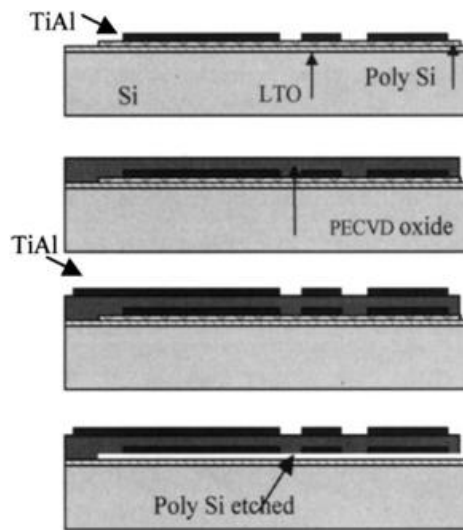
ส่วนในกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยของ Bullen et al. [15] แสดงดังภาพที่ 1.17 เป็นกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นส่วนประกอบของเซนเซอร์ โดยในขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างจะต้องกัดชิ้นงานด้วยวิธีการกัดแบบ EDP จากด้านหน้าของแผ่นซิลิกอน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เสี่ยงต่อการเกิดการเสียหายต่อชิ้นงานได้ เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการกัดชิ้นงานอาจจะเข้าไปกัดชิ้นงานโดยตรงทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายหรือพังลงมาได้ นอกจากนี้ในกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยของ Gill et al. [11] แสดงดังภาพที่ 1.18 เป็นกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นมือจับขนาดเล็ก ในกระบวนการสร้างของงานวิจัยนี้มีขั้นตอนที่ซับซ้อน อีกทั้งเกิดการเสียหายต่อชิ้นงานจากขั้นตอนที่สอง ในกระบวนการสร้าง ซึ่งในขั้นตอนที่สอง นี้เป็นการกัดชิ้นงานด้วยสารละลาย (wet etching) เพื่อทำการกำจัดชั้นรองพื้น แต่เนื่องจากบริเวณชั้นบนใดระหว่างชั้นรองพื้นกับ นิทินอลมีรูเล็กๆอยู่ จึงทำให้สารละลายที่ใช้ในการกัดชิ้นงานไหลเข้าไปภายในรูและทำการกัดนิทินอลซึ่งเป็นชิ้นงานของงานวิจัยนี้จากด้านล่างทำให้รูมีขนาดใหญ่ขึ้นและทำให้นิทินอลเกิดการพังลงมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 1.19 เป็นต้น



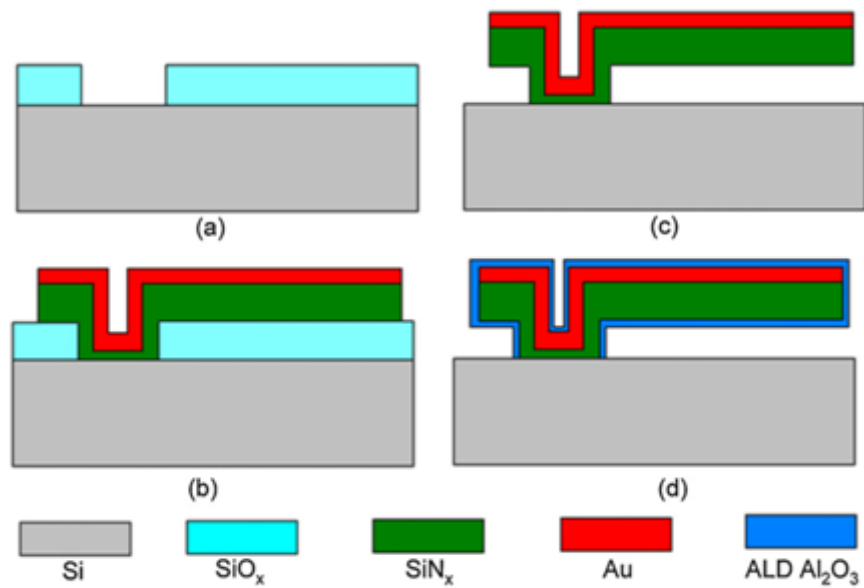
ภาพที่ 1.13 กระบวนการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัย Luo et al. [9]



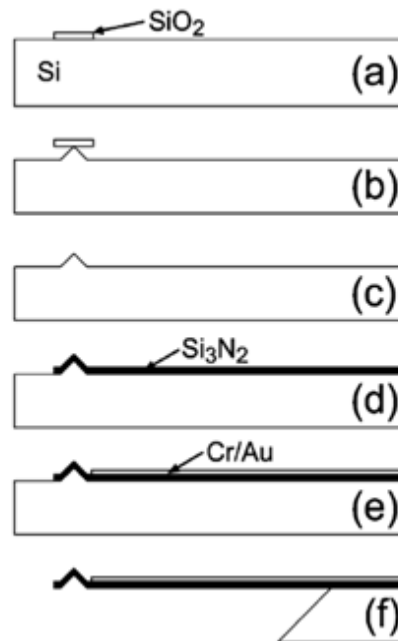
ภาพที่ 1.14 กระบวนการสร้างในงานวิจัยของ Kim et al. [12]



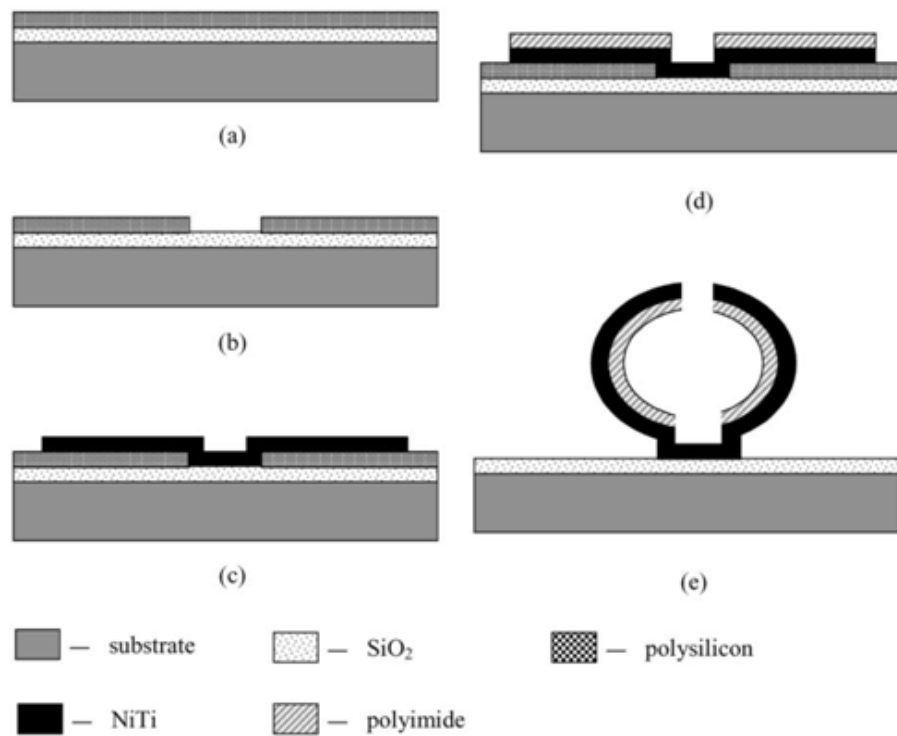
ภาพที่ 1.15 กระบวนการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Qu et al. [13]



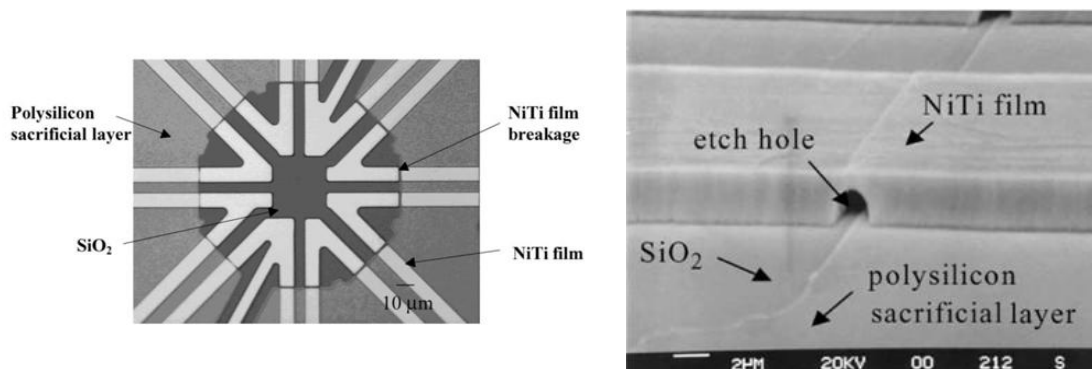
ภาพที่ 1.16 กระบวนการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Lin et al. [14]



ภาพที่ 1.17 กระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Bullen et al. [15]



ภาพที่ 1.18 กระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Gill et al. [11]



ภาพที่ 1.19 ลักษณะการเสียหายของไมโครแอกชูเอเตอร์ในงานวิจัยของ Gill et al. [11]

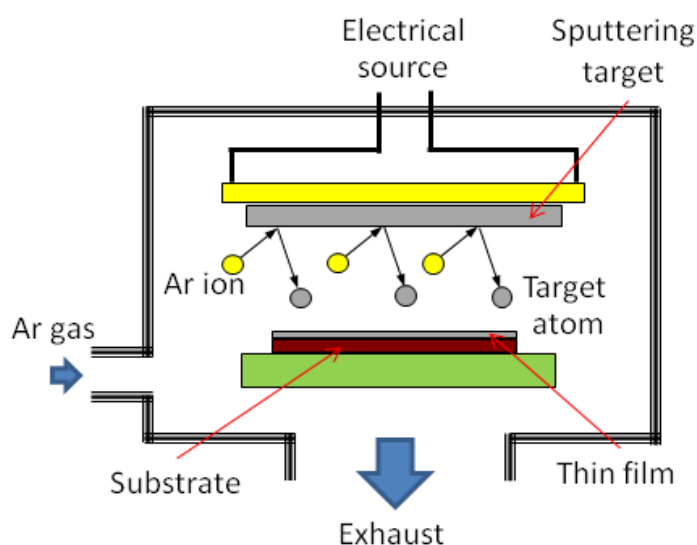
1.5 กระบวนการสร้างไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ใช้นิทินอลเป็นส่วนประกอบ

นิทินอลเป็นวัสดุโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับไททาเนียมที่มีคุณลักษณะจำเพาะที่ดีในหลายด้าน ได้แก่ มีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปและคืนรูปได้ (shape memory alloy effect, SMA effect) และสภาพยืดหยุ่นยิ่งยวด (superelasticity) นอกจากนี้นิทินอลยังมีคุณสมบัติที่เด่นอีกมากมายที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ตัวอย่างเช่น มีคุณสมบัติในการใช้งานที่ไม่สูงนัก มีระยะขยับที่สูง มีแรงกระทำใช้งานที่สูง ทนต่อการกัดกร่อนและมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง สำหรับการสร้างฟิล์มนิทินอลเพื่อใช้งานเป็นไมโครแอกชูเอเตอร์ จะประกอบด้วยสองกระบวนการหลักเพื่อทำให้ฟิล์มนิทินอลที่คุณสมบัติตามที่ต้องการคือ กระบวนการเคลือบผิวด้วยนิทินอล (sputtering deposition) และกระบวนการอบหลังการเคลือบผิวด้วยนิทินอล (post-sputtering annealing) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.5.1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยนิทินอล

การเคลือบผิวด้วยนิทินอลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น เทคนิคการสปัตเตอริง เทคนิคการยิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) เทคนิคการปลูกฟิล์มด้วยลำไอออน (ion beam deposition) การเคลือบผิวด้วยพลาสมาอาร์กอน (arc plasma ion plating) เทคนิคการสเปรย์พลาสมา (spray plasma) เทคนิคการระเหย (flash evaporation) เป็นต้น โดยที่เทคนิคเหล่านี้มีอุปสรรคในการสร้างเช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น ความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ใช้เวลานานในการปลูกฟิล์มเนื่องจากมีอัตราการปลูกฟิล์มที่ต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้ก็ยังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการสปัตเตอริงในการเคลือบผิวด้วยนิทินอล โดยเทคนิคสปัตเตอริงจำเป็นต้องทำภายใต้ความดันสุญญากาศที่ต่ำมากๆ และพลังงานที่สูงเพื่อให้ประจุของอาร์กอนเข้าไปชนกับ target นิทินอลจนทำให้อนุภาคของนิทินอลหลุดออกและ

เคลื่อนที่ไปตามทิศทางสนามไฟฟ้าและเคลื่อนอยู่กับผิวชิ้นงาน ภาพที่ 1.20 แสดงไคอะแกรมของการทำงานของเทคนิคสปัตเตอร์ริง สำหรับเงื่อนไขในการเคลือบผิวด้วยนิตินอลด้วยเทคนิคการสปัตเตอร์ริงจะกล่าวถึงในขั้นตอนกระบวนการสร้างต่อไป แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มนิตินอลที่เคลือบอยู่บนผิวชิ้นงานนี้จะมีโครงสร้างอมอฟัสซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่มีคุณสมบัติของวัสดุโลหะผสมจำรูปอยู่ จึงจำเป็นต้องทำกระบวนการอบเพื่อทำให้โครงสร้างของฟิล์มนิตินอลเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างผลึกซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีคุณสมบัติของวัสดุโลหะผสมจำรูปปรากฏอยู่



ภาพที่ 1.20 หลักการทำงานของเทคนิคการสปัตเตอร์ริง

1.5.2 กระบวนการอบหลังจากเคลือบผิวด้วยนิตินอล

กระบวนการอบนิตินอลเป็นกระบวนการที่สำคัญซึ่งเป็นกระบวนการอบที่อุณหภูมิสูงทำให้ฟิล์มนิตินอลเปลี่ยนโครงสร้างจากอมอฟัส (amorphous) เป็นโครงสร้างผลึก (crystalline structure) โดยทั่วไปกระบวนการอบนิตินอลจะอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้คุณสมบัติการเปลี่ยนรูปและคืนรูปได้ (shape memory alloy effect, SMA effect) และสภาพยืดหยุ่นยิ่งยวด (superelasticity) ปรากฏขึ้น กระบวนการอบสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อบในเตาภายใต้สุญญากาศที่สูง (high vacuum) [5] [16] [17] อบโดยเทคนิคการยิงเลเซอร์ [18] และอบในเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่าน [7] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ Chung และ Chan [16] จะทำการอบฟิล์มนิตินอล (ความหนา 5 ไมโครเมตร) ในเตาอบสุญญากาศภายใต้ความดัน 2×10^{-6} มิลลิบาร์และอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ในงานวิจัยของ Fu et al. [17] ทำการอบชิ้นงานที่มี

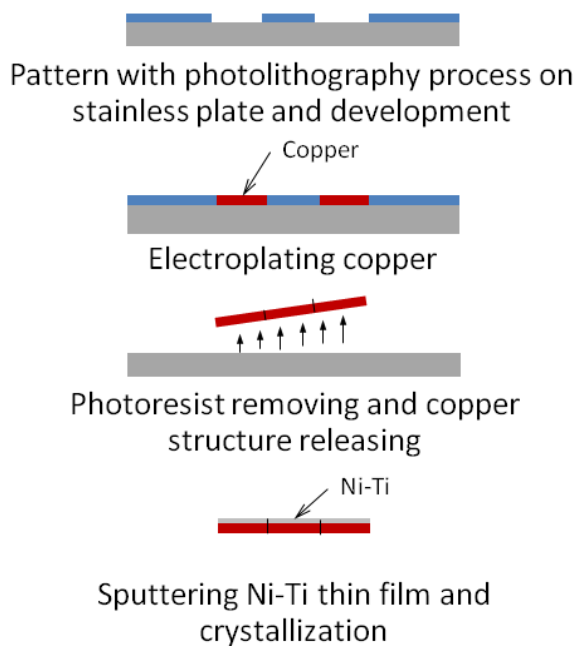
ลักษณะเป็นคานสองชั้นซึ่งประกอบด้วย DLC กับฟิล์มนิทินอล (ความหนา 800 นาโนเมตร) ในเตาอบสุญญากาศภายใต้อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ส่วนในงานวิจัยของ Makino et al. [5] ทำการอบฟิล์มนิทินอล (ความหนา 6 ไมโครเมตร) ในเตาอบสุญญากาศภายใต้ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เป็นต้น และจากงานวิจัยที่ผ่านมากล่าวถึง แพกเตอร์หลักที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิทินอล คือ ความเป็นโครงสร้างผลึกของ นิทินอล อัตราส่วนระหว่างไททานเนียมกับนิกเกิล (Ti:Ni ratio) ของนิทินอล และช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (transformation temperature) เป็นต้น ซึ่งแพกเตอร์ดังกล่าวสามารถควบคุมจาก อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบฟิล์มนิทินอลได้

1.6 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นด้วยวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อนโดยไม่ใช้ซิลิกอน วัสดุที่ใช้เป็น วัสดุโลหะผสมจำรูปคือ นิทินอลและทองแดง เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีราคาถูก มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถใช้กระบวนการผลิตได้หลากหลายวิธี หลังจากนั้นจะทำการศึกษา พารามิเตอร์ของไมโครแอคชูเอเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของไมโครแอคชูเอเตอร์เพื่อหารูปร่าง และขนาดที่เหมาะสมสำหรับในการทำงานวิจัยนี้ แล้วจึงนำแนวคิดจากการศึกษาพารามิเตอร์ของ ไมโครแอคชูเอเตอร์ดังกล่าวมาทำการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นด้วย กระบวนการสร้างแบบใหม่โดยไม่ใช้แผ่นซิลิกอน เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนและ การเกิดความเสียหายของไมโครแอคชูเอเตอร์หรือชิ้นงานเอง ซึ่งในกระบวนการสร้างแบบใหม่นี้ ประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างเพียงสองขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างโครงสร้าง ทองแดงแบบลอยตัวและกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วย นิทินอล โดยมีรายละเอียดของกระบวนการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ดังภาพที่ 1.21

นอกจากนี้ในงานวิจัยยังทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของนิทินอล ในขั้นตอนการอบไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีนิทินอลเป็นส่วนประกอบ โดยจะทำการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิสำหรับการอบในเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านเพื่อทำความเข้าใจ พารามิเตอร์ของการอบฟิล์มนิทินอลในเตาอบแบบหลอดควอทซ์ที่ทำให้ได้คุณลักษณะจำเพาะของ นิทินอลที่ดี พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ คือ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy, EDS) และเทคนิคการวัดการถ่ายเทความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) อีกทั้งยัง ทำการศึกษาอิทธิพลของการค้ำชิ้นงาน (pre-stressing) ระหว่างการอบต่อคุณสมบัติเชิงกลของ

ไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดระยะกระดก (deflection) ทั้งแบบสถาดิกส์และแบบไดนามิกส์



ภาพที่ 1.21 กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่ที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้

1.7 วัสดุประสงค์

พัฒนากระบวนการสร้างแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีและเทคนิคสปัตเตอร์ริง

1.8 ขอบเขตงานวิจัย

- ศึกษาพารามิเตอร์เกี่ยวกับรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น ออกแบบกระบวนการสร้างและสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น โดยใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีและเทคนิคสปัตเตอร์ริงมาประยุกต์ใช้งาน

- ศึกษาอุณหภูมิของการอบที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุโลหะผสมจํารูปที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติความเป็นโครงสร้างผลึก อัตราส่วนระหว่างไททาเนียมกับนิกเกิลและช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนรูปร่าง เป็นต้น
- ทดสอบสมรรถนะของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่สร้างขึ้น ได้แก่ ระยะกระดกด้วยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยตรงและด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีรูปแบบสลับให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่ที่นำเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีและเทคนิคการสปัตเตอร์ริงที่สามารถลดความซับซ้อนของขั้นตอนในกระบวนการผลิตและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้าง นอกจากนี้ยังมีประโยชน์สำหรับกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ต้องการลดต้นทุนการผลิตและลดขั้นตอนกระบวนการสร้าง และรวมไปถึงกลุ่มนิสิต นักศึกษาและผู้ที่สนใจที่ต้องการนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นๆเพิ่มเติม

1.10 ระเบียบขั้นตอนการวิจัย

- ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานรูปแบบต่างๆ เช่น ไมโครปั๊ม วาล์วขนาดเล็ก มือจับขนาดเล็ก เป็นต้น
- ศึกษาขนาดและรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์และการคำนวณการถ่ายเทความร้อนเพื่อคำนวณหาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์
- ออกแบบกระบวนการสร้างและสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะแบบคานสองชั้นตามขนาดและรูปร่างที่ได้ศึกษาไว้ด้วยกระบวนการสร้างที่ไม่ใช้แผ่นซิลิกอนในกระบวนการสร้าง
- ศึกษาการอบฟิล์มนิตินอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน พร้อมทั้งทำการวัดคุณสมบัติของฟิล์มนิตินอลหลังจากทำการอบด้วยเครื่องมือต่างๆ

- ปรับปรุงแก้ไขขั้นตอนในกระบวนการสร้าง
- ทดสอบไมโครแอคชูเอเตอร์ที่สร้างขึ้นด้วยการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติย์และการทดสอบการตอบสนองจลน์
- สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะพร้อมจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

แนวคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์

ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยวัสดุโลหะผสมจํารูปคือนิกินอลและโลหะอีกชนิดหนึ่งคือทองแดง ซึ่งจากตารางที่ 2.1 เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุทั้ง เงิน ทองแดง และนิกเกิล สรุปได้ว่าทองแดงเหมาะสมมากกว่าสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น ซึ่งทองแดงเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้านเช่น มีค่าการถ่ายเทความร้อน (thermal conductivity) ที่ดี มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat) ที่สูง และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่สูง เป็นต้น นอกจากนี้ทองแดงเป็นวัสดุที่ราคาถูกและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคในการสร้างได้หลากหลาย ดังนั้นทองแดงจึงเป็นโลหะที่ถูกนำมาประกอบติดกับนิกินอลเพื่อสร้างเป็นไมโครแอกซ์เวเตอร์ลักษณะคานสองชั้นในการศึกษานี้

ในบทนี้จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของไมโครแอกซ์เวเตอร์ พารามิเตอร์ที่จะทำการศึกษาคือ ความหนาของทองแดง ความกว้างของไมโครแอกซ์เวเตอร์และความยาวของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองการศึกษาคือ การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเงิน ทองแดงและนิกเกิล

Properties	Silver, Ag	Copper, Cu	Nickel, Ni
Specific density (g/cc)	9.30	8.94	8.88
Specific heat (J/kg.K)	234	385	460
Thermal conductivity (W/m.K)	419	398	60.7
Tensile strength (MPa)	124	33.3	59.0
Modulus of elasticity (GPa)	76	124	207
Poisson ration	0.37	0.34	0.31
Shear modulus (GPa)	27.8	48	76
Coefficient of thermal expansion (ppm/°C)	19.6	16.5	13.1

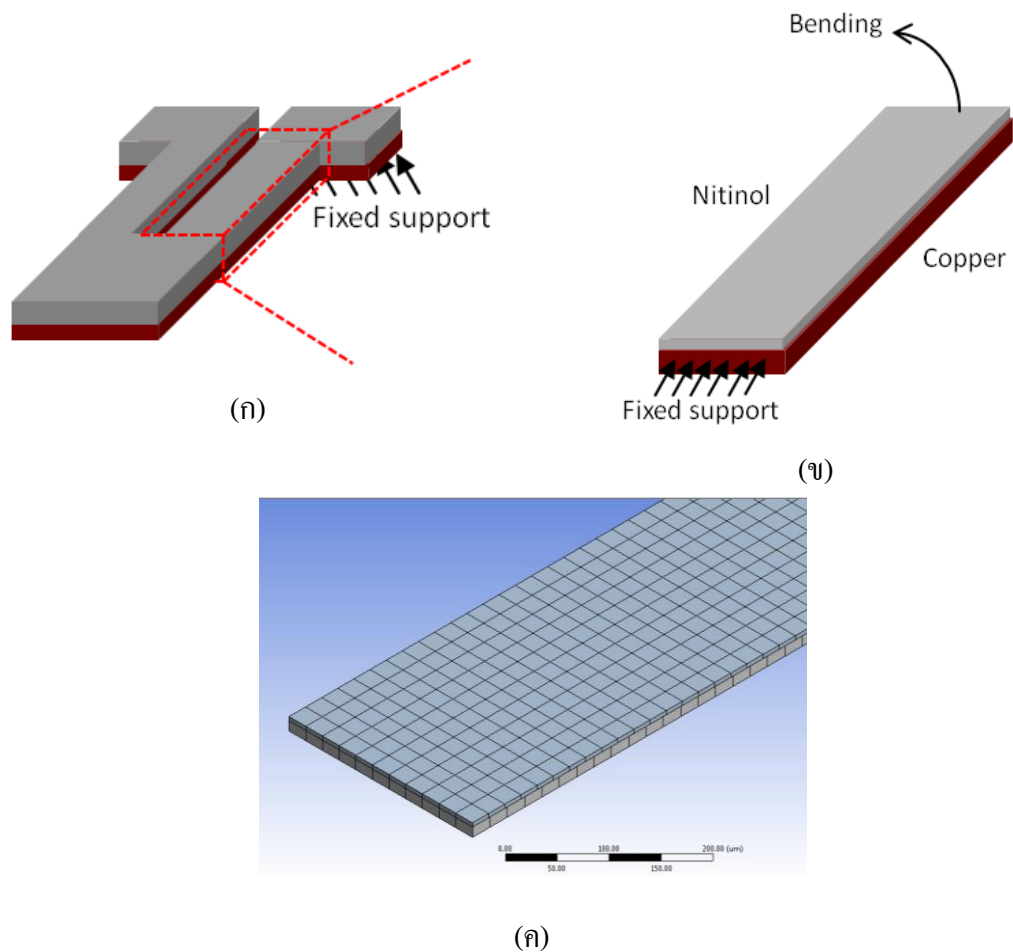
2.1 การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปภาพที่ 2.1(ก) แสดงลักษณะของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ด้วยลักษณะของไมโครแอกซ์เอเตอร์ดังกล่าวทำให้จำลองเป็นคานเส้นตรงที่แสดงในภาพที่ 2.1(ข) ได้ เมื่อทำการยึดปลายด้านหนึ่งของไมโครแอกซ์เอเตอร์ไว้และทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ในลักษณะนี้จะทำให้ปลายอีกข้างหนึ่งเกิดการโก่งตัวขึ้นในแนวตั้งเช่นกัน

การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดของไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS เข้ามาช่วยในการทำนายระยะกระดกโดยนำแนวคิดการทำนายระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์อย่างง่ายจากงานวิจัยของกฤษกรณ์ ประไพพิทยาคุณ [19] มาประยุกต์ใช้คือ ในสถานะที่เพิ่มอุณหภูมิของนิตินอล (Ni:Ti = 50:50) จาก 25 องศาเซลเซียสเป็น 80 องศาเซลเซียส โดยที่มีรูปร่างของไมโครแอกซ์เอเตอร์ก่อนเพิ่มอุณหภูมิมียลักษณะแบบแบนราบและสมมติให้รูปร่างของไมโครแอกซ์เอเตอร์มีลักษณะเป็นคานตรงเท่านั้น สำหรับการกำหนดโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS จะทำการกำหนดค่าสถานะต่างๆ ดังตารางที่ 2.2 โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็น 25 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกำหนดการสร้างเมช (mesh) แบบอัตโนมัติด้วยโหมด "proximity and curvature" ดังแสดงตัวอย่างของการสร้างเมชในภาพที่ 2.1(ค) จากนั้นทำการกำหนดปลายด้านหนึ่งเป็น "fixed support" สำหรับบริเวณที่ประกบกันระหว่างนิตินอลกับทองแดงจะทำการกำหนดแบบ "bonded" และกำหนดการคำนวณเป็นแบบไม่เชิงเส้นหรือกำหนดให้เป็น "large deformation" จากนั้นกำหนดอุณหภูมิของนิตินอลและทองแดงเป็น 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำการคำนวณเพื่อหาระยะกระดกของคานที่จะเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดในการกำหนดค่าภายในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS

Parameter	Condition
Environment temperature	25°C
Mesh	Auto (Proximity and curvature)
Fixed support	One end of the beam
Contact region (nitinol/copper)	Bonded
Large deflection	On



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของคานที่นำมาศึกษาในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS (ก) ไมโคร แอคชูเอเตอร์ที่ทำการสร้าง (ข) รูปร่างคานที่มีลักษณะสองชั้น (ค) ลักษณะคานในโปรแกรม ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุในการทำนายระยะกระดกด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS

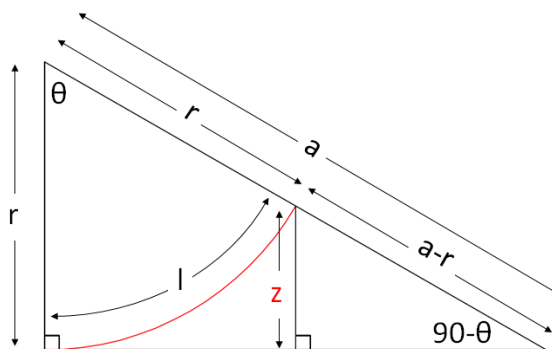
Properties	Nitinol, NiTi	Copper, Cu
Specific density (g/cc)	6.45	8.94
Coefficient of thermal expansion (ppm/°C)	-88	16.5
Modulus of elasticity (GPa)	30	124
Possion's ratio	0.3	0.34
Bulk modulus (GPa)	25	140
Shear modulus (GPa)	11.53	48

ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของความหนาของทองแดงที่มีผลต่อระยะกระดกของคานโดยใช้คุณสมบัติต่างๆของวัสดุดังตารางที่ 2.3 สำหรับความกว้างของคานจะไม่มีผลต่อการกระดกในทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้างในลักษณะนี้และสำหรับความยาวของคานจะส่งผลทำให้ระยะกระดกสูงขึ้นหากมีความยาวของคานมากขึ้น โดยในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของทองแดงเป็น 12, 25, 50, 75 และ 100 ไมโครเมตรในขณะที่เปลี่ยนอุณหภูมิของคานที่ 50, 100 และ 125 องศาเซลเซียส โดยมีความกว้างของคานคงที่เท่ากับ 250 ไมโครเมตร ความยาวของคานคงที่เท่ากับ 22.5 มิลลิเมตรและความหนาของนิตินอลคงที่เท่ากับ 5 ไมโครเมตร โดยแสดงพารามิเตอร์ในการศึกษาดังตารางที่ 2.4 รวมเป็นการศึกษาทั้งหมด 15 กรณี

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของคานร่วมกับความหนาของทองแดงในโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ ANSYS

Copper's Thickness (μm)	Cantilever's length (mm)	Cantilever's width (μm)	Nitinol thickness (μm)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
12	22.5	250	5	50	100	125
25						
50						
75						
100						

นอกจากนี้ในหัวข้อนี้ได้ทำการหาระยะกระดกของคานด้วยการคำนวณระยะรัศมีจากสมการคานคอมโพสิตร่วมกับแนวคิดในภาพที่ 2.2 โดยใช้พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณดังตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ซึ่งรายละเอียดของสมการแสดงดังสมการที่ 2.1 ถึงสมการที่ 2.4



ภาพที่ 2.2 แนวคิดในการหาระยะของคานจากการคำนวณ

$$r = \frac{t\{3(1+m)^2+(1+mn)[m^2+(1/mn)]\}}{(\alpha_2-\alpha_1)(T-T_0)(1+m^2)} \quad (2.1)$$

r คือรัศมีมีความโค้งของระยะกระดกของคาน

t คือความหนาโดยรวมของคาน

m คืออัตราส่วนของความหนาระหว่างวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำต่อวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง

n คืออัตราส่วนของค่ามอดุลัสของยังระหว่างวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำต่อวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง

α_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

α_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง

T คืออุณหภูมิของคาน

T_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นของคาน

$$\theta = \frac{l}{r} \quad (2.2)$$

l คือความยาวของคาน

$$a = \frac{r}{\cos \theta} \quad (2.3)$$

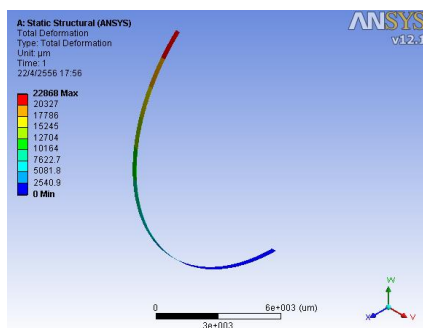
$$z = \frac{\sin\left(\frac{\pi-\theta}{2}\right)}{(a-r)} \quad (2.4)$$

z คือระยะกระดกของคาน

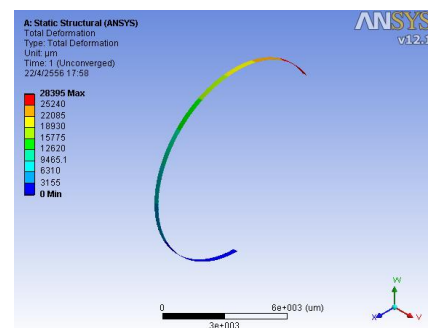
จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า เมื่อคานมีอุณหภูมิสูงขึ้นคานจะยึดตัวออกเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุทั้งสองพร้อมทั้งคานกระดกขึ้นแสดงในภาพที่ 2.3(ก) แต่หากอุณหภูมิของคานสูงเกินไปจะทำให้คานยึดตัวออกและกระดกจนเสียรูปจึงทำให้คานมีระยะกระดกลดลงแสดงในภาพที่ 2.3(ข) และภาพที่ 2.3(ค) จากนั้นนำค่าระยะกระดกสูงสุด ของคานมาวิเคราะห์ภาพที่ 2.4 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

ความหนาของทองแดงร่วมกับระยะกระดกของคานที่อุณหภูมิต่างๆจากระเบียบวิธีการไฟไนต์ อิลิเมนต์ (เส้นทึบ) และการคำนวณ (เส้นประ) พบว่าที่อุณหภูมิเท่ากันเมื่อความหนาของทองแดง เพิ่มขึ้น คานจะมีระยะกระดกที่ลดลง แต่ที่ความหนาของทองแดงเท่ากัน หากอุณหภูมิของ คานสูงขึ้น ระยะกระดกของคานจะสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของคาน ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อิลิเมนต์กับระยะกระดกของคานที่สภาวะเดียวกันพบว่า ระยะกระดกของคานจากคำนวณจะมีค่าน้อยกว่า ระยะกระดกจากวิธีการทางไฟไนต์อิลิเมนต์ เล็กน้อยแต่มีแนวโน้มของระยะกระดกที่เหมือนกัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าที่ความหนาทองแดง 12 ไมโครเมตร คานจะมีระยะกระดกที่มากกว่า 22.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นความยาวของคาน เนื่องจาก เมื่อคานได้รับความร้อนแล้ว คานจะมีการยืดตัวออกด้วยทำให้เป็นไปได้ว่าคานจะกระดกด้วย ระยะที่มากกว่าความยาวก่อนได้รับความร้อน

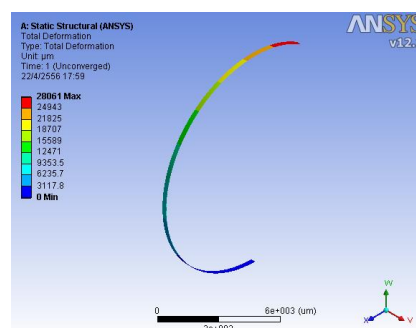
จากผลการศึกษาระยะกระดกของคานแบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ ประกอบด้วยนิตินอลกับทองแดงซ้อนทับกันอยู่ในโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ ANSYS จะเห็นได้ว่า ความหนาของทองแดงมีผลต่อระยะกระดกของคานเป็นอย่างมาก โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน หากความหนาของทองแดงลดลง 50% ระยะกระดกของคานจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 250%



(ก)

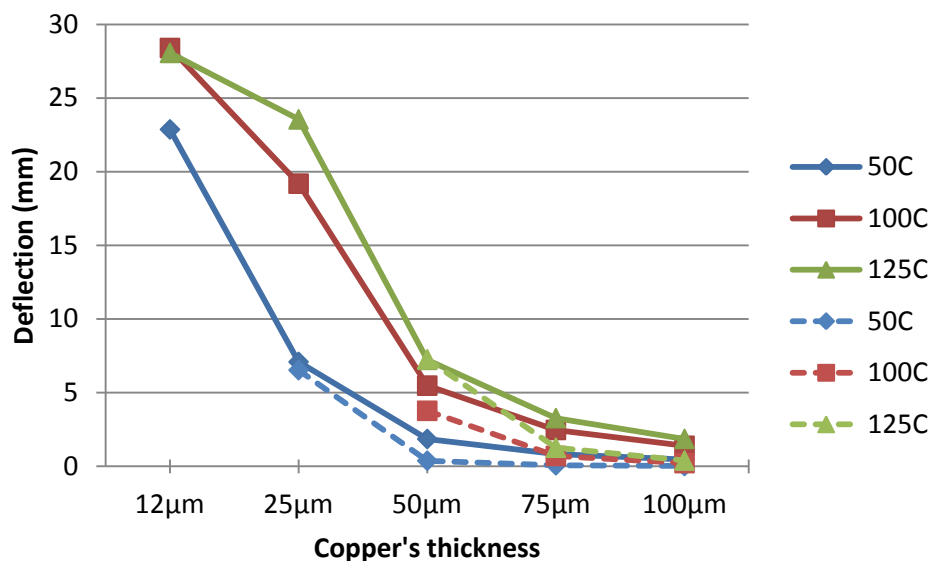


(ข)



(ค)

ภาพที่ 2.3 ลักษณะการกระดกของคานที่มีทองแดงหนา 12 ไมโครเมตรในโปรแกรมไฟไนต์ อิลิเมนต์ ANSYS (ก) 50 องศาเซลเซียส (ข) 100 องศาเซลเซียส (ค) 125 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.4 ระยะกระดกของคานเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของทองแดง โดยมีความหนาของ นิทินอลเท่ากับ 5 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิต่างๆ โดยระเบียบวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ (เส้นทึบ) และการคำนวณ (เส้นประ)

2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น

การถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะส่งผลกระทบต่อความถี่ในการทำงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยตรงเนื่องจากไมโครแอกซ์เวเตอร์มีความร้อนสะสมมากและมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นิทินอลจะเปลี่ยนเฟสได้เร็วขึ้นและทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์กระดกเร็วตามไปด้วย ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์นี้จะทำการวิเคราะห์การเก็บสะสมความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยการวิเคราะห์ระบบที่ถูกจำลองดังภาพที่ 2.5

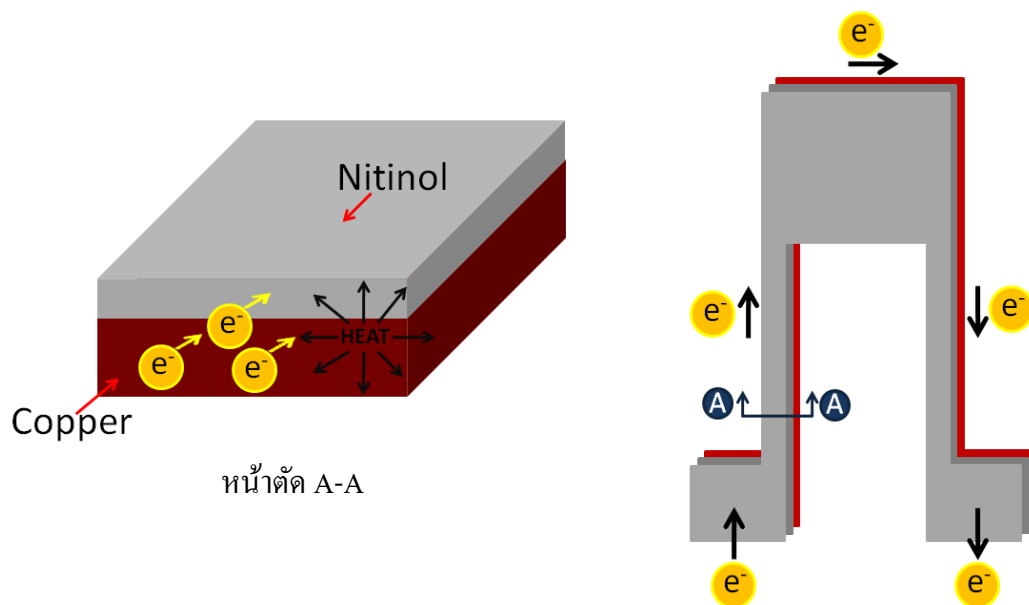
เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดความร้อน เนื่องจากการที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านตัวต้านทาน โดยสามารถหาขนาดความร้อนที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 2.5

$$\dot{Q} = I_A^2 R_A \quad (2.5)$$

\dot{Q} คือความร้อนที่เกิดขึ้นในไมโครแอกซ์เวเตอร์

I_A คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์

R_A คือความต้านทานของไมโครแอกซ์เวเตอร์



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการนำความร้อนทางเดียว (One-dimensional heat conduction)

โดยที่

$$R_A = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

R_1 คือความต้านทานของทองแดง

R_2 คือความต้านทานของนิตินอล

โดยที่ R ของทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับความยาวและพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

$$R = \rho_E \frac{L}{A} \quad (2.7)$$

ρ_E คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ

L คือความยาวของวัสดุที่กระแสไฟฟ้าผ่าน

A คือพื้นที่หน้าตัดของวัสดุที่กระแสไฟฟ้าผ่าน

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho_A c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

$\frac{\partial T}{\partial x}$ คือการนำความร้อนในทิศทางแกน X

\dot{q} คืออัตราการเกิดความร้อนต่อปริมาตร
 ρ_A คือความหนาแน่นของไมโครแอกซ์เวเตอร์
 c_p คือความจุความร้อนจำเพาะของไมโครแอกซ์เวเตอร์
 $\frac{\partial T}{\partial t}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา
 โดยที่

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{V_A} \quad (2.9)$$

V_A คือปริมาตรของไมโครแอกซ์เวเตอร์

$$\rho_A = \frac{(\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)}{V_A} \quad (2.10)$$

ρ_1 คือความหนาแน่นของทองแดง

V_1 คือปริมาตรของทองแดง

ρ_2 คือความหนาแน่นของนิกินอล

V_2 คือปริมาตรของนิกินอล

$$c_p = \frac{m_1 c_{p,1} + m_2 c_{p,2}}{m} \quad (2.11)$$

m คือมวลของแกน

m_1 คือมวลของทองแดง

$c_{p,1}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของทองแดง

m_2 คือมวลของนิกินอล

$c_{p,2}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของนิกินอล

การวิเคราะห์การเก็บสะสมความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะทำการวิเคราะห์โดยการจำลองในรูปแบบที่มีการนำความร้อนในทิศทางเดียว สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.8 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการจำลองที่สภาวะคงตัว (ไม่มีการนำความร้อนภายในวัตถุ) จะสามารถลดรูปสมการและเขียนได้ตามสมการที่ 2.12

$$\Delta T = \frac{I_A^2 R_A}{V \rho_A c_p} t \quad (2.12)$$

ΔT คืออุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่เกิดขึ้น

t คือเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์

ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะทำการคำนวณปริมาณการเก็บสะสมความร้อนจากสมการที่ 2.12 และใช้พารามิเตอร์ในการคำนวณดังในตารางที่ 2.5 ในการคำนวณนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของทองแดงเป็น 12, 25, 75 และ 100 ไมโครเมตร โดยมีความยาวของคานคงที่ 22.5 มิลลิเมตร ความกว้างของคานคงที่เท่ากับ 250 ไมโครเมตรและความหนาของนิตินอลคงที่ 5 ไมโครเมตร โดยแสดงพารามิเตอร์ในศึกษาดังตารางที่ 2.6 และใช้กระแสไฟฟ้าในการจ่ายแบบจำลองต่างๆ

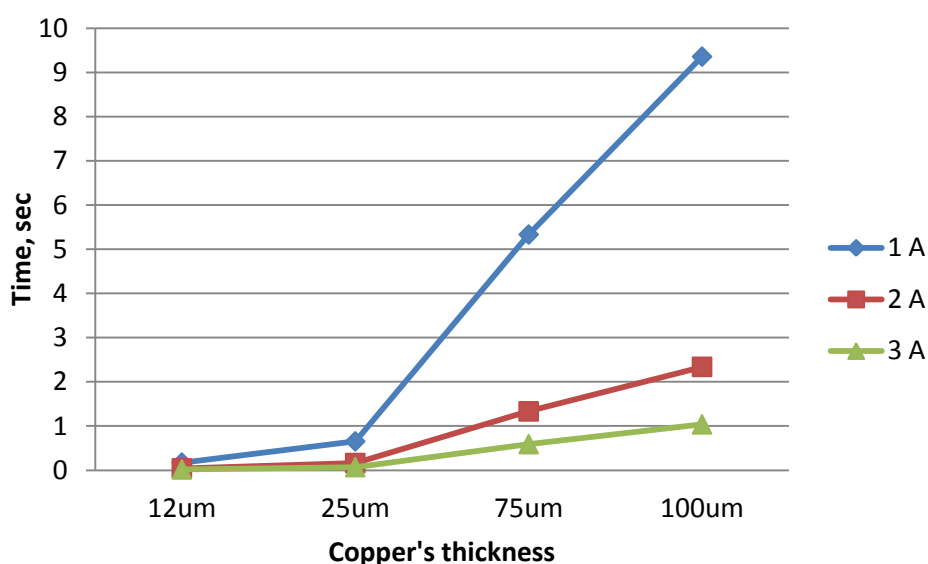
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความหนาของทองแดงต่อระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์จาก 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสด้วยกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆแสดงดังภาพที่ 2.6 พบว่า เมื่อความหนาของทองแดงลดลง ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงเช่นกัน และเมื่อการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงเช่นกัน โดยที่ความหนาของทองแดงเท่ากับ 12 ไมโครเมตรที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 1, 2 และ 3 แอมแปร์ จะมีระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์จาก 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.4, 0.1 และ 0.04 วินาทีตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์

Properties	Nitinol, NiTi	Copper, Cu
Specific density (g/cc)	6.45	8.94
Specific heat (J/kg.K)	837	385
Electrical Resistivity (ppm.ohm.m)	0.82	0.017

ตารางที่ 2.6 พารามิเตอร์ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เอเตอร์โดยเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของคานร่วมกับความหนาของทองแดง

Cantilever's length (mm)	Cantilever's width (μm)	Nitinol thickness (μm)	Copper thickness (μm)
22.5	250	5	12
			25
			75
			100



ภาพที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์มีค่าเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสกับขนาดต่างๆของไมโครแอกซ์เอเตอร์

2.3 สรุปผลการศึกษาพารามิเตอร์ของไมโครแอกซ์เอเตอร์

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะแบบคานสองชั้น ซึ่งไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการศึกษานี้ประกอบด้วย นิทินอลและทองแดงซ้อนทับกัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองการศึกษาคือ การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์และการศึกษาระยะเวลาใน

การการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าคือ ความหนาของทองแดงเพียงพารามิเตอร์เดียว

จากการศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยสมมติให้รูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการศึกษามีลักษณะเป็นคานที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของทองแดงขณะที่เปลี่ยนอุณหภูมิต่างๆจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิเท่ากัน เมื่อความหนาของทองแดงเพิ่มขึ้น คานจะมีระยะกระดกที่ลดลง แต่ที่ความหนาของทองแดงเท่ากัน หากอุณหภูมิของคานสูงขึ้น ระยะกระดกของคานจะสูงขึ้นเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิต่างกันหากความหนาของทองแดงลดลง 50% ระยะกระดกของคานจะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 250% และจากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของคานด้วยการคำนวณ โดยกำหนดรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นจะเห็นได้ว่า หากความหนาของทองแดงลดลงระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงและหากทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงเช่นกัน โดยที่ความหนาของทองแดงเท่ากับ 12 ไมโครเมตรที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 1, 2 และ 3 แอมแปร์ จะมีระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์จาก 25 ถึง 80 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.4, 0.1 และ 0.04 วินาทีตามลำดับ

การศึกษาระยะกระดกด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนสามารถสรุปได้ว่า ไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่มีความหนาของทองแดงที่บางจะทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์มีระยะกระดกที่ดีและมีการถ่ายเทความร้อนหรือความถี่ในการใช้งานที่สูงด้วยเช่นกัน สำหรับรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่จะนำไปสร้างต่อไปจะมีรูปร่างเป็นลักษณะเหมือนตัวยูกว่าประกอบด้วยขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์สี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านบนและสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านล่าง 2 ชั้น ซึ่งรูปร่างที่จะนำไปสร้างในบทความนี้เป็นรูปร่างนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตัวอย่างเช่น อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็ก ไมโครเซนเซอร์และอุปกรณ์รบกวนการไหลของของไหล เป็นต้น

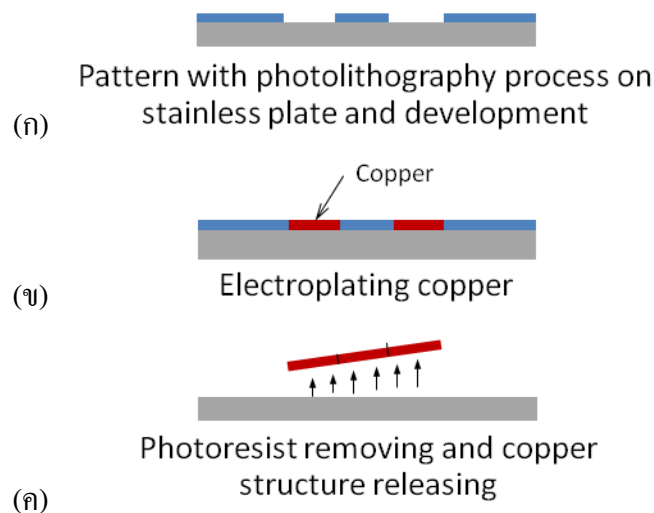
บทที่ 3

กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์

กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยทั่วไปจะทำการสร้างบนแผ่นซิลิกอนซึ่งทำให้กระบวนการสร้างโดยส่วนใหญ่แล้วมีขั้นตอนที่ซับซ้อน [9][12] และอาจจะเกิดการเสียหายต่อไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือชิ้นงานได้ง่าย [11] [13][14][15] เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่โดยไม่ใช่แผ่นซิลิกอนในกระบวนการสร้าง โดยในกระบวนการสร้างแบบใหม่นี้จะประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างเพียงสองขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวและกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิกเกิล สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในขั้นตอนต่างๆ รวมทั้งข้อจำกัดในการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ในแต่ละขั้นตอนด้วย

3.1 กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว

ในงานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีลงบนแผ่นสแตนเลสที่มีการสร้างแบบหล่อตามลวดลายที่ต้องการไว้ ในกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนการสร้างแบบหล่อและขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี ดังภาพที่ 3.1



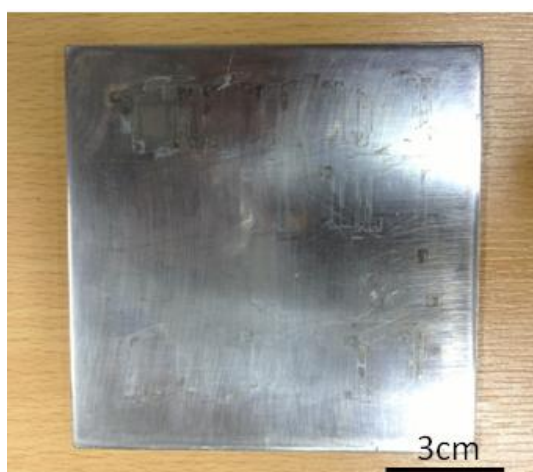
ภาพที่ 3.1 กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว (ก) สร้างแบบหล่อของโฟโตรีซิส (ข) สร้างฟิล์มทองแดงด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ค) ล้างแบบหล่อออกจะทำให้โครงสร้างทองแดงแยกตัวออก

3.1.1 ขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ

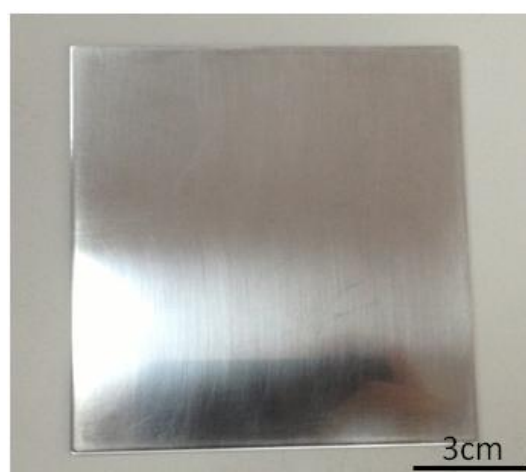
การสร้างแบบหล่อเพื่อให้ได้รูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ต้องการ ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อนี้ได้นำแนวคิดในการสร้างชิ้นงานระดับไมโครสเกลมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนกระบวนการที่นำประยุกต์ใช้คือกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง เป็นกระบวนการเปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์มโฟโตเรซิส (photoresist) ด้วยการฉายแสง เพื่อสร้างแบบหล่อที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครสเกลที่ต้องการ สำหรับรายละเอียดในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อมี่ดังนี้

1. เตรียมแผ่นซับสเตรต (substrate): ทำการขัดผิวของแผ่นสแตนเลสด้วยกระดาษทรายน้ำ โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด (เบอร์ 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000 ตามลำดับ) ทำให้พื้นผิวของแผ่นสแตนเลสมีความขรุขระเท่ากับ 0.112 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งการขัดผิวของของแผ่นสแตนเลสนี้จะส่งผลถึงการหลุดออกของโครงสร้างทองแดงที่ต้องการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับแผ่นสแตนเลสลดน้อยลง จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวจึงลดลงด้วย ช่วยทำให้โครงสร้างทองแดงหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้
2. การติดฟิล์มโฟโตเรซิส: การเคลือบแผ่นสแตนเลสที่ทำการขัดแล้วใช้เป็นแผ่นซับสเตรตด้วยฟิล์มโฟโตเรซิส โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ฟิล์มโฟโตเรซิสที่มีลักษณะเป็นแบบฟิล์มแข็ง (dry film) และมีคุณสมบัติเป็นเนกาทีฟ (negative photoresist, รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) ในการติดฟิล์มโฟโตเรซิสแบบฟิล์มแข็ง เริ่มต้นด้วยการตัดฟิล์มโฟโตเรซิสนี้ให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสแตนเลสเล็กน้อย จากนั้นทำติดฟิล์มโฟโตเรซิสลงแผ่นสแตนเลสด้วยเครื่องรีดฟิล์มไวแสง (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อให้ฟิล์มโฟโตเรซิสติดแน่นกับแผ่นสแตนเลสที่ทำการขัดผิวไว้แล้ว
3. การสร้างแบบหล่อ: เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ระดับไมโครสเกล ดังนั้นขั้นตอนนี้จะนำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอน โดยนำแผ่นแบบลวดลาย (mask) ซึ่งมีรูปร่างของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ต้องการวาดอยู่ แสดงดังภาพที่ 3.3 (ในงานวิจัยนี้จัดทำแผ่นลวดลายด้วยการวาดลวดลายขึ้นในโปรแกรม solid work จากนั้นจึงทำการพิมพ์ด้วยเลเซอร์ปรีนเตอร์ลงบนแผ่นใส) วางไว้

ด้านบนของฟิล์มโฟโตริซิสที่ทำการติดลงบนแผ่นสแตนเลสแล้ว โดยในการติดแผ่นลวดลายลงบนฟิล์มโฟโตริซิสจำเป็นต้องทำการติดแผ่นลวดลายให้เรียบสนิทกับฟิล์มเพื่อป้องกันการหักเหของแสงที่ทำการฉายทำให้ขนาดของแบบหล่อที่สร้างขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น หลังจากนั้นทำการฉายแสงยูวี (UV light) เป็นเวลา 20 วินาที ด้วยกล่องฉายยูวี (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) ส่วนของฟิล์มโฟโตริซิสที่กระทบกับแสง คุณสมบัติจะเปลี่ยนไปทำให้ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย (developer) ได้ช้า ในทางตรงกันข้ามส่วนของฟิล์มโฟโตริซิสที่ไม่กระทบกับแสงซึ่งมีลวดลายของแผ่นแบบกั้นอยู่ ฟิล์มจะทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทำการฉายแสงยูวีเสร็จ ทำการลอกแผ่นลวดลายออกจากแผ่นสแตนเลสและนำไปแช่ในตัวทำละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จนฟิล์มส่วนที่ไม่กระทบแสงหลุดออกทำให้เกิดรูปร่างของลวดลายตามแผ่นลวดลาย หลังจากนั้นนำแผ่นสแตนเลสที่ทำการสร้างลวดลายแล้วไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาทีด้วยเครื่องฮอตเพลต (hot plate) เพื่อระเหยน้ำที่อยู่บนแผ่นสแตนเลสออกและเป็นการทำให้ฟิล์มโฟโตริซิสแข็งตัวและยึดติดกับแผ่นสแตนเลสได้ดีขึ้น ภาพที่ 3.4 แสดงแผ่นสแตนเลสที่มีฟิล์มโฟโตริซิสเคลือบอยู่ด้านบนและได้ทำการสร้างลวดลายเรียบร้อยแล้ว

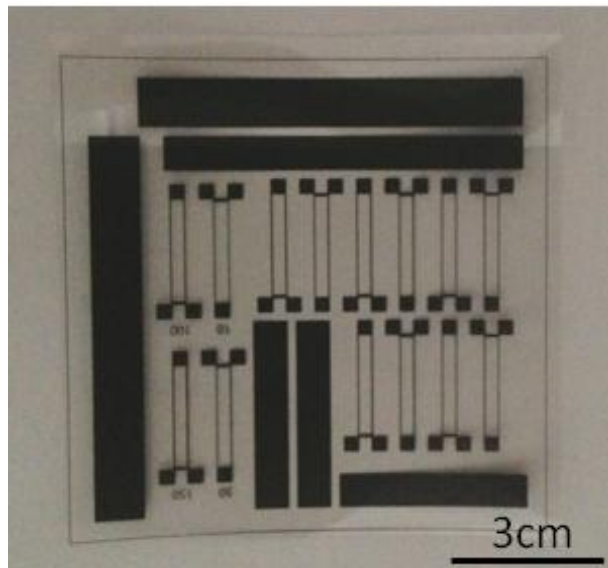


(ก)

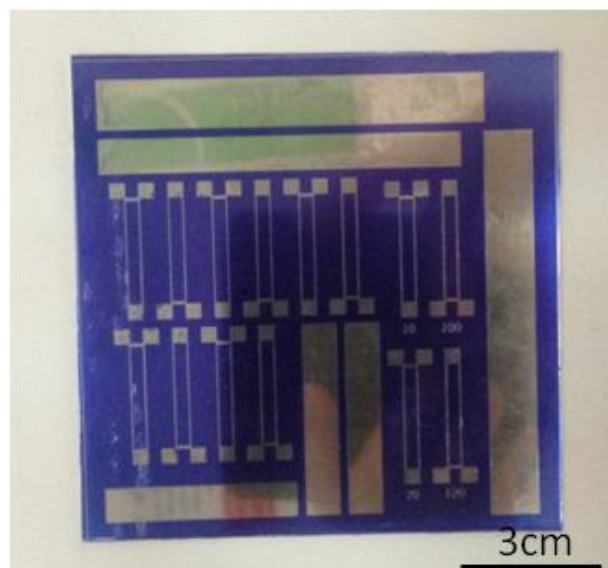


(ข)

ภาพที่ 3.2 แผ่นสแตนเลสที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ (ก) ก่อนขัด (ข) หลังขัด



ภาพที่ 3.3 แผ่นแบบลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง

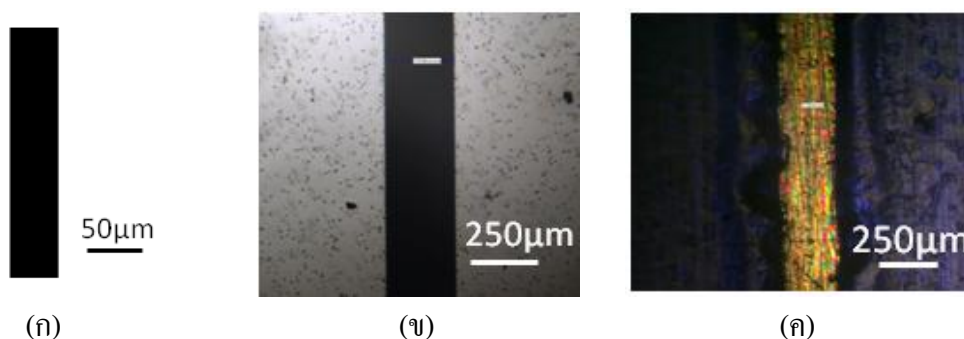


ภาพที่ 3.4 แผ่นสแตนเลสหลังจากการสร้างแบบหล่อ

3.1.2 ข้อจำกัดในการสร้างแบบหล่อ

หลังจากทำขั้นตอนการสร้างแบบหล่อเสร็จจึงได้ทำการตรวจสอบขนาดแบบหล่อของไมโครแอกซ์เวเตอร์บนแบบที่สร้างขึ้นพบว่า ขนาดขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในแบบหล่อมีขนาดใหญ่กว่าขนาดขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการสืบค้นด้วยการตรวจวัดขนาดขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในแบบหล่อที่สร้างขึ้น ขนาดขาของ

ไมโครเอกซเรย์ที่ทำการวาดด้วยโปรแกรม solid work และขนาดขาของไมโครเอกซเรย์บนแผ่นลวดลาย ภาพที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของแต่ละขนาดของชิ้นงานต่างๆเพื่อหาสาเหตุและข้อจำกัดในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดขาของไมโครเอกซเรย์บนแผ่นลวดลายกับขนาดขาของไมโครเอกซเรย์ในแบบหล่อบนแผ่นสแตนเลสจะมีค่าความผิดพลาดเพียง 1% ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดของไมโครเอกซเรย์บนแผ่นลวดลายกับขนาดไมโครเอกซเรย์ที่ทำการวาดในโปรแกรม solid work จะมีค่าความผิดพลาดถึง 320% จากการเปรียบเทียบขนาดขาของไมโครเอกซเรย์ในลักษณะนี้ สามารถสรุปได้ว่าความผิดพลาดที่ทำให้ขนาดแบบหล่อของไมโครเอกซเรย์มีขนาดที่ใหญ่กว่าที่ทำการออกแบบ เป็นผลจากการที่โปรแกรม solid work ที่ใช้ในการวาดแบบแผ่นลวดลายนี้อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับการวาดระดับไมโครสเกล ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในด้านของการใช้โปรแกรมในการวาดแผ่นลวดลาย หากต้องการวาดแผ่นลวดลายที่อยู่ระดับไมโครสเกล จำเป็นต้องเปลี่ยนโปรแกรมในการวาด เช่น AutoCAD เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแผ่นลวดลายที่ใช้ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อก็สามารถนำมาใช้งานในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อได้ แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของแบบหล่อที่จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นประมาณ 5 เท่า

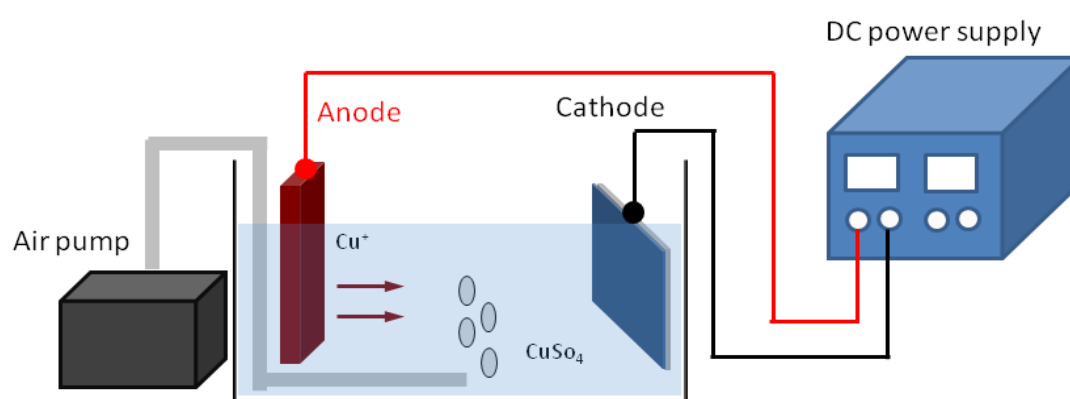


ภาพที่ 3.5 ขนาดขาของไมโครเอกซเรย์ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ (ก) แบบที่วาดในโปรแกรม solid work (ข) แบบบนแผ่นลวดลาย (ค) แบบในแบบหล่อบนแผ่นสแตนเลส

3.1.3 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นขั้นตอนการเคลือบโลหะจากอิเล็กโทรดหนึ่งลงบนอิเล็กโทรดอีกฝั่งหนึ่งที่จมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ โดยที่อิเล็กโทรดจะวิ่งจากขั้วแอโนดที่เป็นชิ้นโลหะที่ต้องการเคลือบผ่านไปยังขั้วแคโทดที่เป็นชิ้นงานที่ต้องการเคลือบโลหะหรือแผ่นสแตนเลสที่ทำการสร้างแบบหล่อแล้ว ในกระบวนการ

ดังกล่าวไอออนบวกจากขั้วแอโนดวิ่งผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังชิ้นงานที่ขั้วแคโทดได้ สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการเคลือบทองแดงซึ่งเป็นชิ้นโลหะที่ต้องการเคลือบลงบนแผ่นสแตนเลสที่ได้ทำการสร้างแบบหล่อขึ้นในขั้นตอนที่ผ่านมาแล้ว และใช้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีของทองแดง โค้ดแกรมของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีได้แสดงดังภาพที่ 3.6 (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) หลังจากทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้ว จึงนำแบบหล่อบนแผ่นสแตนเลสไปล้างออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อทำให้ได้ชิ้นงานหรือโครงสร้างทองแดงลอยตัวตามที่ต้องการ



ภาพที่ 3.6 โค้ดแกรมของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

ในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีต้องทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบเพื่อให้ไอออนของทองแดงจากขั้วแอโนดไปเกาะยังแผ่นสแตนเลส ดังนั้นในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีจึงจำเป็นต้องหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แนวคิดในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (current density) ในหน่วยมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรกับอัตราการปลูกฟิล์มของทองแดง (copper deposition rate) ในหน่วยไมโครเมตรต่อชั่วโมงของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยของภาคร นนทิวฒน์วิช [20] มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้ได้โครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวที่บางลงในระดับต่ำกว่า 50 ไมโครเมตร โดยมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าและพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

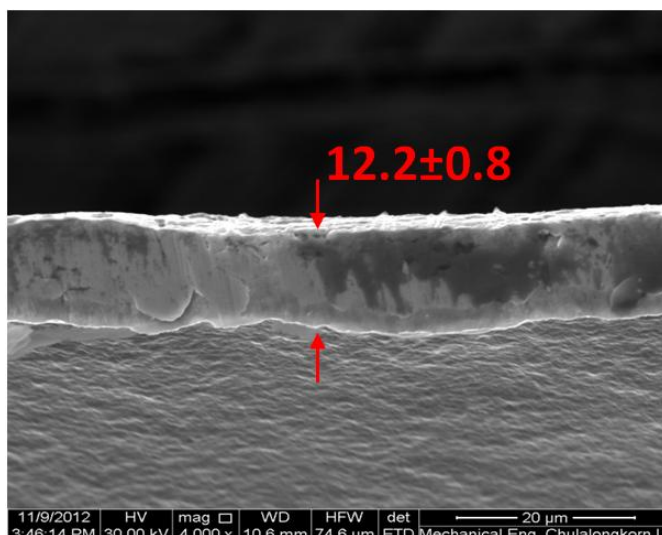
พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมป์)	500	500	500
พื้นที่ในการปลูกฟิล์มทองแดง (ตารางเซนติเมตร)	32.59	32.59	11.34
เวลาในการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (ชั่วโมง)	1	3	1.25
ความหนาของโครงสร้างทองแดง (ไมโครเมตร)	7.23±1.1	21.14±3.4	12.28±0.82

จากการทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีพบว่า การทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าตามพารามิเตอร์ครั้งที่หนึ่ง สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวที่มีความหนาประมาณ 7 ไมโครเมตรได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้งานต่อได้ เนื่องจากโครงสร้างทองแดงลอยตัวที่สร้างขึ้นไม่มีความแข็งแรงพอที่จะนำมาใช้งาน การทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าตามพารามิเตอร์ครั้งที่สองพบว่า สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวที่มีความแข็งแรงที่มีความหนาประมาณ 21 ไมโครเมตรได้ แต่เนื่องจากโครงสร้างทองแดงที่สร้างขึ้นนี้มีความหนาที่มากเกินไป จึงจำเป็นต้องทดลองเพิ่มเติมอีกหนึ่งครั้ง

การทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าในครั้งที่สามนี้สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวที่มีความแข็งแรงและมีความหนาประมาณ 12 ไมโครเมตรซึ่งบางลงมาได้ พารามิเตอร์ต่างๆ ในการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีดังนี้คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 44.1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และอัตราการปลูกฟิล์มของทองแดงเท่ากับ 9.82 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง โครงสร้างทองแดงลอยตัวที่สร้างขึ้นในครั้งที่สามนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและรูปภาพของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์แสดงดังภาพที่ 3.7 ซึ่งมีความหนาของโครงสร้างทองแดงลอยตัวโดยเฉลี่ยเท่ากับ 12.2±0.8 ไมโครเมตร และภาพตัดขวางของโครงสร้างทองแดงลอยตัวแสดงดังภาพที่ 3.8 ซึ่งเป็นรูปที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscopy, SEM)



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างทองแดงลอยตัวที่งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างขึ้น

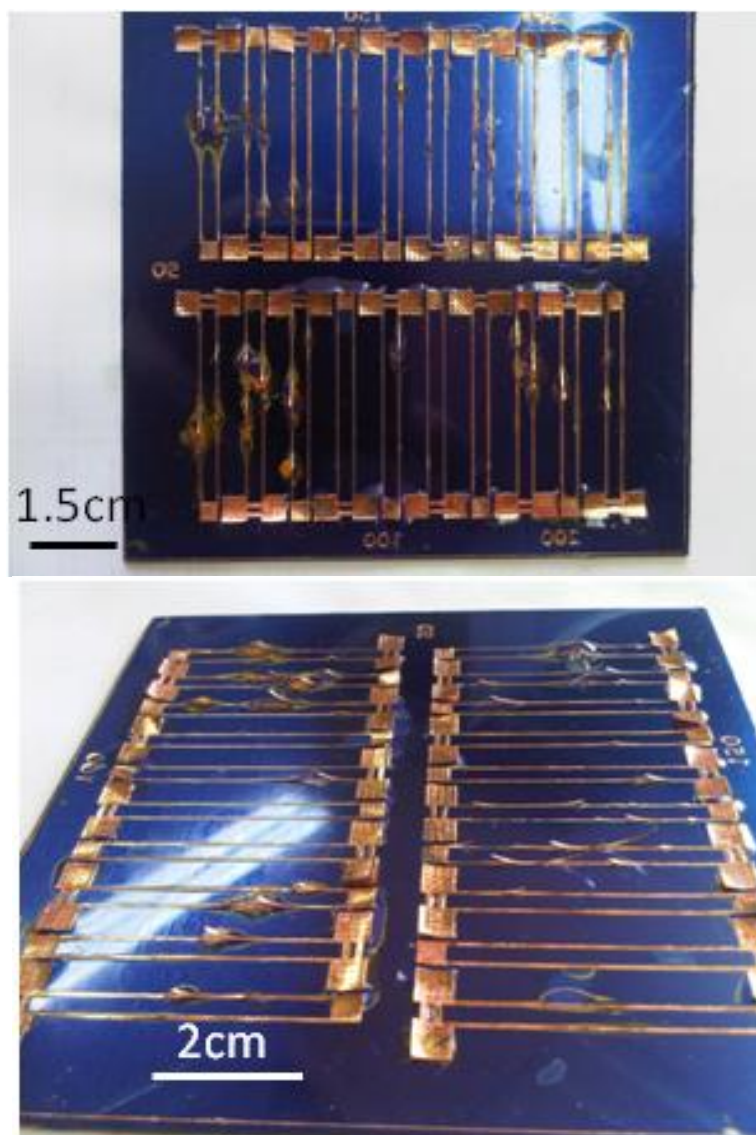


ภาพที่ 3.8 ภาพตัดขวางของโครงสร้างทองแดงลอยตัวซึ่งมีความหนาเท่ากับ 12.2 ± 0.8 ไมโครเมตร

3.1.4 ข้อจำกัดในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

ในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีจำเป็นต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดซึ่งเป็นทองแดงวิ่งผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังชิ้นงานที่ขั้วแคโทดที่เป็นแผ่นสแตนเลสได้ โดยข้อจำกัดในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีนี้ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 0.5 แอมแปร์ เพื่อลดความเสี่ยงที่ เกิดขึ้นระหว่างการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทำให้โครงสร้างทองแดงลอยตัวที่สร้างขึ้นเกิดการเสียหายได้ ภาพที่ 3.9 แสดงไมโครเอกซเรย์ที่ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงกว่า 0.5 แอมแปร์

จะเห็นได้ว่า ไมโครแอกซ์เวเตอร์เกิดการบิดงอเสียรูปและมีบางส่วนที่เกิดการหักเสียหาย ดังนั้น เพื่อป้องกันไม่เกิดความเสียหายแก่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้นในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีจำเป็นต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่ำกว่า 0.5 แอมแปร์



ภาพที่ 3.9 ลักษณะของไมโครแอกซ์เวเตอร์หลังจากทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีโดยจ่ายกระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.5 แอมแปร์

3.2 กระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิตินอล

สำหรับในกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงด้วยนิตินอลแสดงดังภาพที่ 3.10 นี้สามารถแบ่งเป็นสองขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอลด้วยกระบวนการสปัตเตอริงและขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอลที่อุณหภูมิสูง

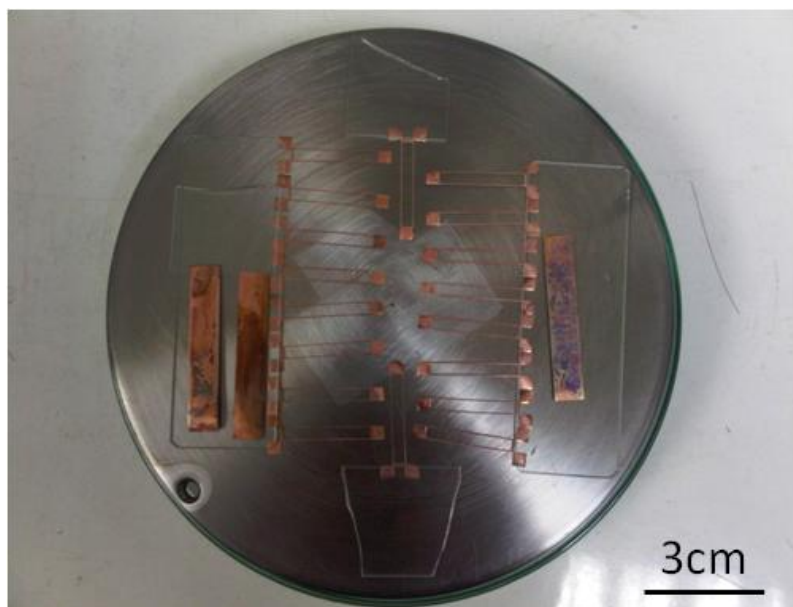


Sputtering Ni-Ti thin film and crystallization

ภาพที่ 3.10 กระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิตินอลและการอบที่อุณหภูมิสูง

3.2.1 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอล

ในงานวิจัยนี้จะทำการเคลือบผิวด้วยนิตินอลด้วยเครื่องสปัตเตอริง (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) โดยเริ่มจากนำโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวที่สร้างขึ้นวางลงบนฐาน (base) ของเครื่องสปัตเตอริง โดยมีการวางโครงสร้างทองแดงลอยตัวดังภาพที่ 3.11 แล้วนำฐานที่มีโครงสร้างทองแดงลอยตัวเรียงอยู่เข้าไปวางภายในเครื่องสปัตเตอริง หลังจากนั้นทำการเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อปรับสถานะในเครื่องสปัตเตอริงให้มีความดัน 10^{-5} มิลลิบาร์ เมื่อได้ความดันภายในเครื่องสปัตเตอริงตามที่ต้องการแล้ว ทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเครื่องสปัตเตอริงจนมีความดันภายในเครื่องสปัตเตอริงคงที่ที่ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ หลังจากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วย RF clean ที่กำลัง 75 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที และทำความสะอาดแผ่นนิตินอล (nitinol target) ที่มีอัตราส่วนระหว่างนิกเกิลและไททาเนียมเป็น 50:50 ด้วย DC magnetron sputtering ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงทำการเปิดชัตเตอร์เกตภายในเครื่องสปัตเตอริงเพื่อเริ่มสร้างฟิล์มนิตินอลลงบนโครงสร้างทองแดงลอยตัว โดยพลังงานที่ใช้ในการจ่ายให้กับ target ซึ่งเป็นนิตินอลที่ 580 โวลต์ ทำให้มีอัตราการปลูกฟิล์มของนิตินอล (nitinol deposition rate) ที่ 1 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเคลือบผิวด้วยนิตินอลที่มีความหนาเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ใดอะแกรมของการเคลือบผิวด้วยนิตินอลด้วยเครื่องสปัตเตอริงตามเทคนิคการสปัตเตอริงได้แสดงดังภาพที่ 1.20

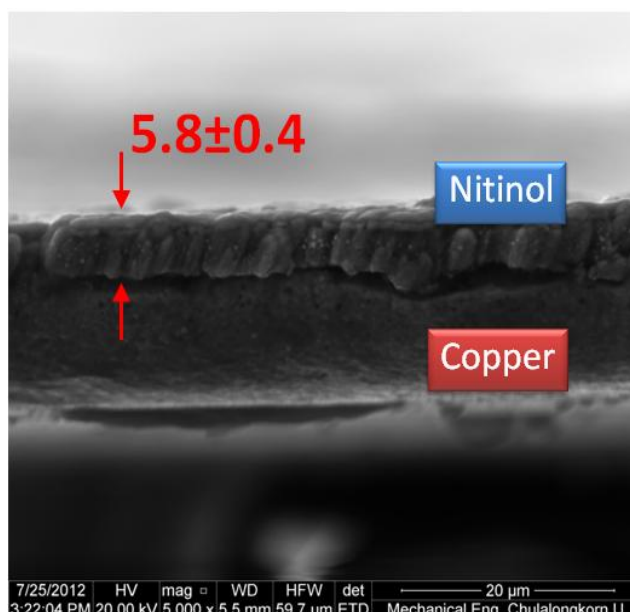


ภาพที่ 3.11 ลักษณะการวางโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวบนฐาน

หลังจากทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดความหนาของฟิล์มนิกเกิลที่สร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนพบว่า นิกเกิลที่ทำการปลูกบนโครงสร้างทองแดงจะมีความหนาเท่ากับ 5.8 ไมโครเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.4 ไมโครเมตรภาพที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้างทองแดงและนิกเกิล จากผลการวัดพบว่า ในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลทำให้เกิดฟิล์มนิกเกิลที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิกเกิลและคุณสมบัติเชิงกลของไมโครแอกซิวเอเตอร์ได้ แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มนิกเกิลที่ทำการปลูกบนโครงสร้างทองแดงนี้และมีการยึดติดที่ดีระหว่างผิวของฟิล์มนิกเกิลและผิวของโครงสร้างทองแดง

3.2.2 ข้อจำกัดในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล

จากการตรวจวัดความหนาของฟิล์มนิกเกิลที่สร้างขึ้นพบว่า นิกเกิลมีความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ อาจเกิดเนื่องจากเครื่องสเปคโตรริงที่ใช้ในขั้นตอนนี้มีความดันภายในเครื่องสเปคโตรริงต่ำไม่เพียงพอ โดยทั่วไปความดันภายในเครื่องสเปคโตรริงที่ใช้ในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลต้องมีความดัน 5×10^{-6} - 1×10^{-7} มิลลิบาร์ [21][22][23] โดยความดันภายในเครื่องสเปคโตรริงที่ต่ำนี้จะทำให้มีระยะทางอิสระ (mean free path, MFP) ที่เหมาะสมกับนิกเกิล ซึ่งจะทำได้ความหนาของฟิล์มนิกเกิลที่สม่ำเสมอได้

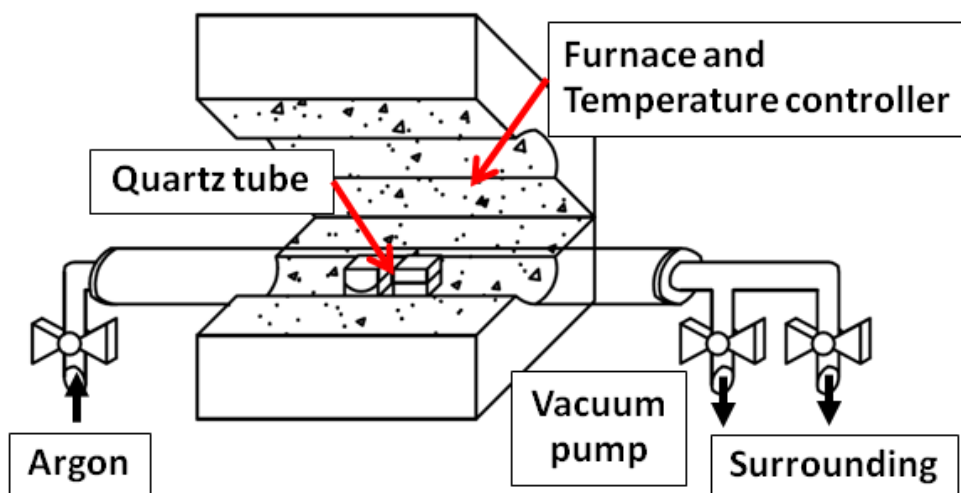


ภาพที่ 3.12 ภาพตัดขวางของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยนิตินอลบนโครงสร้างทองแดงลอยตัวมีความหนาเท่ากับ 5.8 ± 0.4 ไมโครเมตร

3.2.3 ขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอล

ขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอลนี้เป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้โครงสร้างภายในนิตินอลเปลี่ยนแปลงจากออมโพสเป็นโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปในการอบฟิล์มนิตินอลจะทำการอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียสเพื่อให้ฟิล์มนิตินอลมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ซึ่งขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอลนี้สามารถทำได้หลายเทคนิค เช่น อบในเตาภายใต้สุญญากาศที่สูง [16][17][5] หรือ อบด้วยเทคนิคการยิงเลเซอร์พลังงานสูง [18] เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้ทำการอบฟิล์มนิตินอลภายในเตาอบแบบหลอดควอทซ์ โดยมีก๊าซไหลผ่าน โดยไคอะแกรมของเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่านได้แสดงดังภาพที่ 3.13 (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ก) สาเหตุที่งานวิจัยนี้เลือกใช้เตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่านเนื่องจากเตาอบแบบหลอดควอทซ์เป็นเตาอบที่ง่ายต่อการใช้งานและเป็นเตาอบที่มีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ในทางตรงกันข้ามเตาอบแบบหลอดควอทซ์มีข้อเสียบางประการคือ เตาอบแบบหลอดควอทซ์มีอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่ำ (slow cooling rate) และไม่สามารถอบชิ้นงานในจำนวนมากได้เนื่องจากพื้นที่ภายในหลอดควอทซ์มีจำกัด



ภาพที่ 3.13 แผนผังของเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน

ในงานวิจัยนี้จะทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อยู่บนโครงสร้างทองแดงลอยตัวตามขั้นตอนต่อไปนี้ โดยเริ่มแรกจะนำไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่ทำการเคลือบผิวนิทินอลแล้ววางภายในแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งในงานวิจัยนี้มีแบบหล่อสำหรับอบไมโครแอคชัวเอเตอร์สองแบบคือ แบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ (flat mold) และแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง (curve mold) แสดงดังภาพที่ 3.14(ก) และ ภาพที่ 3.14(ข) โดยที่แบบหล่อคอนกรีตที่ใช้ในการอบสร้างมาจากคอนกรีตทนไฟและแบบหล่อที่มีลักษณะโค้งจะมีรัศมีความโค้งเท่ากับ 22 มิลลิเมตร สำหรับการวางไมโครแอคชัวเอเตอร์ภายในแบบหล่อจะทำการวางโดยให้ผิวของนิทินอลอยู่ด้านบนบนของโครงสร้างทองแดงลอยตัวดังภาพที่ 3.14(ก) และ ภาพที่ 3.14(ข) แล้วจึงทำการประกอบแบบหล่อให้มีลักษณะดังภาพที่ 3.15(ก) และ ภาพที่ 3.15(ข) ตามลำดับ หลังจากนั้นนำแบบหล่อที่ภายในมีไมโครแอคชัวเอเตอร์บรรจุอยู่เข้าไปในเตาอบแบบหลอดควอทซ์ และทำการกำจัดอากาศภายในเตาอบแบบหลอดควอทซ์ออกด้วยการเปิดปั๊มดูดทำให้ภายในหลอดควอทซ์มีความดันเป็นลบ (negative pressure) แล้วจึงทำปิดปั๊มดูดแล้วปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในหลอดควอทซ์ทำให้ความดันภายในหลอดควอทซ์เป็นบวก (positive pressure) จากนั้นหยุดปล่อยก๊าซอาร์กอนแล้วทำการเปิดปั๊มดูดเพื่อทำการกำจัดอากาศภายในหลอดควอทซ์อีกครั้ง โดยจะทำการกำจัดอากาศภายในหลอดควอทซ์ออกซ้ำ 3 รอบ หลังจากนั้นทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนไหลผ่านหลอดควอทซ์ให้ความดันภายในหลอดควอทซ์เป็นบวกตลอดขั้นตอนการอบ สำหรับเหตุผลที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ก๊าซอาร์กอน (Argon) เนื่องจากก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซที่มีราคาสูงและสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเตาอบแบบหลอดควอทซ์ซึ่งทำให้เกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวฟิล์มนิทินอลได้ เมื่อทำการกำจัดอากาศภายในหลอดควอทซ์เสร็จแล้วจึงทำการเปิดเตาอบโดยกำหนดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสำหรับการอบชิ้นงานที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีและกำหนดเวลาในการรักษาอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากนั้นเมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้วจึงปิดเตาอบและรอให้อุณหภูมิภายในเตาอบลดลงโดยมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 2.5 องศาเซลเซียสต่อนาที



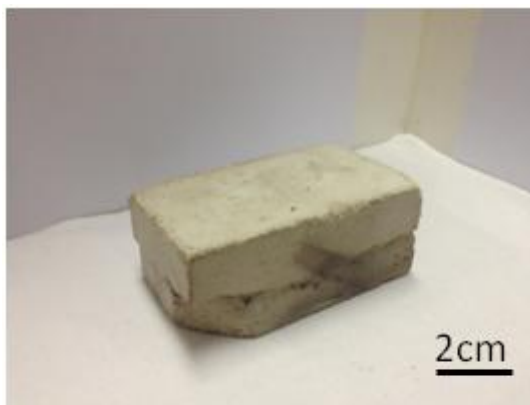
(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.14 ลักษณะการจัดวางไมโครแอคชูเอเตอร์ภายในแบบหล่อคอนกรีต

(ก) ที่มีลักษณะแบนราบ (ข) ที่มีลักษณะโค้ง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.15 แบบหล่อคอนกรีตและลักษณะการวางไมโครแอคชูเอเตอร์ภายในแบบหล่อคอนกรีต

(ก) ที่มีลักษณะแบนราบ (ข) ที่มีลักษณะโค้ง

3.2.4 ข้อจำกัดในขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอล

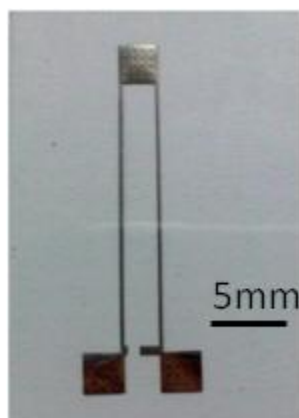
ในขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านได้ทำการอบไมโครแอคชูเอเตอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียสเพื่อต้องการทำให้โครงสร้างภายในของนิทินอลเปลี่ยนแปลงจากออมโพสเป็นโครงสร้างผลึก หลังจากทำการอบ

เมื่อเตาอบได้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง พบว่า สีของฟิล์มนิทินอลที่อยู่บนโครงสร้างทองแดงลอยตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีเงิน (ก่อนอบ) เป็นสีทองเล็กน้อย (หลังอบ) แสดงดังภาพที่ 3.16(ก) และภาพที่ 3.16 (ข) ตามลำดับซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ระหว่างทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิสูงได้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นภายในหลอดควอทซ์ ซึ่งอาจจะเกิดเพราะไม่สามารถกำจัดออกซิเจนออกจากหลอดควอทซ์ได้หมด หรือเกิดการรั่วเล็กน้อยระหว่างข้อต่อของระบบทำให้อากาศสามารถไหลเข้าไปในหลอดควอทซ์ได้ เป็นต้น ดังนั้นในการอบฟิล์มนิทินอลจำเป็นต้องคำนึงถึงการกำจัดอากาศภายในหลอดควอทซ์และข้อต่อของอุปกรณ์ต่างๆของระบบเพื่อให้ภายในหลอดควอทซ์ปราศจากก๊าซออกซิเจนอย่างแน่นอน และยังคงคำนึงถึงการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปภายในหลอดควอทซ์เพื่อทำให้ความดันภายในหลอดควอทซ์เป็นบวกที่สูงขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้มีก๊าซออกซิเจนเข้ามาในระบบได้ นอกจากการป้องกันออกซิเจนแล้วยังต้องคำนึงก๊าซที่ไม่พึงประสงค์อื่นๆเข้าไปในหลอดควอทซ์และทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ ภาพที่ 3.16(ค) แสดงผิวของฟิล์มนิทินอลบนไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่เกิดการปนเปื้อนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นระหว่างทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากภายในหลอดควอทซ์มีก๊าซไม่พึงประสงค์และก๊าซออกซิเจนอยู่ภายในระหว่างทำการอบฟิล์มนิทินอล จึงทำให้ผิวของฟิล์มนิทินอลมีลักษณะเป็นสีทองปนกับสีม่วงและสีฟ้าซึ่งทำให้คุณสมบัติของนิทินอลเปลี่ยนไปและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของไมโครแอกซ์เวเตอร์อีกด้วย

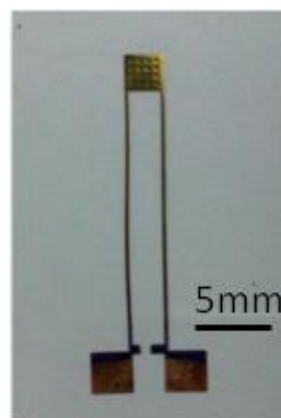
3.3 อิทธิผลของการอบฟิล์มที่อุณหภูมิสูงต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิทินอล

ขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิในงานอบไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถทำให้โครงสร้างภายในนิทินอลเปลี่ยนแปลงจากอมอर्फัสเป็นโครงสร้างผลึกด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน ในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบฟิล์มนิทินอลสามค่าคือ 500, 600 และ 650 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาการอบคงที่เท่ากับ 30 นาที และมีพารามิเตอร์อื่นๆดังแสดงในตารางที่ 3.2

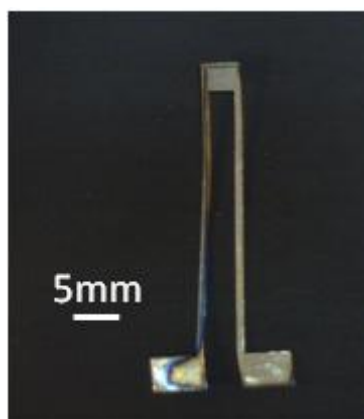
หลังจากทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิต่างๆแล้ว ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแพ็คเกจหลักที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิทินอลคือ ความเป็นโครงสร้างผลึกของนิทินอล อัตราส่วนระหว่างไททานเนียมกับนิกเกิลและช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนรูปร่าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy, EDS) และเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3.16 ลักษณะของผิวฟิล์มนิกทินอลบน โครงสร้างทองแดง (ก) ก่อนทำการอบ (ข) หลังจากทำการอบด้วยเตาอบ (ค) หลังจากทำการอบและเกิดการปนเปื้อนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในขั้นตอนการอบฟิล์มนิกทินอล

พารามิเตอร์	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
อุณหภูมิในการอบคงที่ ($^{\circ}\text{C}$)	500	600	650
เวลาในการอบคงที่ (min)	30		
อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	10		
อัตราการลดของอุณหภูมิโดยเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	2.5		

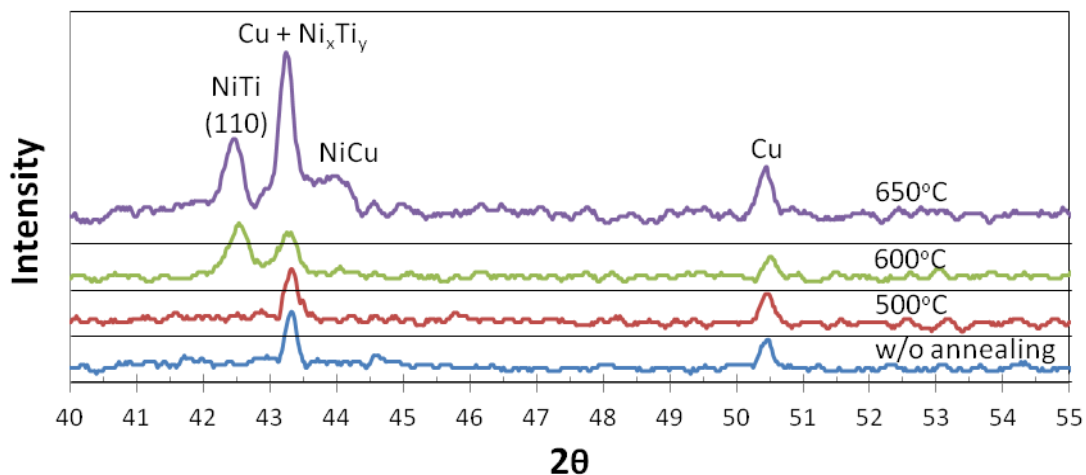
3.3.1 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ข) เป็นเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อตรวจสอบลักษณะ

ของโครงสร้างของวัสดุรวมถึงระบุส่วนประกอบวัสดุได้ ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 500, 600 และ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที รวมทั้งหมด 4 ชิ้นงานเปรียบเทียบกัน

กราฟความสัมพันธ์ของสององศาที่ระบุเอกลักษณ์ของธาตุต่อค่าพลังงานแสดง ดังภาพที่ 3.17 เป็นกราฟแสดงผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันที่ไม่ทำการอบและทำการอบ ณ อุณหภูมิต่างๆจากกราฟพบว่าโครงสร้างไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะไม่แสดงค่าสูงสุด (peak) ของพลังงานของโครงสร้างผลึกของนิทินอล ซึ่งค่าสูงสุดของพลังงานของโครงสร้างผลึกของนิทินอลจะแสดงที่ 42.5 องศาในกราฟ ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า ไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอมอर्फัส ในทางตรงกันข้ามโครงสร้างของกราฟของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียสจะแสดงค่าสูงสุดของพลังงานของโครงสร้างผลึกของนิทินอล นอกจากนี้ไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกของนิทินอลที่มากกว่าไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามที่การอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดโครงสร้างนิกเกิลทองแดง (NiCu) เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดของพลังงานของโครงสร้างผลึกของนิกเกิลทองแดงที่ 44 องศาในกราฟ นอกจากนี้ภายในฟิล์มของนิทินอลที่ทำการอบนี้มีโอกาสที่จะมีโครงสร้างผลึกของนิกเกิลไตรไททาเนียม (Ni₃Ti) เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งมีค่าสูงสุดของพลังงานของโครงสร้างผลึกของนิกเกิลไตรไททาเนียมที่ 43 องศาในกราฟและมีโครงสร้างผลึกของนิกเกิลไตรไททาเนียมสูงกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำๆ [24][25]

จากผลการทดสอบดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสและมีระยะเวลาในการอบ 30 นาทีไปใช้งานต่อเท่านั้น เนื่องจากไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาในการอบ 30 นาทีนี้สามารถทำให้โครงสร้างภายในของฟิล์มนิทินอลเปลี่ยนแปลงจากอมอर्फัสเป็นโครงสร้างผลึกได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการอบที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยโครงสร้างผลึกของนิทินอลที่เกิดขึ้นหลังจากการทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสนี้จะเป็นโครงสร้างผลึกแบบออสเทนไนต์ ณ อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.17 ผลการทดสอบของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ ที่ทำการอบ ณ อุณหภูมิต่างๆ

3.3.2 การทดสอบฟิล์มนิทินอลด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ข) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยอาศัยการวัดพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่คายออกมา ซึ่งธาตุแต่ละธาตุจะมีการคายพลังงานที่แตกต่างกัน จากหลักการนี้จึงสามารถระบุได้ว่าสารตัวอย่างที่ทำกรวิเคราะห์นี้เป็นธาตุชนิดใด การทดสอบพื้นผิวฟิล์มนิทินอลด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบพื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบและพื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองชิ้นงาน

ภาพที่ 3.18 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของพื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่จะนำไปวิเคราะห์ พบว่า พื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและไม่มีร่องลึกปรากฏ แต่พื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบจะมีร่องลึกที่ชัดเจนมากกว่า

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ธาตุนบนพื้นผิวฟิล์มนิทินอล กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าพลังงานสำหรับธาตุต่างๆแสดงดังภาพที่ 3.19 และภาพที่ 3.20 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ธาตุของพื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบและที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศา ตามลำดับ จากกราฟทั้งสองพบว่า พื้นผิวฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบจะประกอบด้วยนิทินอลและไททาเนียมเป็นหลัก แต่พื้นผิวของฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบจะประกอบด้วยนิทินอล ไททาเนียมและมีออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น

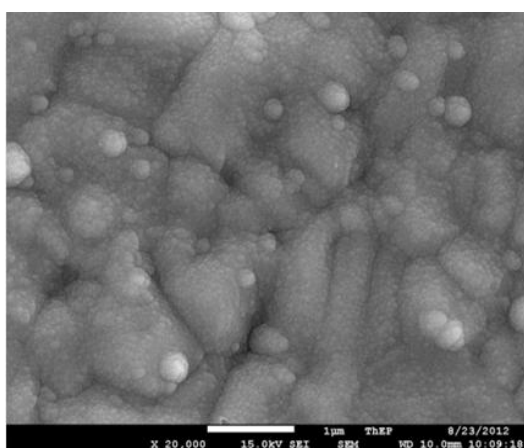
ในการทดสอบฟิล์มฟิล์มนิทินอลด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานจะทำการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มฟิล์มนิทินอลอย่างละสามตำแหน่งที่ต่างกันแล้วนำผลการทดสอบมาทำการเฉลี่ย จาก การทดสอบฟิล์มฟิล์มนิทินอลพบว่า อัตราส่วนของธาตุโดยเฉลี่ยของฟิล์มฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำ การอบจะมี 38.9% ของไททานเนียมและ 61.1%ของนิกเกิลหลังจากทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสแล้วจะมี 38%ของไททานเนียม 33.5%ของนิกเกิลและ 28.5%ของออกซิเจน ซึ่ง สามารถวิเคราะห์ได้ว่าในขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมี ก๊าซอาร์กอนไหลผ่านจะมีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นระหว่างการอบหรืออีกนัยหนึ่งคือ การปล่อย ก๊าซอาร์กอนไหลผ่านไม่สามารถกำจัดก๊าซออกซิเจนภายในหลอดควอทซ์ได้หมด จึงทำให้ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาอัตราส่วนระหว่างไททานเนียมกับนิกเกิล ของฟิล์มฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบกับฟิล์มฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของธาตุโดยเฉลี่ยจาก Ti:Ni เป็น 38.9:61.1 ไปเป็น 53.1:46.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า นิกเกิลของฟิล์มฟิล์มนิทินอลมีอัตราส่วนที่ลดลง หลังจากทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส สาเหตุหนึ่งที่มีความเป็นไปได้คือ นิกเกิลของ ฟิล์มฟิล์มนิทินอลอาจมีการแพร่ลงไปในโครงสร้างทองแดงจึงทำให้นิกเกิลบนพื้นผิวของฟิล์ม นิทินอลลดลง อีกทั้งยังมีการรวมตัวระหว่างนิกเกิลกับทองแดงซึ่งทำให้โครงสร้างนิกเกิลทองแดง เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ข้างต้น

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มฟิล์มนิทินอลด้านตัดขวาง (cross-section) ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับ ทองแดง ในการทดสอบนี้ทำการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่ อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ตัวอย่างละ 2 ชิ้นเปรียบเทียบกับด้วย โดยจะทำการวิเคราะห์ธาตุ ณ จุดบริเวณพื้นที่ด้านตัดขวางของฟิล์มนิทินอล ตัวอย่างละ 7 จุด โดยมีตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ธาตุของไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองแบบห่างกันประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.21(ก) และ ภาพที่ 3.21(ข) ตามลำดับ

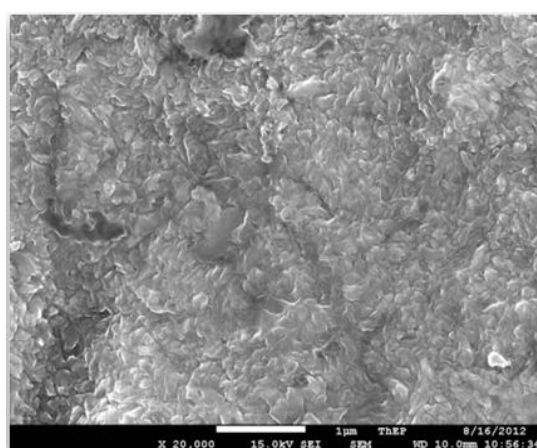
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ต่ออัตราส่วนของธาตุนบนด้าน ตัดขวางของฟิล์มนิทินอลแสดงในภาพที่ 3.22 และ ภาพที่ 3.23 ซึ่งเป็นผลการทดสอบด้วย เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับจากกราฟทั้งสองพบว่า ฟิล์มฟิล์มนิทินอลด้านตัดขวางของไมโครแอกซ์ เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบประกอบด้วยไททานเนียม นิกเกิลและออกซิเจนทั่วบริเวณที่ทำการวิเคราะห์ธาตุ และมีอัตราส่วนของไททานเนียมกับนิกเกิลที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งแนวตัดขวาง ในทางตรงกันข้าม

ฟิล์มนิทินอลของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีจะประกอบด้วยไททานเนียม นิกเกิล ทองแดงและออกซิเจน โดยที่ออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่มากกว่าพื้นผิวฟิล์มนิทินอลด้านขวางของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ อีกทั้งในส่วนของทองแดงที่มีการแพร่เข้าไปในนิทินอลและมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อฟิล์มนิทินอลใกล้กับชั้นทองแดง นอกจากนี้อัตราส่วนไททานเนียมและนิกเกิลของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสจะมีอัตราส่วนที่ไม่คงที่ โดยจุดที่ 1 และ 2 ฟิล์มนิทินอลจะมีอัตราส่วนของนิกเกิลมากกว่าไททานเนียม แต่ตั้งแต่จุดที่ 3 ลงไป ฟิล์มนิทินอลจะมีอัตราส่วนของไททานเนียมมากกว่านิกเกิลแต่เป็นอัตราส่วนที่ไม่สม่ำเสมอ

จากผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานทั้งบนพื้นผิวบนฟิล์มนิทินอลและพื้นผิวฟิล์มนิทินอลด้านตัดขวางสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวมากขึ้น และยังทำให้ทองแดงแพร่เข้าไปในชั้นฟิล์มนิทินอลซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างที่เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ออกซิเจนบนพื้นผิวของฟิล์มนิทินอลอาจเข้าไปรวมตัวกับไททานเนียมที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์ขึ้นซึ่งอาจส่งผลทำให้พื้นผิวฟิล์มนิทินอลบริเวณนั้นมีอัตราส่วนของนิกเกิลที่มากกว่า หรือปรากฏการณ์การแพร่ของทองแดงเข้าไปในชั้นฟิล์มนิทินอลและเข้าไปรวมตัวกับนิกเกิลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของนิกเกิลทองแดงขึ้นซึ่งอาจส่งผลทำให้พื้นผิวฟิล์มนิทินอลบริเวณนั้นมีอัตราส่วนของไททานเนียมมากกว่า เป็นต้น

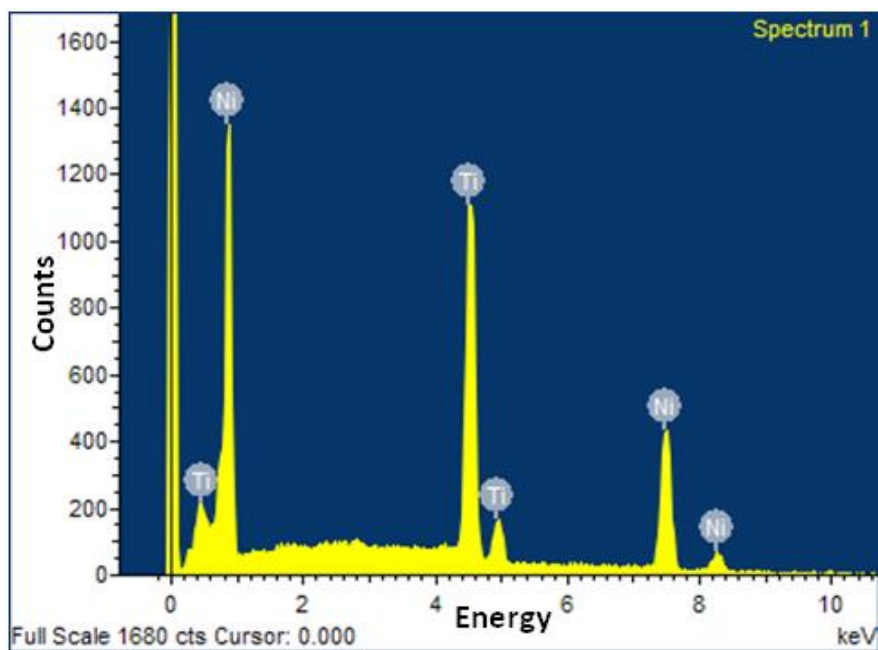


(ก)

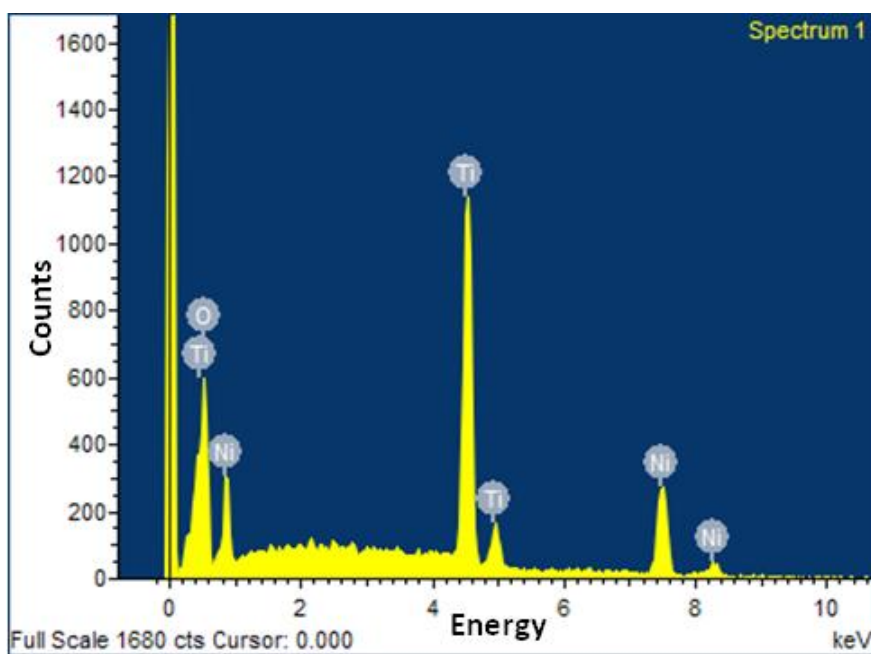


(ข)

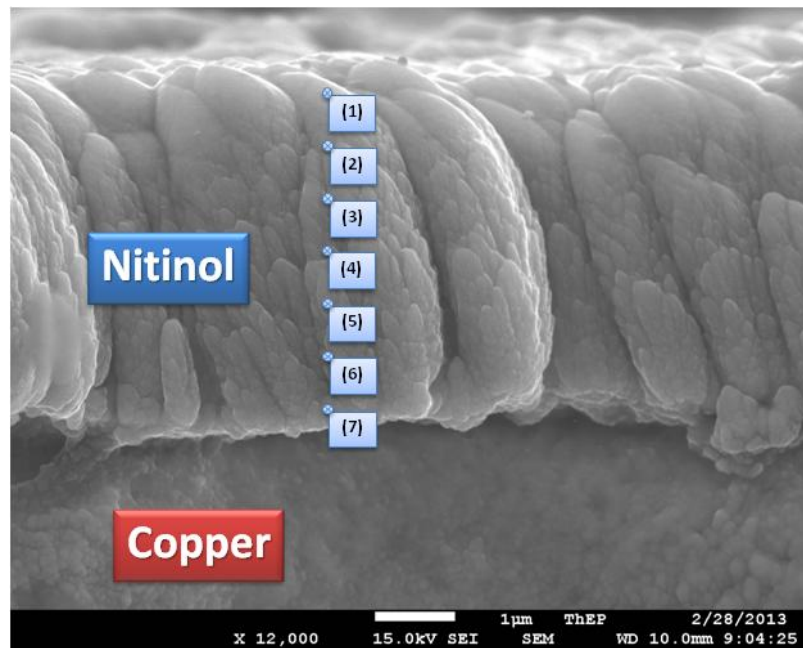
ภาพที่ 3.18 พื้นผิวของฟิล์มนิทินอล (ก) ผิวฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบ (ข) ผิวฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส



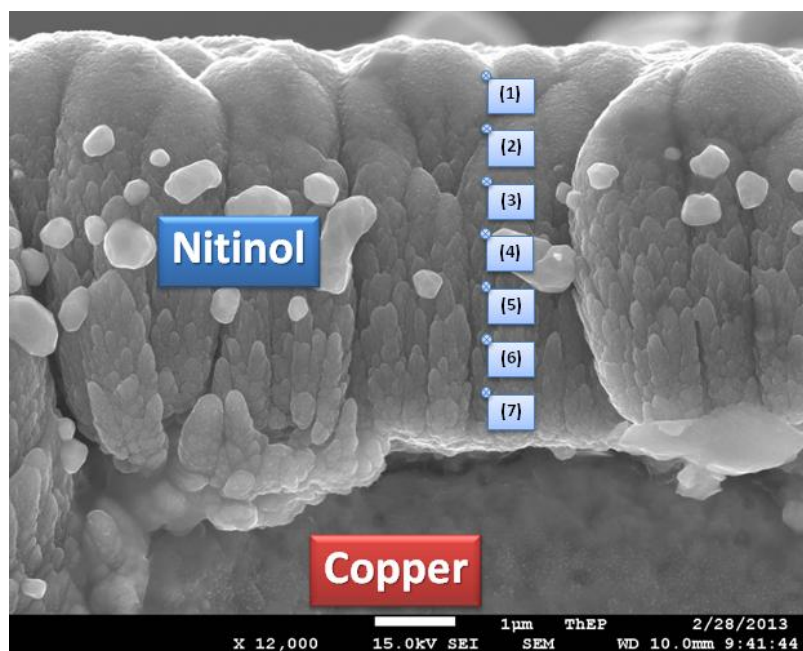
ภาพที่ 3.19 ผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของฟิล์มนิตินอลที่ไม่ทำการอบ



ภาพที่ 3.20 ผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานของฟิล์มนิตินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที

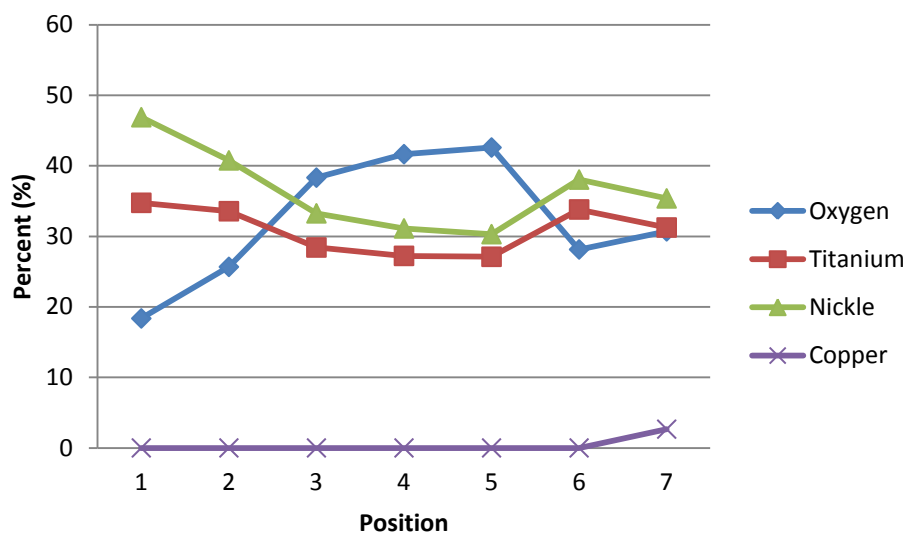


(ก)

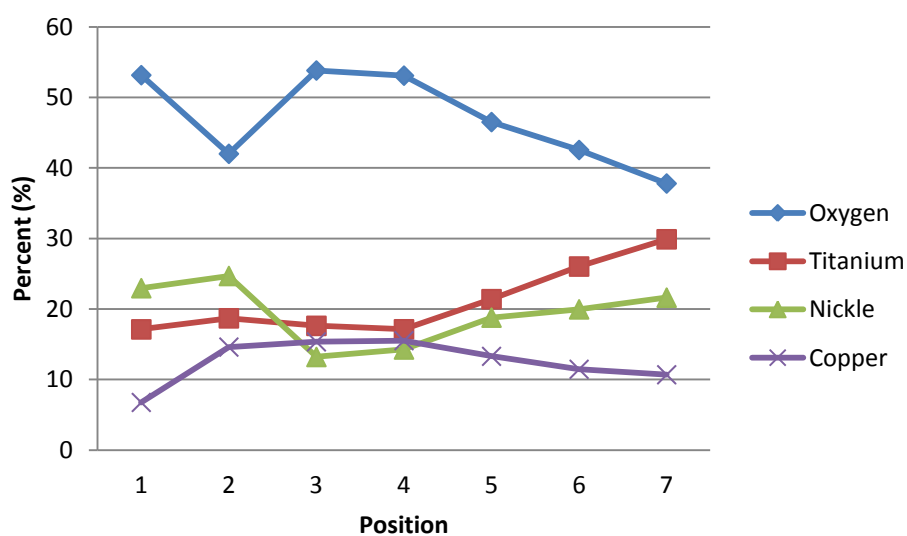


(ข)

ภาพที่ 3.21 แสดงตำแหน่งการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่ด้านตัดขวางของ ไมโครแอคชูเอเตอร์ (ก) ที่ไม่ทำการอบ (ข) ที่ทำการอบที่ 650 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.22 อัตราส่วนของธาตุบนด้านตัดขวางของฟิล์มนิกเกิลที่ไม่ทำการอบ ณ ตำแหน่งต่างๆ (ภาพที่ 3.21(ก))



ภาพที่ 3.23 อัตราส่วนของธาตุบนด้านตัดขวางของฟิล์มนิกเกิลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ณ ตำแหน่งต่างๆ (ภาพที่ 3.21(ข))

3.3.3 การทดสอบฟิล์มนิทีนอลด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน

เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ข) เป็นเครื่องที่ใช้เทคนิคในการวิเคราะห์วัสดุด้วยการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจากการวัดการถ่ายเทความร้อน โดยค่าพลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทั้งสองสารจะมีค่าแตกต่างกันต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยพื้นที่ภายในกราฟของการทดสอบที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความร้อนและโครงสร้างภายในของสารตัวอย่างด้วยเช่นกัน

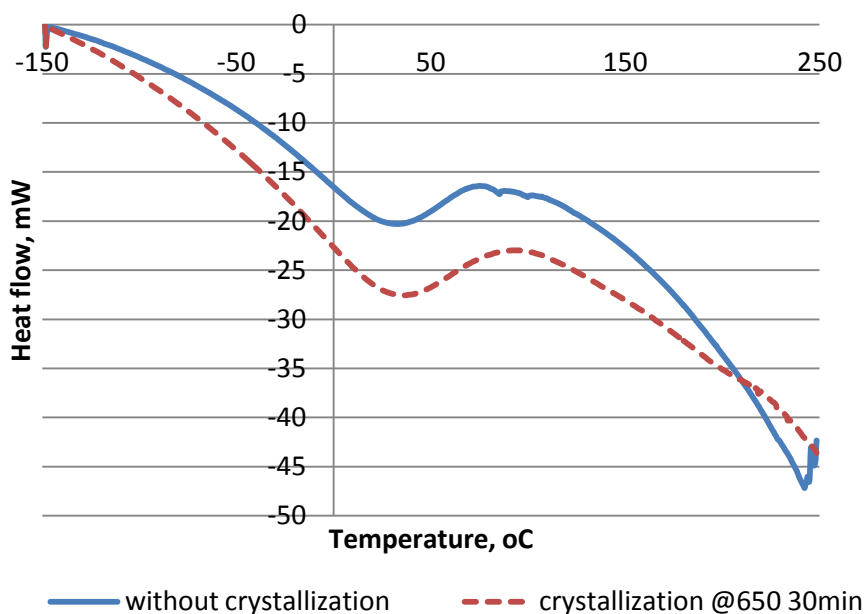
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบต่อค่าพลังงานความร้อนที่เปรียบเทียบกับสารตัวอย่างของฟิล์มนิทีนอลทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีแสดงในภาพที่ 3.24 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทำการทดสอบต่อค่าพลังงานความร้อนที่เปรียบเทียบกับสารตัวอย่างของฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีแสดงในภาพที่ 3.25(ก) และภาพที่ 3.25(ข) ตามลำดับ ซึ่งฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบได้จากการสเป็คเตอรึงฟิล์มนิทีนอลบนกระจกและเนื่องจากการยึดเกาะบนกระจกไม่ดีทำให้สามารถลอกฟิล์มดังกล่าวออกมาได้ หลังจากนั้นจึงนำฟิล์มนิทีนอลที่ลอกออกมาไปอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีและนำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนนี้เปรียบเทียบกับฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบ

จากภาพที่ 3.24 พบว่าฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบมีค่าพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าพลังงานความร้อนในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบ เนื่องจากฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงฟิล์มนั้นจะมีสารประกอบอื่นเกิดขึ้นบนฟิล์มนิทีนอล ตัวอย่างเช่น ไททานเนียมไดออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ เป็นต้นจึงทำให้ฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูงกว่า เมื่อทำการทดสอบฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบจะมีการคายพลังงานมากกว่าฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบจึงทำให้ฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบมีความชันในกราฟที่ติดลบมากกว่านั่นก็คือมีการใช้พลังงานในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่า

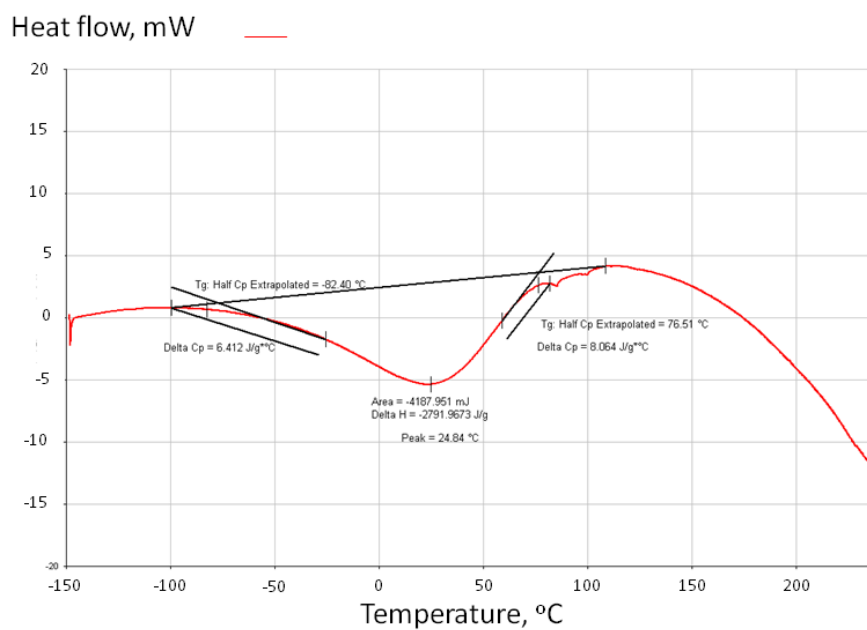
จากภาพที่ 3.25 พบว่าฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบมีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอยู่ในช่วง -82.40 องศาเซลเซียสและ 76.51 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้ามฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบจะมีช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในในช่วง -107.96 องศาเซลเซียสและสิ้นสุด 97.75 องศาเซลเซียสซึ่งจะเห็นได้ว่า ฟิล์มทั้งสองชนิดมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันแต่ฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบจะมี

ค่าพลังงานที่น้อยกว่า โดยพื้นที่ภายในกราฟของฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบจะมีพื้นที่มากกว่าพื้นที่ภายในกราฟของฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ภายในกราฟถึง 60% เนื่องจากฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีโครงสร้างผลึกนิทินอลมากขึ้น เมื่อทำการทดสอบฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในมากกว่าฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบถึง 60%

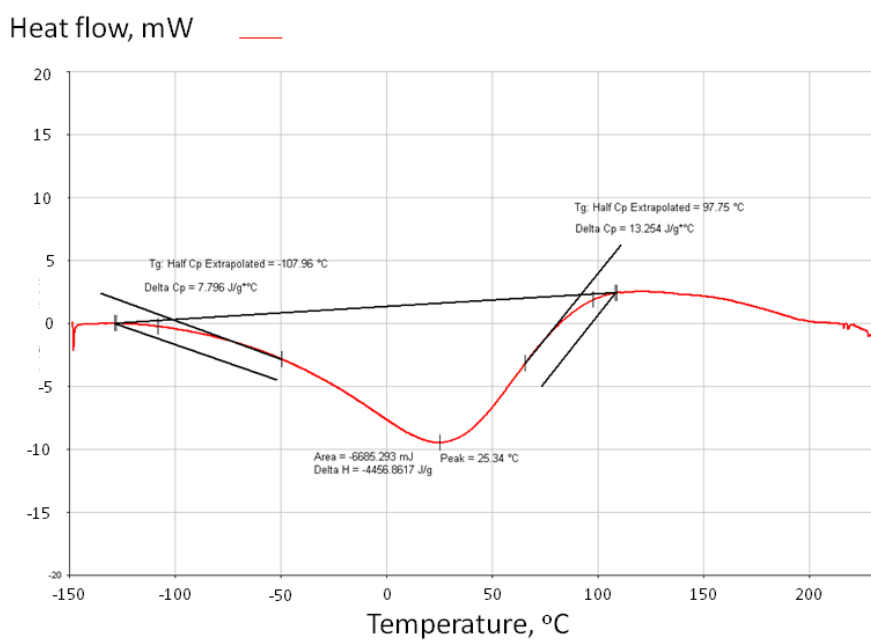
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีจะใช้พลังงานในเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่าฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบเนื่องจากหลังจากการอบที่อุณหภูมิสูงฟิล์มนิทินอลจะมีโครงสร้างผลึกที่มากกว่าฟิล์มนิทินอลถึง 60% โดยที่ฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบจะมีการคายพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จึงทำให้ใช้พลังงานที่น้อยกว่าเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยผลการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนนี้จะมีผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานคือ ฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างผลึกที่มากกว่าจึงจำเป็นต้องใช้ค่าพลังงานที่สูงในการเปลี่ยนอุณหภูมิ แต่ช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานจะเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต้องและสิ้นสุดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต้องซึ่งเป็นคุณสมบัติของนิทินอลที่มีอัตราส่วนของนิกเกิลมากกว่าไททานเนียม (Ni-rich)



ภาพที่ 3.24 ผลทดสอบเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.25 ผลการทดสอบการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มนิทินอล
(ก) ที่ไม่ทำการอบ (ข) ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.4 สรุปผลการสร้างไมโครแอคซิวเอเตอร์แบบใหม่

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเสนอกระบวนการสร้างไมโครแอคซิวเอเตอร์แบบใหม่โดยไม่ใช้แผ่นซิลิกอน โดยประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างเพียงสองขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวและกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวด้วยนิกเกิล ซึ่งรายละเอียดในการสร้างไมโครแอคซิวเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นกานสองชั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ถึงตารางที่ 3.5 นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ข้อจำกัดต่างๆรวมทั้งข้อเสนอแนะในกระบวนการสร้างไมโครแอคซิวเอเตอร์แบบใหม่ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการสร้างแบบหล่อมีค่าความผิดพลาดในการสร้างแบบหล่อ 1% โดยเปรียบเทียบจากขนาดของไมโครแอคซิวเอเตอร์บนแผ่นลวดลายกับขนาดไมโครแอคซิวเอเตอร์บนแบบหล่อซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อได้ดี แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แนะนำให้เปลี่ยนโปรแกรมในการวาดลวดลาย เนื่องจากโปรแกรม solid work อาจจะเป็นโปรแกรมที่ไม่เหมาะสมสำหรับการวาดลวดลายในระดับไมโครสเกล ซึ่งจากการตรวจวัดจะมีค่าความผิดพลาดในการออกแบบ 320% จากขนาดที่ตั้งใจออกแบบไว้
2. ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 0.5 แอมแปร์ สำหรับระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเท่ากับ 14 เซนติเมตรเพื่อลดความเค้นที่จะเกิดขึ้นระหว่างการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีและลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายต่อไมโครแอคซิวเอเตอร์ สำหรับในงานวิจัยนี้สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงตามที่ต้องการได้โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 44.1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีอัตราการปลูกฟิล์มของทองแดงเท่ากับ 9.82 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง และโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวที่สร้างได้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีความหนาที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งาน
3. ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล (Ti:Ni = 50:50) สามารถสร้างฟิล์มนิกเกิลที่มีความหนาเท่ากับ 5.8 ไมโครเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.4 ไมโครเมตร จากค่าความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า ในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลทำให้เกิดฟิล์มนิกเกิลที่ไม่สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มนิกเกิลที่ทำการปลูกบนโครงสร้างทองแดงมีการยึดติดที่ดี โดยมีนิกเกิลเป็นธาตุส่วนใหญ่ในฟิล์มนิกเกิล

4. การอบฟิล์มนิทินอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สามารถทำให้โครงสร้างของนิทินอลเปลี่ยนจากอมอฟัสเป็น โครงสร้างผลึกได้และมีแนวโน้มที่โครงสร้างผลึกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มนิทินอลที่ไม่ทำการอบกับการอบที่อุณหภูมิสูง จะเห็นได้ว่า ฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างผลึกของนิทินอลที่มากกว่านิทินอลที่ไม่ทำการอบ อัตราส่วนของธาตุของฟิล์มนิทินอลที่ทำการอบจะเปลี่ยนไป โดยจะมีออกซิเจนและทองแดงเกิดขึ้นในฟิล์มนิทินอล ซึ่งทองแดงรวมตัวกับนิกเกิลในชั้นฟิล์มนิทินอลจะส่งผลทำให้มีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

ตารางที่ 3.3 กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัว

ขั้นตอน	รายละเอียด	จุดประสงค์
1. การเตรียมแผ่นสแตนเลส	กระดาษทรายน้ำที่ใช้ในการขัด โดยเริ่มจากเบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด (เบอร์ 800, 1000, 1200, 1500 และ 2000 ตามลำดับ), แผ่นสแตนเลสมีค่าความขรุขระเท่ากับ 0.112 ไมโครเมตร	เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับแผ่นสแตนเลส
2. การติดฟิล์มโฟโตรีซิส	อุณหภูมิเครื่องรีดฟิล์มไวแสง 90 องศาเซลเซียส	เพื่อทำให้โฟโตรีซิสติดกับแผ่นสแตนเลสได้ดีขึ้น
3. การสร้างแบบหล่อ		
- ฉายแสงยูวี	ฉายแสงยูวีด้วยกล่องฉายยูวี 20 วินาที	เพื่อให้ส่วนที่ถูกแสงไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไปคาร์บอเนต
- ล้างโฟโตรีซิสด้วยสารละลายโซเดียมไปคาร์บอเนต	อัตราส่วนผสมของสารละลายโซเดียมไปคาร์บอเนต 1กรัม:น้ำ 100 มิลลิลิตร	เพื่อกำจัดโฟโตรีซิสที่ไม่ถูกแสงออก
- อบ	อุณหภูมิบนเครื่องฮอตเพลต 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที	เพื่อระเหยน้ำที่อยู่บนแผ่นสแตนเลสออกและเป็นการทำให้ฟิล์มโฟโตรีซิสแข็งตัวและยึดติดกับแผ่นสแตนเลสได้ดีขึ้น
4. การชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี		
- กำหนดค่ากระแสไฟฟ้า	ใช้กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 0.5 แอมแปร์ ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเท่ากับ 14 เซนติเมตร	เพื่อปลูกฟิล์มทองแดงลงบนแผ่นสแตนเลส
- ล้างโฟโตรีซิสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5 โมลาร์	

ตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอล

ขั้นตอน	รายละเอียด
1. ลดความดันภายในเครื่องสปัตเตอร์ริง	ความดันภายในเครื่องสปัตเตอร์ริง 10^{-5} มิลลิบาร์
2. ปล่อก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเครื่องสปัตเตอร์ริง	หลังจากปล่อก๊าซอาร์กอนความดันภายในเครื่องสปัตเตอร์ริงเท่ากับ 3×10^{-3} มิลลิบาร์
3. ทำความสะอาดชิ้นงาน	เปิด RF clean ที่กำลัง 75 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นนิตินอล (nitinol target)	เปิด DC magnetron sputtering ด้วยกระแสไฟฟ้า 0.2 แอมแปร์ เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเปิดชัตเตอร์เกท
5. สร้างฟิล์มนิตินอลบนโครงสร้างทองแดงลอยตัว	อัตราการปลูกฟิล์มของนิตินอล 1 ไมโครเมตรต่อ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.5 ขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอล

ขั้นตอน	รายละเอียด
1. นำไมโครแอกซ์เวเตอร์เข้าเตาอบแบบหลอดควอทซ์	นำไมโครแอกซ์เวเตอร์วางภายในแบบหล่อคอนกรีตแล้วนำไปวางไว้บริเวณตรงกลางเตาอบ
2. ทำการกำจัดอากาศภายในหลอดควอทซ์ (ซ้ำ 3 รอบ)	เปิดปั๊มดูดทำให้ภายในหลอดควอทซ์มีความดันเป็นลบ หลังจากนั้นทำปิดปั๊มดูดแล้วทำการปล่อก๊าซอาร์กอนเข้าไปในหลอดควอทซ์ทำให้ความดันภายในหลอดควอทซ์เป็นบวก จากนั้นหยุดปล่อก๊าซอาร์กอนแล้วทำการเปิดปั๊มดูดเพื่อทำซ้ำโดยทำซ้ำ 3 รอบ
3. ทำการปล่อก๊าซอาร์กอนตลอดขั้นตอนการอบ	ปล่อก๊าซอาร์กอนให้ความดันภายในหลอดควอทซ์เป็นบวกตลอดขั้นตอนการอบ
4. ทำการอบฟิล์มนิตินอล	ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที และทำการรักษาที่อุณหภูมิเป้าหมาย 30 นาที จากนั้นทำการปิดเตาอบ รอจนอุณหภูมิเย็นลงแล้วจึงนำไมโครแอกซ์เวเตอร์ออกจากเตาอบ

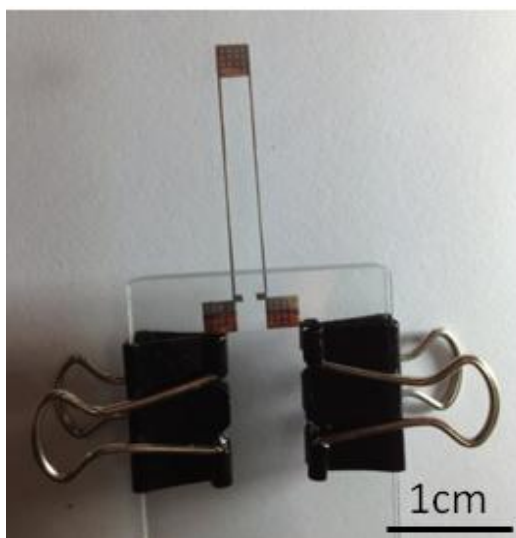
บทที่ 4

การทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์

งานวิจัยนี้ทำการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกัน และมีความหนา 5.8 และ 12.2 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งวิธีการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบใหม่ที่มีการนำเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีและเทคนิคการสปีดเทอริงมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้าง โดยไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะจะมีรูปร่างคล้ายตัวยูคว่าประกอบด้วยขาของไมโครแอกซ์เอเตอร์ 2 ข้างขนาดกว้าง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 22 มิลลิเมตรและส่วนปลายและส่วนฐาน มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 มิลลิเมตร

ในบทนี้จะทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ได้ทำการสร้างขึ้น โดยไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่นำมาทดสอบนี้จะเป็นไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบและไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ในแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแตกต่างกันสองลักษณะคือ แบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบและแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้ง (รัศมีความโค้งเท่ากับ 22 มิลลิเมตร) โดยจะทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ชนิดละ 2 ชิ้นงาน แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเฉลี่ยในแต่ละชนิดและนำมาใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสามแบบ

ในการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ทำการประกอบไมโครแอกซ์เอเตอร์เพื่อทำให้มีความสะดวกในการทดสอบ โดยจะทำการจับยึดไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยกระจก (glass slide) 2 แผ่นประกอบติดกับไมโครแอกซ์เอเตอร์ให้ได้ความยาว 22.5 มิลลิเมตร ซึ่งกระจกได้ใช้การกัดด้วย HF เพื่อเซาะร่องบนกระจกให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงนำกระจกสองแผ่นมาจับยึดชิ้นงานคล้ายแซนวิช พร้อมทั้งใช้ตัวหนีบช่วยในการจับยึดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของอุปกรณ์ลักษณะในการจับยึดไมโครแอกซ์เอเตอร์นี้แสดงดังภาพที่ 4.1 ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์และความเร็วในการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์ ในการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์นี้จะแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนคือ การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์ (static test) และการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ (dynamic test)



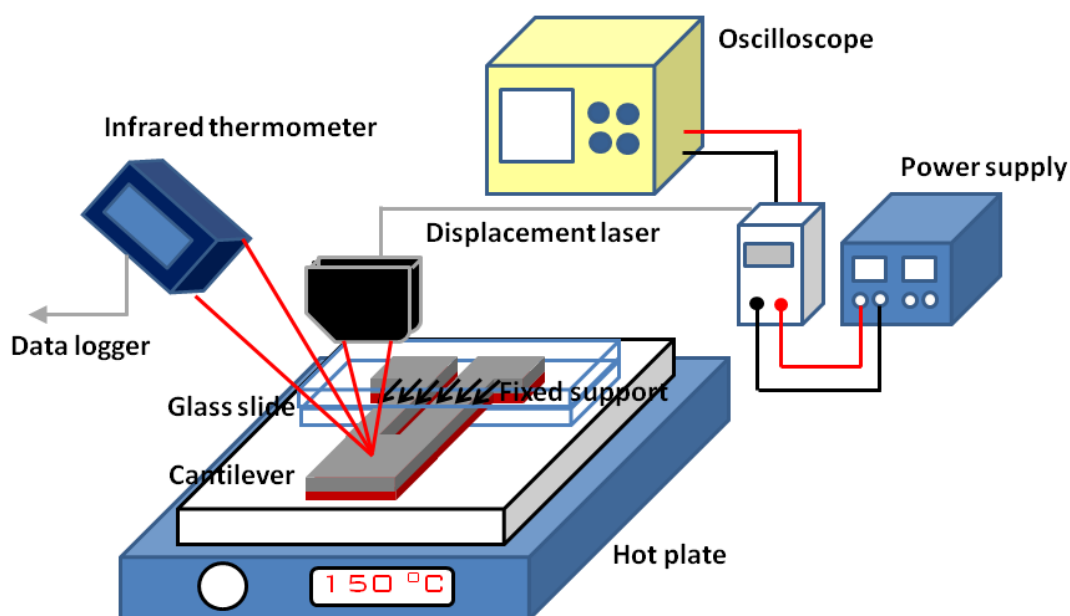
ภาพที่ 4.1 ลักษณะในการจับยึดไมโครแอกซ์เวเตอร์สำหรับการทดสอบ

4.1 การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติในงานวิจัยนี้จะทำการวัดระยะกระดกและทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปในขณะที่ทำการใส่ความร้อนให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติแสดงดังภาพที่ 4.2 (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ง) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสอตเพลต เครื่องออสซิลโลสโคป เลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และมิเตอร์พร้อมทั้งเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

ในการทดสอบนี้จะทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆและทำการติดตั้งไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการจับยึดด้วยกระจกแล้วบนเครื่องสอตเพลต หลังจากนั้นทำการเปิดเครื่องสอตเพลตเพื่อทำการเพิ่มความร้อนให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยตรงและทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์มิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ด้านบนของไมโครแอกซ์เวเตอร์และต่อเข้ากับตัวเลเซอร์มิเตอร์ ซึ่งสามารถอ่านระยะกระดกได้จากหน้าจอของมิเตอร์และบันทึกข้อมูลในเครื่องออสซิลโลสโคปได้ นอกจากนี้ในการทดสอบนี้จะทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ด้วย โดยทำการวัดที่บริเวณปลายของไมโครแอกซ์เวเตอร์ เพราะหากทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่บริเวณฐานที่ทำการยึดติดกับแผ่นกระจก จะเป็นการวัดอุณหภูมิแผ่นกระจกแทน เนื่องจากแผ่นกระจกมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกที่ช้าและมีการเก็บสะสมความร้อนได้ดี จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนให้กับฐานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ตลอดเวลา และทำให้บริเวณฐานของไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากับ

อุณหภูมิของแผ่นกระจก ข้อมูลของอุณหภูมิจะถูกส่งไปบันทึกข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์มีความแม่นยำในการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ อยู่ที่ 0.5 ไมโครเมตร และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 1,000 ค่าต่อไมโครวินาที และมีความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์อยู่ที่ 0.1 องศาเซลเซียส และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 10 ค่าต่อวินาที



ภาพที่ 4.2 อุปกรณ์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์ในงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยตรงด้วยเครื่องฮอตเพลต ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 2 องศาเซลเซียสต่อวินาที พร้อมทั้งทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แล้วเก็บค่าระยะกระดกในออสซิลโลสโคปและทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์แล้วเก็บค่าอุณหภูมิในคอมพิวเตอร์ หลังจากทำการทดสอบเสร็จสิ้นจึงดึงข้อมูลมาวิเคราะห์ผ่านแฟลชไดรฟ์ และนำไปเปิดด้วยโปรแกรมเอ็กเซล ทำการจัดการข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและพล็อตกราฟของระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ ภาพถ่ายของการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ต่างๆหลังจากทำการเพิ่มอุณหภูมิได้แสดงในภาพที่ 4.3

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.4(ก) ถึงภาพที่ 4.4(ค) ซึ่งเป็นผลการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์ที่ได้ทำการเฉลี่ยทั้งสองชิ้นงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ

ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบและไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้ง ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดการกระดกขึ้นไปในทิศทางของนิทินอล และเมื่อไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์สูงขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการหยุดให้ความร้อนกับไมโครแอกซ์เวเตอร์อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะลดลง ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีระยะกระดกที่ลดลง แต่จากกราฟทั้งสามจะปรากฏฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ขึ้น โดยที่ค่าฮิสเทอรีซิสของไมโครแอกซ์เวเตอร์แต่ละชนิดมีค่าดังนี้ ค่าฮิสเทอรีซิสสูงสุดของระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบเท่ากับ 0.23 มิลลิเมตร ค่าฮิสเทอรีซิสของระยะกระดกไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้งเท่ากับ 0.46 และ 0.33 มิลลิเมตร ตามลำดับ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์แต่ละชนิดต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในช่วงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 80 องศาเซลเซียสแสดงดังภาพที่ 4.5 จะเห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิที่เท่ากัน ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีระยะกระดกที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีโครงสร้างผลึกของนิทินอลที่มากกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่อบ ทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีคุณสมบัติการเปลี่ยนรูปและคืนรูปได้ของนิทินอลเกิดขึ้นดีกว่า จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของนิทินอลกับทองแดงยังมีความแตกต่างกันมากขึ้น และมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นนี้

จากผลการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้งจะเห็นว่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองชนิดนี้มีระยะกระดกที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบจะมีระยะกระดกสูงกว่าเพียงเล็กน้อย และที่อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียสจะทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้งมีระยะกระดกเท่ากับ 0.57, 0.94 และ 0.84 มิลลิเมตร ตามลำดับ

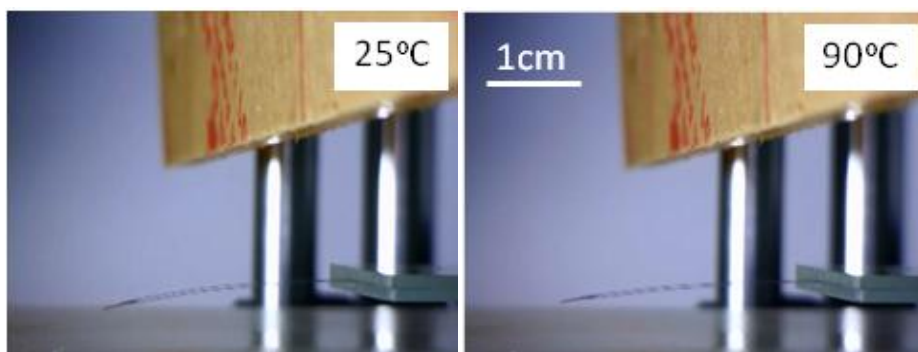
นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีกับระยะกระดกของคานจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ความหนาของทองแดงและอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าระยะกระดกของคานจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีค่าที่สูงกว่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบในการทดสอบประมาณ 150% เนื่องจากฟิล์มนิทินอลที่สร้างขึ้นอาจจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่น้อยกว่าในการศึกษาในบทที่ 2 ดังนั้นจึงทำให้ระยะกระดกในการทดสอบจึงมีค่าที่น้อยกว่าระยะกระดกจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์

4.2 สรุปผลการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

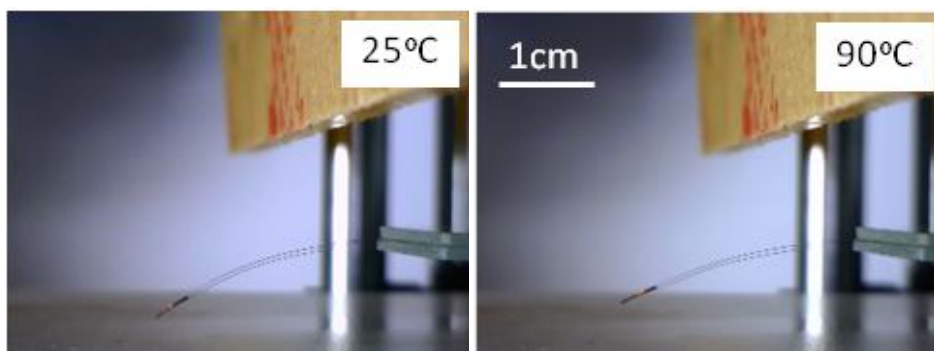
ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตินี้จะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์โดยตรง พร้อมทั้งทำการวัดระยะกระดกและทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยมีความแม่นยำในการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์อยู่ที่ 0.5 ไมโครเมตร และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 1,000 ค่าต่อไมโครวินาที และมีความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์อยู่ที่ 0.1 องศาเซลเซียส และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 10 ค่าต่อวินาที จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลมีผลต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีระยะกระดกที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามลักษณะในการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบกับโค้งจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ นอกจากนี้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติพบว่า ขณะที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเครื่องฮอตเพลต ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกด้วยซึ่งส่งผลทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดการสั้นลงด้วยระยะกระดกน้อยเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของไมโครแอกซ์เวเตอร์อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4.1 แสดงการเพิ่มพลังงานให้กับขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์จากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในกรณีต่างๆพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเครื่องฮอตเพลตนี้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทให้กับขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์เท่ากับ 0.51 วัตต์ และความร้อนที่แลกเปลี่ยนกับอากาศภายนอกเท่ากับ 24 วัตต์ จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันถึง 47 เท่า ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มพลังงานให้กับขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเครื่องฮอตเพลตแล้วไมโครแอกซ์เวเตอร์จะกระดกขึ้น แต่ในช่วงเวลาสั้นๆถัดมาขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกทันทีจึงทำให้อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ลดลงและตัวไมโครแอกซ์เวเตอร์จึงกระดกลง ซึ่งกระบวนการในการถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนของขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน จึงทำให้

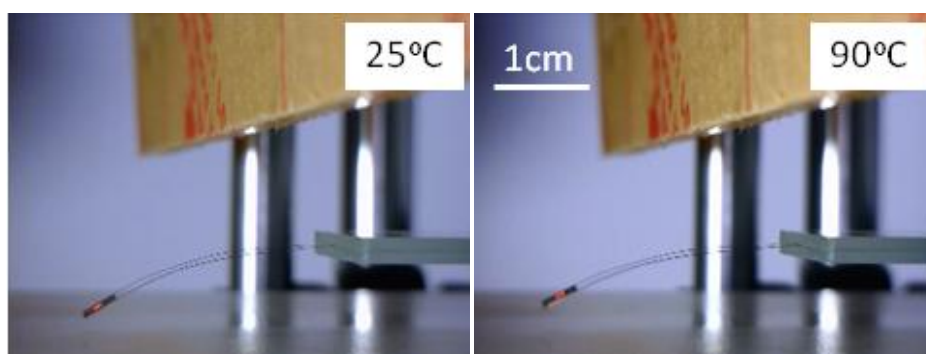
ไมโครแอกซ์เอเตอร์เกิดการสั่นขึ้นลงด้วยระยะทางสั้นๆอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตยศาสตร์นี้สามารถหาแนวโน้มและความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของไมโครแอกซ์เอเตอร์ได้



(ก)

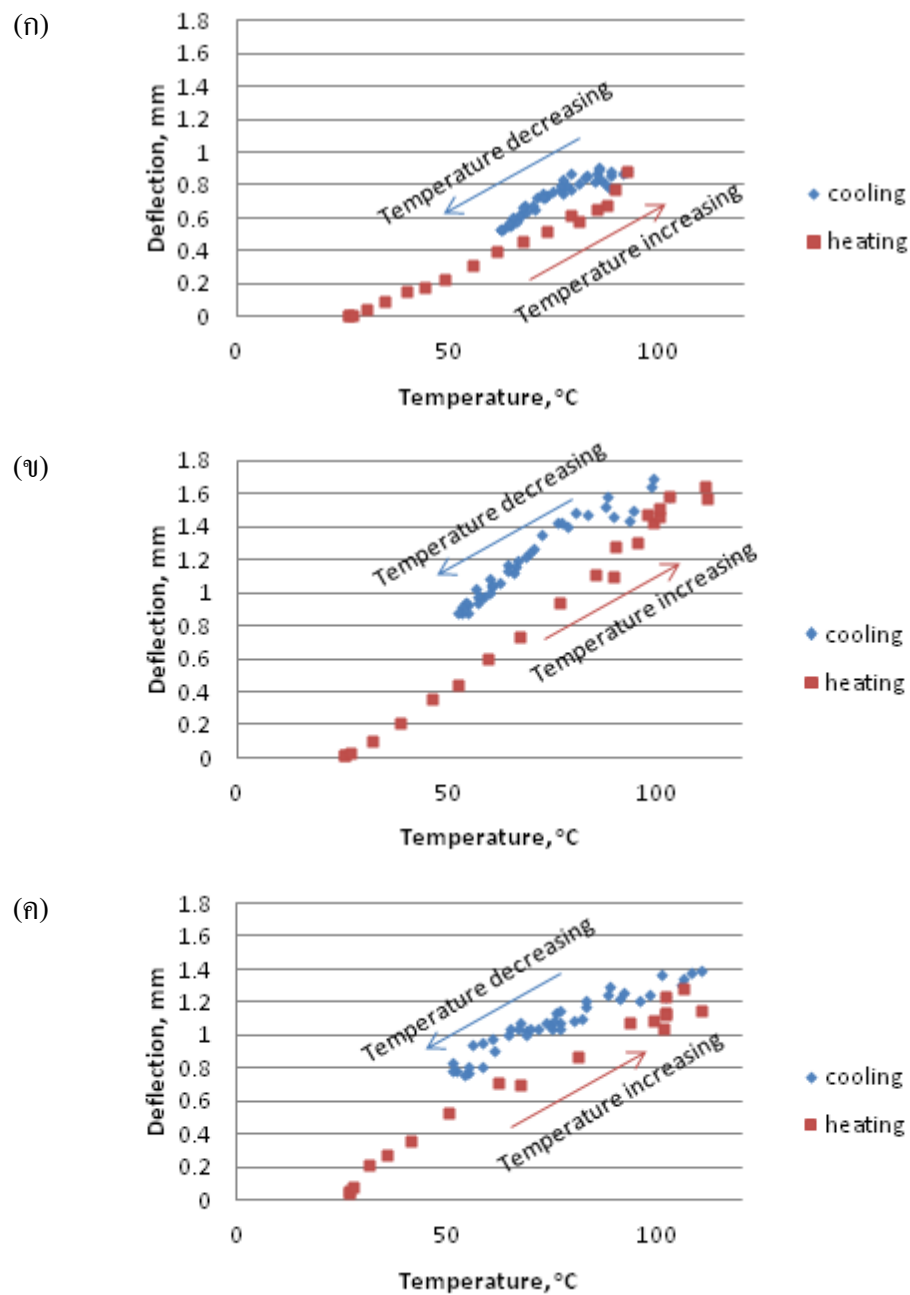


(ข)

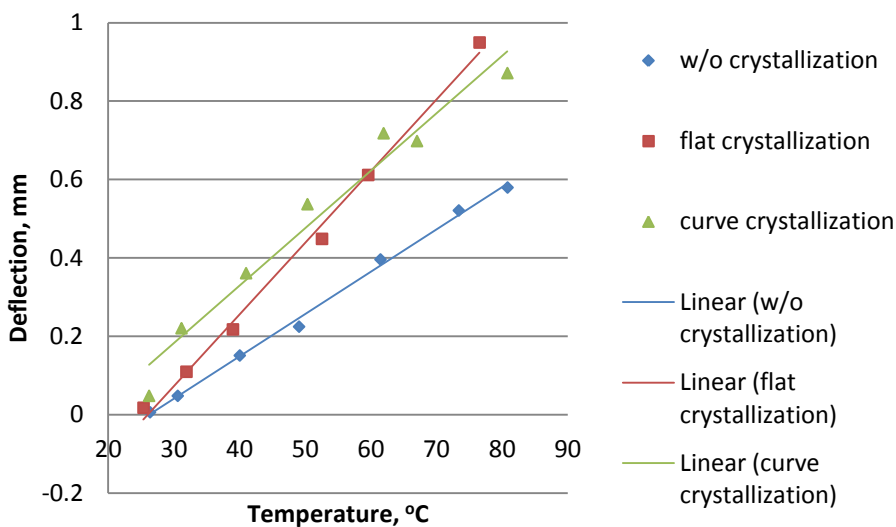


(ค)

ภาพที่ 4.3 ลักษณะการกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่อุณหภูมิ 25 และ 90 องศาเซลเซียส
 (ก) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ (ข) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ (ค) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง



ภาพที่ 4.4 ระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์เมื่อทำการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิด้วยเครื่องฮอตเพลต
 (ก) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ (ข) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ (ค) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบระยะกระดกต่ออุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบต่างๆ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างขาของไมโครแอกซ์เวเตอร์กับสอตเพลตและอากาศภายนอก

	Generated energy by hot plate, Static test	Force convection heat transfer, Static test	Generated energy by applied current, Dynamic test
Formula	$q = \frac{mc_p\Delta T}{t}$	$q = hA\Delta T$	$q = I^2R$
Room temperature (°C)	20		
Heat transfer (mW)	0.51	-24	78

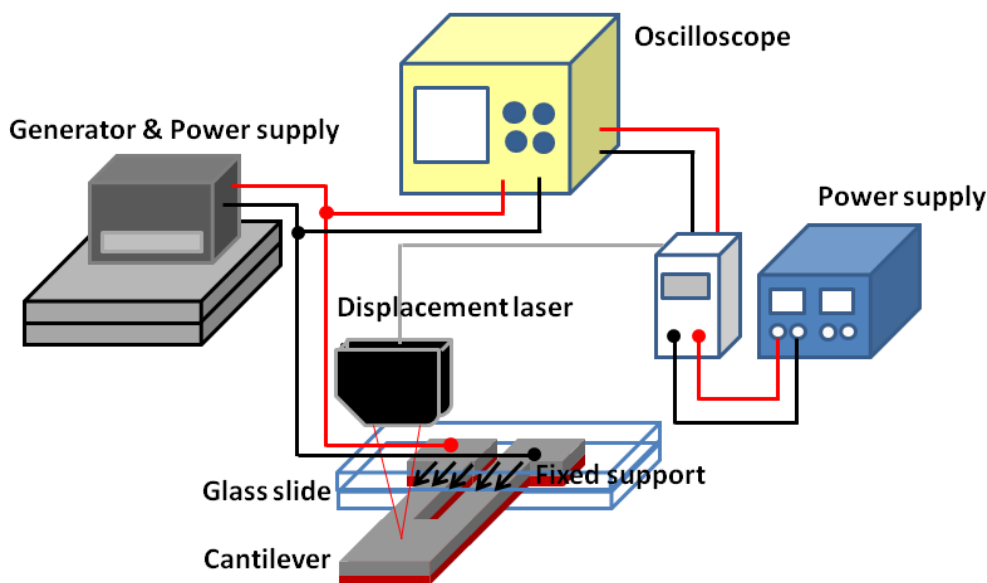
หมายเหตุ: $c_p = 1.22 \times 10^{-3} \text{ J/kg.K}$ $h = 100 \text{ W/m}^2.\text{K}$ $T_{\text{actuator}} = 82.7 \text{ }^\circ\text{C}$ $R = 0.137 \text{ } \Omega$
 $m = 0.557 \text{ mg}$ $A = 3.9 \text{ mm}^2$ $T_{\text{room}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $I = 0.75 \text{ A}$

4.3 การทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

การทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ที่ลักษณะการอบต่างๆ ในการทำการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่

ต่างๆ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์แสดงดังภาพที่ 4.6 (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ง) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับไมโครแอกชูเอเตอร์ เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า เครื่องออสซิลโลสโคป เลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และมิเตอร์พร้อมทั้งเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์

ในการทดสอบนี้จะทำการต่ออุปกรณ์ต่างๆและทำการติดตั้งไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ทำการยึดจับด้วยกระจกแก้วบนฐาน หลังจากนั้นทำการทดสอบโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกชูเอเตอร์โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้า 4 ค่าคือ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 แอมแปร์ ร่วมกับทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 ค่าคือ 0.5, 1.0 และ 2.5 เฮิรตซ์ พร้อมทั้งทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์ด้วยเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์มิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ด้านบนของไมโครแอกชูเอเตอร์และต่อเข้ากับตัวเลเซอร์มิเตอร์ ซึ่งสามารถอ่านระยะกระดกได้จากหน้าจอของมิเตอร์และบันทึกข้อมูลในเครื่องออสซิลโลสโคปได้ ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์มีความแม่นยำในการวัดระยะกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์อยู่ที่ 0.5 ไมโครเมตร และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 1,000 ค่าต่อไมโครวินาที พารามิเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์นี้แสดงดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.6 อุปกรณ์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ชนิดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	กระแสไฟฟ้าที่ทำการจ่ายให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ (แอมแปร์)				ความถี่ที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ (เฮิรตซ์)		
ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ	0.50	0.75	1.00	1.25	0.5	1.0	2.5
ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบ							
ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้ง							

การทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ในงานวิจัยนี้จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์เกิดการกระดกขึ้น โดยในการต่อวงจรในการทดสอบนี้จะทำการต่อสายไฟจากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังฐานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในแต่ละข้างโดยมีลักษณะการต่อแบบอนุกรม พร้อมทั้งทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แล้วเก็บค่าระยะกระดกในออสซิลโลสโคป หลังจากทำการทดสอบเสร็จสิ้นจึงดึงข้อมูลมาวิเคราะห์ผ่านแฟลชไดรฟ์และนำไปเปิดด้วยโปรแกรมเอ็กเซล ทำการจัดการข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและพล็อตกราฟของระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาในการทดสอบและระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ที่ขนาดกระแสไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.7(ก) ถึงภาพที่ 4.7(ค) ซึ่งกราฟทั้งสามเป็นผลการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ที่ได้ทำการเฉลี่ยทั้งสองชิ้นงานของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบและไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้ง ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ แล้วไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิด

การกระดกขึ้นทันทีไปในทิศทางของนิทินอลและเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ไมโครแอกซ์เวเตอร์ จะกระดกกลับสู่ที่เดิม ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อมีค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์สูงขึ้น ภาพถ่ายของการกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์หลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ได้แสดงในภาพที่ 4.8

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการพิจารณาระยะกระดกระหว่างระยะกระดกสูงสุดและระยะกระดกต่ำสุดของไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือแอมพลิจูด (Amplitude) ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ (รายละเอียดการจัดการข้อมูลจะแสดงในภาคผนวก ง) โดยทำการวัดแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ชนิดต่างๆ ที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าและความถี่จ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์และความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์แสดงดังภาพที่ 4.9(ก) ถึงภาพที่ 4.9(ค) พบว่าแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่ำจะมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งหากเพิ่มความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นแนวโน้มของแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีค่าต่ำลง เนื่องจากที่ความถี่ต่ำกว่า ไมโครแอกซ์เวเตอร์สามารถเก็บสะสมพลังงาน ได้นานทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิสูงกว่า และส่งผลทำให้แอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์มีค่าสูง นอกจากนี้แอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีค่าแอมพลิจูดมากกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ แต่อย่างไรก็ตามไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้งจะมีแอมพลิจูดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่แอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้งจะมีค่าเท่ากับ 0.12, 1.7 และ 1.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ที่ความถี่ 2.5 เฮิรตซ์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบมีแอมพลิจูดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายในทางตรงกันข้ามที่สภาวะเดียวกันไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบมีแอมพลิจูดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าแอมพลิจูดที่น้อยที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานหรือจำเป็นต้องนำไปประยุกต์ใช้งานที่จำเพาะมากขึ้น

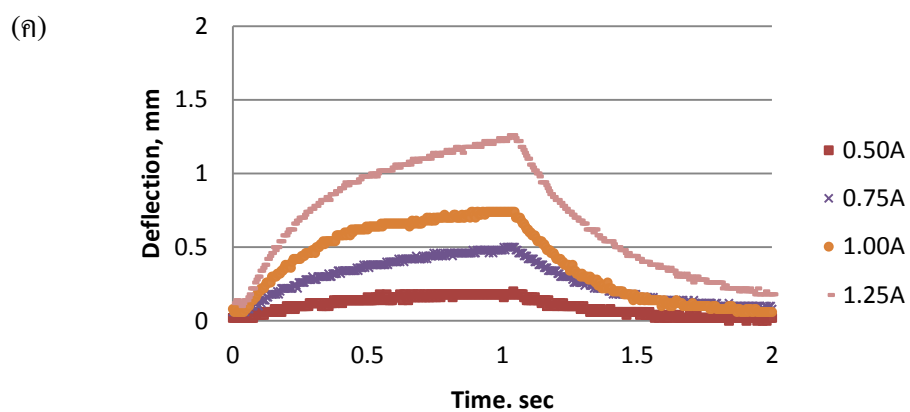
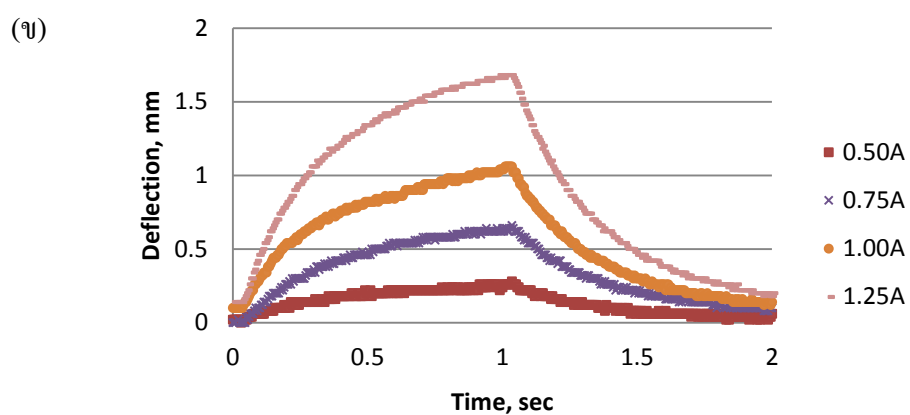
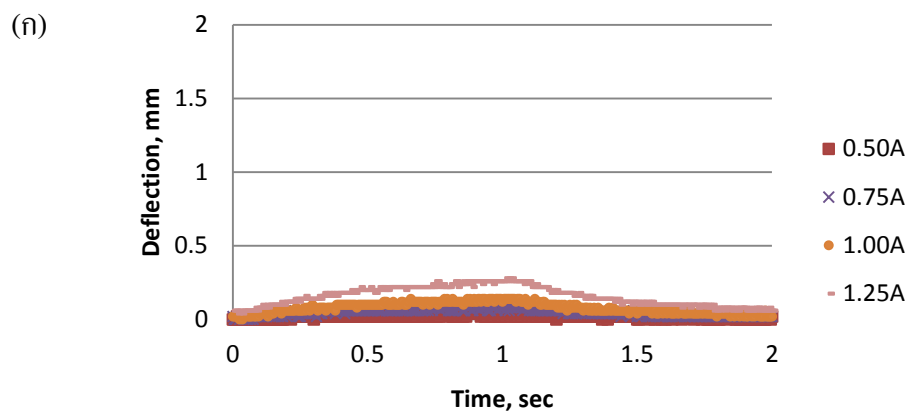
นอกจากนี้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์จะทำการทำนายอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์กระดกขึ้นเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากผลการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ โดยจะทำการทำนายเฉพาะไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้งเท่านั้น เนื่องจากมีระยะกระดกสูงทำให้ความไม่แน่นอนใน

การทำนายค่อนข้างต่ำ ในการทำนายนี้จะพิจารณาจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์และแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 โดยพิจารณาจากระยะกระดกของการทดสอบทั้งสองและนำมาเปรียบเทียบกัน ตัวอย่างเป็นดังนี้เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 1.00 แอมแปร์ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้งที่มีแอมพลิจูดเท่ากับ 1.1 และ 0.85 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อทำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติที่ระยะกระดกเดียวกันจะทำนายได้ว่าอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์มีค่าประมาณ 65 และ 60 องศาเซลเซียสที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสองแบบ ตามลำดับ

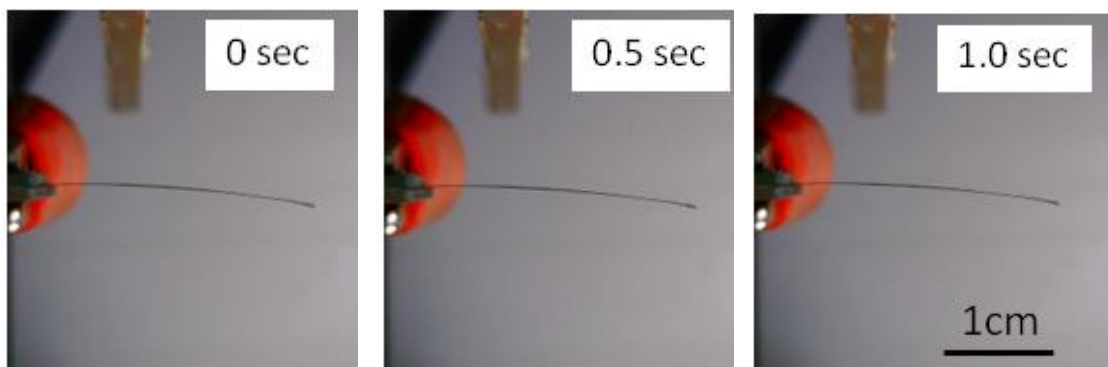
4.4 สรุปผลการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์นี้จะทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์พร้อมกับทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยมีความแม่นยำในการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์อยู่ที่ 0.5 ไมโครเมตร และมีความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 1,000 ค่าต่อไมโครวินาที จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลมีผลต่อระยะกระดกและความเร็วในการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบจะมีระยะกระดกและมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะในการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะส่งผลต่อแอมพลิจูดเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสอบเทียบเพื่อทำการหาอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์สำหรับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบโดยผลการสอบเทียบอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ และความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ จะมีอุณหภูมิในระดับ 80-85 องศาเซลเซียส

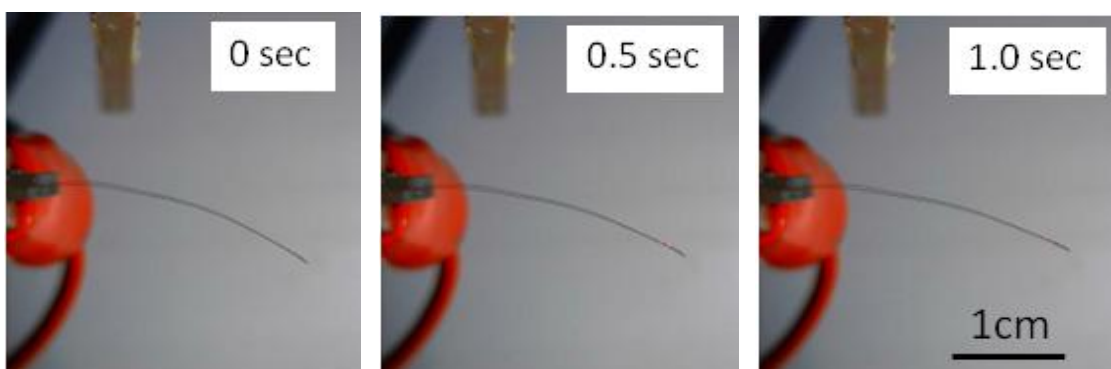
จากการทดสอบการตอบเชิงจลน์พบว่า ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการทดสอบจะไม่เกิดการสั่นขึ้นลงอย่างรวดเร็วเหมือนในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกมาก ซึ่งจะเห็นได้จากการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนของไมโครแอกซ์เอเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1



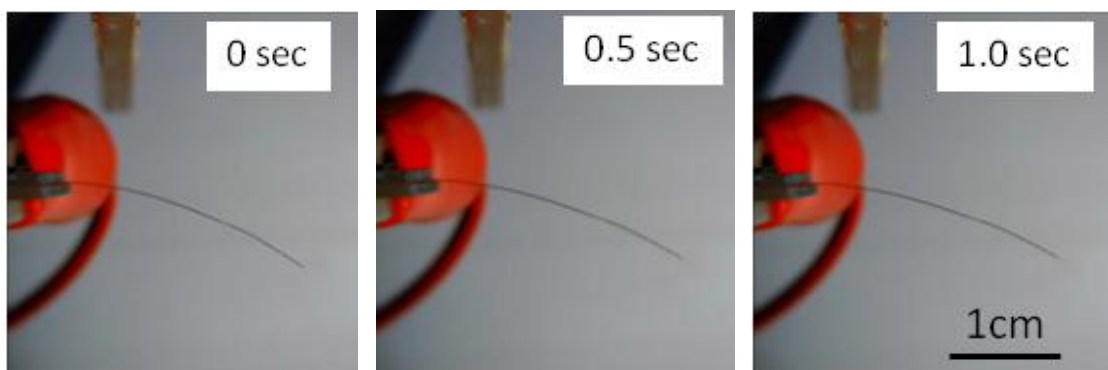
ภาพที่ 4.7 ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ ด้วยขนาดของกระแสไฟฟ้าคลื่นสี่เหลี่ยมต่างๆ (ก) ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ (ข) ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มี ลักษณะแบนราบ (ค) ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง



(ก)

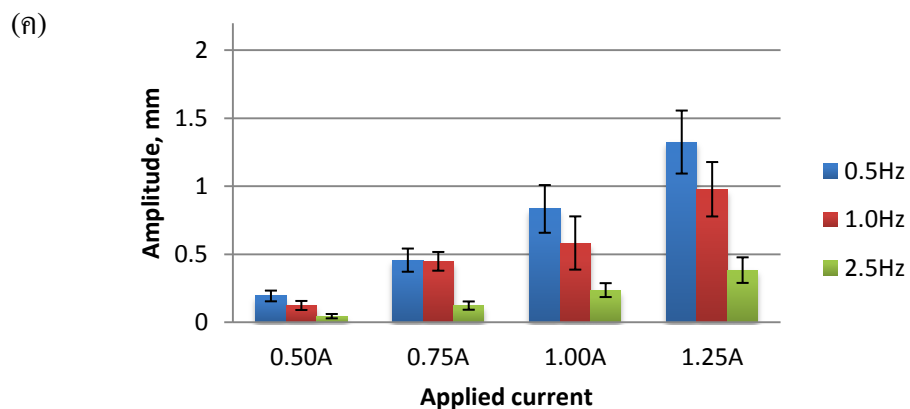
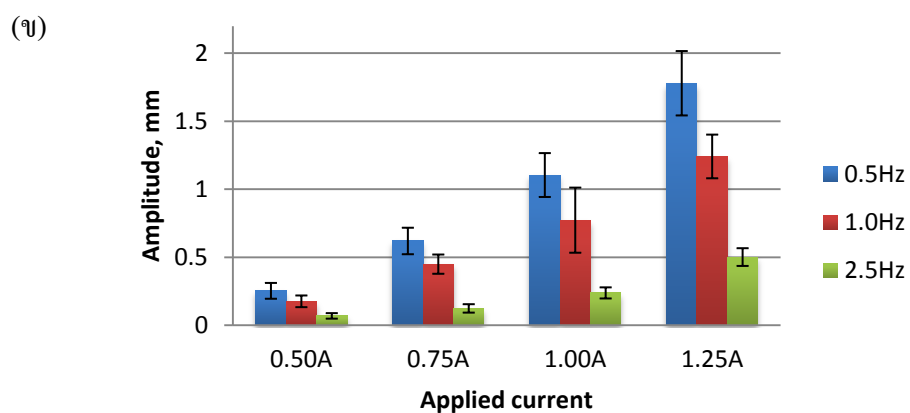
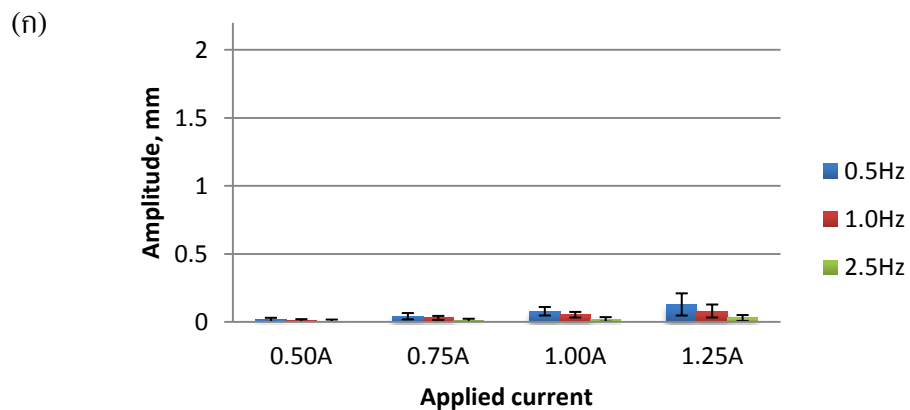


(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.8 ลักษณะการกระดกของไมโครแอกชูเอเตอร์หลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1.00 แอมแปร์ ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ (ก) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ไม่ทำการรอบ (ข) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ทำการรอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ (ค) ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ทำการรอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง



ภาพที่ 4.9 ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ
 (ก) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ (ข) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มี
 ลักษณะแบนราบ (ค) ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง

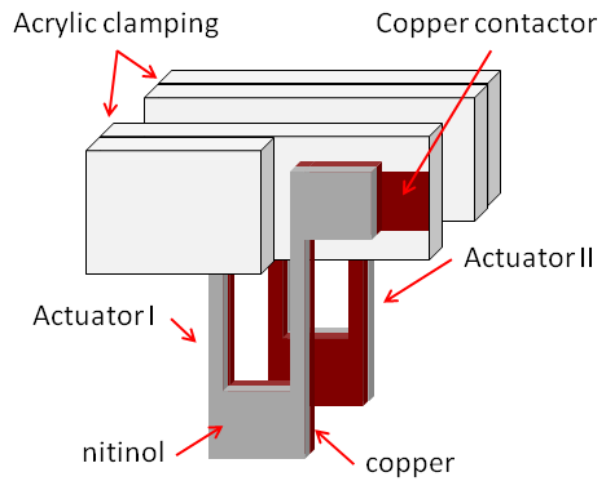
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบเมื่อได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ความถี่ 0.5 เฮิรตซ์

ชนิดของไมโครแอกซ์เวเตอร์	อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ (องศาเซลเซียส)			
	0.50A	0.75A	1.00A	1.25A
ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ	15	35	65	85
ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง	10	30	60	80

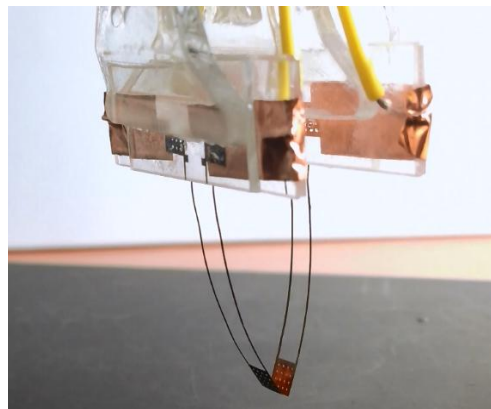
4.5 การประยุกต์ใช้งานไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้น

งานวิจัยนี้ได้นำไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กประกอบด้วยไมโครแอกซ์เวเตอร์ 2 ชิ้นและตัวหนีบที่ต่อขั้วนำไฟฟ้า แสดงในภาพที่ 4.10 โดยไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองชิ้นที่นำมาประกอบนั้นจะหันด้านของฟิล์มนิทินอลซึ่งจะมีหลักการการใช้งานแสดงในภาพที่ 4.11 โดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์หีบจับ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองชิ้นจะกางออกพร้อมที่จะจับชิ้นงาน และเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งสองจะหุบกลับเพื่อทำการหีบชิ้นงานที่ต้องการได้

ภาพที่ 4.12 แสดงลักษณะการจับเม็ดโพลีด้วยอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กที่มีไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นส่วนประกอบซึ่งจะเห็นได้ว่า อุปกรณ์หีบจับที่สร้างขึ้นสามารถจับเม็ดโพลีที่มีน้ำหนักเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมขึ้นมาได้ แต่เมื่อนำอุปกรณ์หีบจับมาทำการจับชิ้นพลาสติกขนาดเล็กที่มีน้ำหนักเท่ากับ 10 มิลลิกรัม อุปกรณ์หีบจับที่สร้างขึ้นไม่สามารถที่จะจับชิ้นพลาสติกนี้ขึ้นมาได้แสดงในภาพที่ 4.13 เนื่องจากคุณสมบัติ trade off ของอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กซึ่งจะเห็นได้ว่า หากทำการออกแบบอุปกรณ์หีบจับที่มีระยะกระดกมาก อุปกรณ์หีบจับนั้นจะมีแรงในการใช้งานที่น้อย แต่หากทำการออกแบบอุปกรณ์หีบจับที่มีระยะกระดกน้อย อุปกรณ์หีบจับนั้นจะมีแรงที่ใช้งานที่มาก

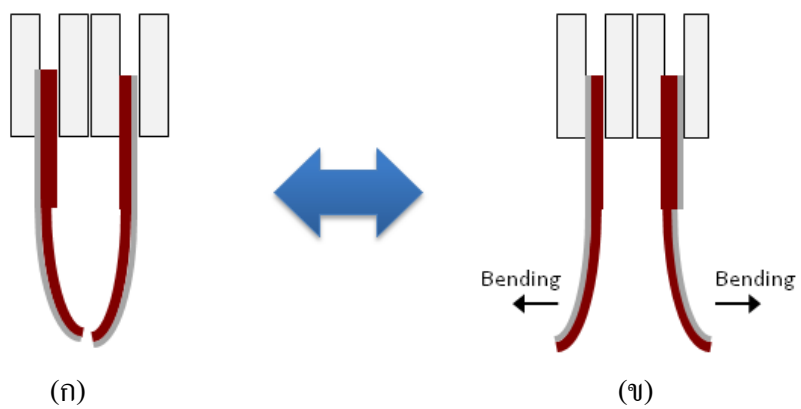


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.10 อุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้น (ก) ไดอะแกรม (ข) ภาพถ่ายจริง

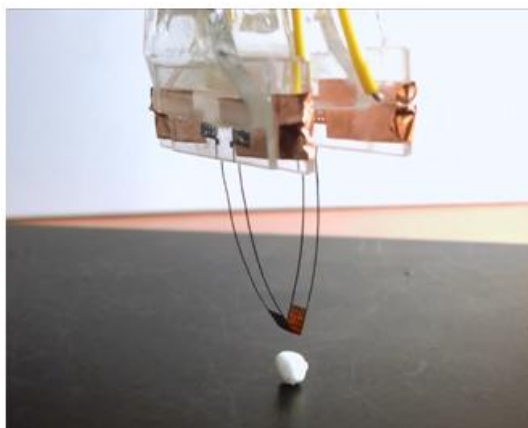


(ก)

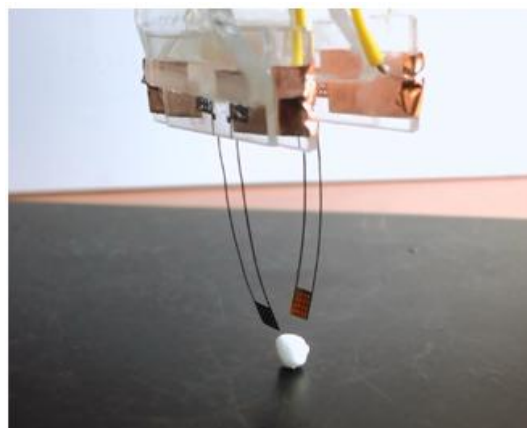
(ข)

ภาพที่ 4.11 หลักการการใช้งานอุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้น

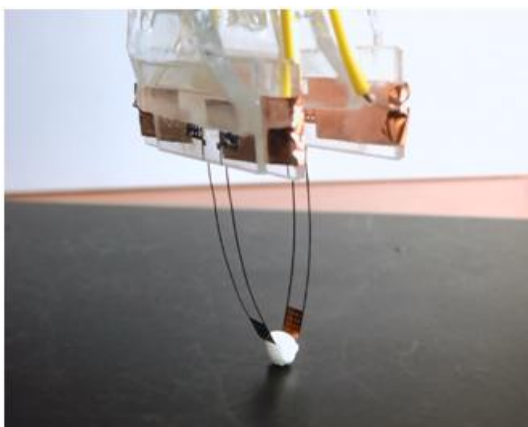
(ก) ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า (ข) จ่ายกระแสไฟฟ้า



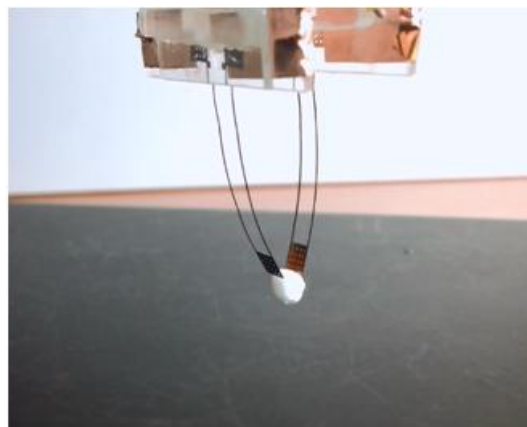
(ก)



(ข)



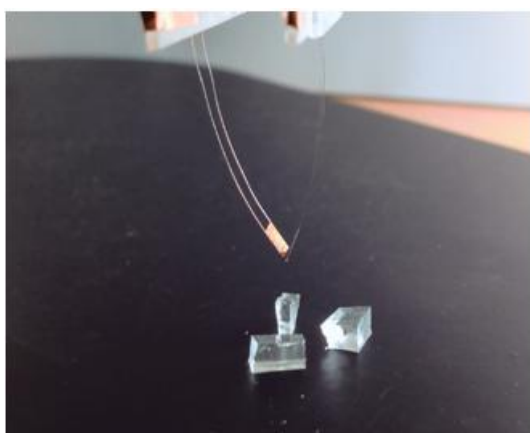
(ค)



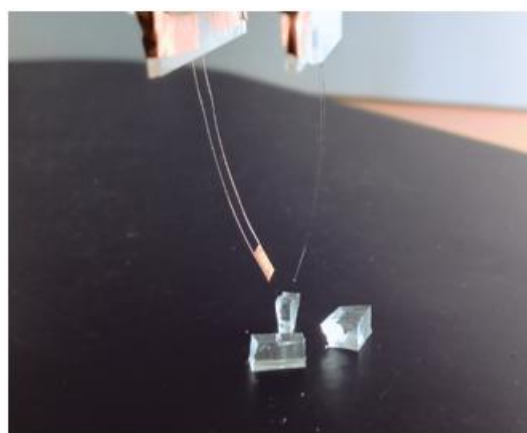
(ง)

ภาพที่ 4.12 การจับเม็ดโฟม

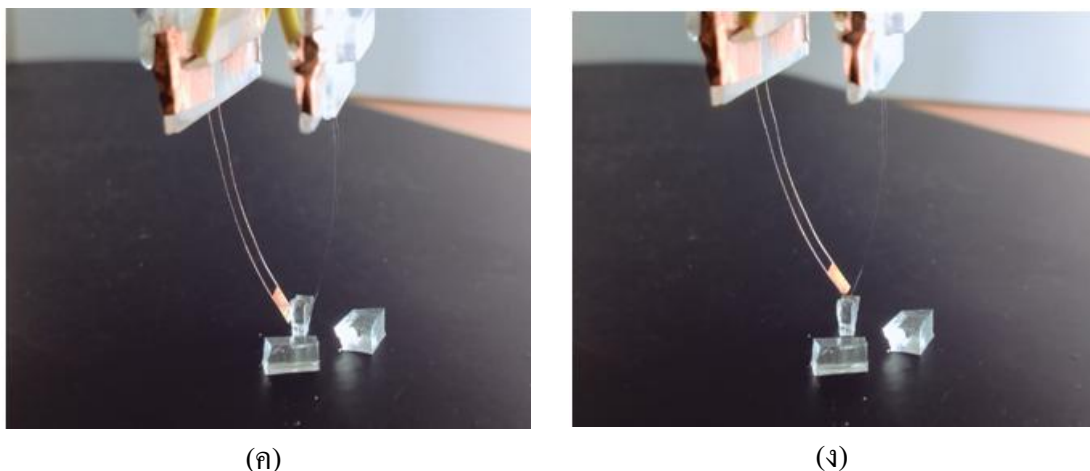
(ก) ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้า (ข) จ่ายกระแสไฟฟ้า (ค) จับเม็ดโฟม (ง) ยกเม็ดโฟม



(ก)



(ข)



ภาพที่ 4.13 การจับขึ้นพลาสติก

(ก) ก่อนจ่ายกระแสไฟฟ้า (ข) จ่ายกระแสไฟฟ้า (ค) จับขึ้นพลาสติก (ง) ยกขึ้นพลาสติก (ไม่สำเร็จ)

4.6 สรุปผลการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกัน โดยมีความหนา 5.8 และ 12 ไมโครเมตรตามลำดับ ในการทดสอบนี้ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะถูกอบในแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแตกต่างกันคือแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบและแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้ง ในการทดสอบจะมีไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบที่ไม่อบและแบบอบทั้งสองรูปแบบถูกนำมาทำการทดสอบชนิดละ 2 ชิ้นงานรวมทั้งหมด 6 ชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ออกเป็นสองการทดสอบคือ การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติและการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ ซึ่งจากการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะเห็นได้ว่า ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันทั้งระยะกระดกและความเร็วในการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์
2. ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะใช้เวลาส่งความร้อนเข้าสู่โครงสร้างของไมโครแอกซ์เอเตอร์โดยตรงและสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิกับระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ได้ โดยที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์

ที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะมีระยะกระดกที่มากกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ซึ่งจะมีระยะกระดกมากกว่าประมาณ 1.5 เท่าที่อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

3. ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะให้การจ่ายกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงมีแอมพลิจูดของระยะกระดกที่มากกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ นอกจากนี้ที่ความถี่การจ่ายไฟฟ้าที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ทุกชนิดจะมีระยะการะดกลดลงเพราะว่าความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่โครงสร้างของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะเกิดขึ้นไม่ทันทำให้อุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์ต่ำกว่ากรณีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำกว่า
4. ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะการอบไมโครแอกซ์เอเตอร์สองแบบคือ การอบที่ลักษณะแบนราบและการอบที่ลักษณะโค้ง (รัศมีความโค้ง 22 มิลลิเมตร) จากการศึกษาพบว่า มีผลต่อระยะกระดกและความเร็วในการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์เพียงเล็กน้อย โดยที่การอบที่ลักษณะแบนราบจะมีแนวโน้มของคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า
5. งานวิจัยนี้สามารถนำไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็กได้แต่สามารถจับวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เนื่องจากอุปกรณ์หยิบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้นนี้มีการออกแบบให้มีระยะกระดกมากเพื่อที่จะสามารถหยิบวัสดุที่มีขนาดใหญ่ได้แต่ไม่สามารถหยิบวัสดุที่มีน้ำหนักมากได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้สนใจในไมโครแอกซ์เวเตอร์ในเทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค โดยไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ให้ความสนใจจะมีลักษณะเป็นคานสองชั้น เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และใช้หลักการโลหะผสมจำรูป เนื่องจากหลักการโลหะผสมจำรูปเป็นหลักการที่มีรูปแบบที่กระชับรัดเนื่องจากไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมจำนวนมาก โครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนทำให้สะดวกต่อการประกอบอุปกรณ์และการควบคุมในการใช้งานทำได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นระหว่างวัสดุโลหะผสมจำรูปคือ นิกเกิลซึ่งเป็นวัสดุโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับไททาเนียมซึ่งมีคุณสมบัติที่เด่นและมีการใช้งานกันแพร่หลายกว่าวัสดุโลหะผสมจำรูปชนิดอื่น เช่น อลูมิเนียมในการใช้งานที่ไม่สูงนัก มีระยะขยับที่สูง มีแรงกระทำใช้งานที่สูง ทนต่อการกัดกร่อนและมีความต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง เป็นต้น และวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจนำมาซ้อนทับกันคือทองแดง เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีราคาถูก มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตได้หลากหลายวิธี

จากงานวิจัยที่ผ่านมา กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะคานสองชั้นจะค่อนข้างมีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน และเกิดการเสียหายไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือชิ้นงานระหว่างทำการสร้างได้ง่าย เนื่องจากกระบวนการสร้างโดยทั่วไปจำเป็นต้องสร้างบนแผ่นซิลิกอน และต้องอาศัยการกัดชิ้นงานจากด้านล่างในการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนากระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นด้วยวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อน โดยไม่ใช้ซิลิกอน เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนและการเกิดความเสียหายของไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือชิ้นงานเอง

เริ่มแรกงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะแบบคานสองชั้นก่อนทำการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นสองการศึกษาคือ การศึกษาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟฟ้ในต่อลิเมนต์และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้น โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงคือค่าความหนาของทองแดง จากการศึกษาทั้งสองการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า ไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่มีความหนาของทองแดงที่บางจะทำให้

ไมโครแอกซ์เวเตอร์มีระยะกระดกที่ดีและมีการถ่ายเทความร้อนหรือความถี่ในการใช้งานที่สูงด้วย

จากนั้นงานวิจัยได้ทำการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันด้วยกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่โดยไม่ใช้แผ่นซิลิกอน เพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการสร้างที่ซับซ้อนและการเกิดความเสียหายของตัวไมโครแอกซ์เวเตอร์หรือชิ้นงานเอง กระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่จะประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างเพียงสองขั้นตอนหลักคือกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวและกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้าง

กระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวเป็นการสร้างโครงสร้างทองแดงด้วยเทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีลงบนแผ่นสแตนเลสที่มีการสร้างแบบหล่อตามลวดลายที่ต้องการ โดยกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอนย่อยคือขั้นตอนการสร้างแบบหล่อเป็นขั้นตอนการสร้างแบบหล่อที่มีลวดลายที่ต้องการลงบนแผ่นซับสเตรตโดยนำกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงเพื่อทำการสร้างแบบหล่อที่มีขนาดอยู่ในระดับไมโครสเกล และขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีเป็นขั้นตอนการเคลือบโลหะลงบนแผ่นซับสเตรตตามลวดลายที่มีการสร้างขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดผ่านไปยังขั้วแคโทดทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดที่เป็นทองแดงวิ่งผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังแผ่นซับสเตรตที่ขั้วแคโทดได้ จากกระบวนการสร้างนี้สามารถสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวที่มีความแข็งแรงและมีความหนาที่บางขึ้นมาได้ โดยโครงสร้างทองแดงที่สร้างขึ้นนี้มีความหนาประมาณ 12.2 ไมโครเมตร แต่อย่างไรก็ตามในการสร้างโครงสร้างทองแดงลอยตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีจำเป็นต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้านี้ควรจ่ายกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า 0.5 แอมแปร์หรือค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่น้อยกว่า 45 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้นระหว่างการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทำให้โครงสร้างทองแดงลอยตัวที่สร้างขึ้นเกิดการเสียรูปร่างได้

กระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงด้วยนิทินอลเป็นกระบวนการปลูกฟิล์มนิทินอลบนทองแดงโดยกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างทองแดงด้วยนิทินอลนี้สามารถแบ่งเป็นสองขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิทินอลการเคลือบผิวด้วยนิทินอลด้วยเครื่องสปัตเตอริงตามเทคนิคการสปัตเตอริงซึ่งสามารถปลูกฟิล์มนิทินอลที่มีความหนาเท่ากับ 5.8 ± 0.4 ไมโครแอกซ์เวเตอร์ และขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลเป็นการอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงสร้างภายในนิทินอลเปลี่ยนแปลงจากอมอर्फัสเป็นโครงสร้างผลึก โดย

งานวิจัยนี้จะทำการอบฟิล์มนิทีนอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน เนื่องจากเตาอบแบบหลอดควอทซ์เป็นเตาอบที่ง่ายต่อการใช้งานและเป็นเตาอบที่มีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน โดยในขั้นตอนการอบฟิล์มนิทีนอลนี้จะมีการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตสองลักษณะคือแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง พร้อมทั้งยังทำการทดลองเปลี่ยนอุณหภูมิในงานอบไมโครแอกซ์เวเตอร์เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถทำให้โครงสร้างภายในนิทีนอลเปลี่ยนแปลงด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านนี้ โดยในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบฟิล์มนิทีนอล 3 ค่าคือ 500, 600 และ 650 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาการอบคงที่เท่ากับ 30 นาที จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การอบฟิล์มนิทีนอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านที่อุณหภูมิ 600 และ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สามารถทำให้โครงสร้างของนิทีนอลเปลี่ยนจากอโมर्फัสเป็นโครงสร้างผลึกได้และมีแนวโน้มที่โครงสร้างผลึกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบกับทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะเห็นได้ว่า ฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างผลึกทั้งนิทีนอล ไททานเนียมไดออกไซด์ นิกเกิลทองแดงหรืออื่นๆที่มากกว่าฟิล์มนิทีนอลไม่ทำการอบ โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มนิทีนอลที่เกิดขึ้นหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสนี้จะมีเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 จากปริมาณโครงสร้างผลึกของฟิล์มนิทีนอลที่ไม่ทำการอบ รวมทั้งอัตราส่วนของธาตุของฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยฟิล์มนิทีนอลที่ทำการอบจะมีออกซิเจนและทองแดงเกิดขึ้น ซึ่งทองแดงนี้ได้รวมตัวกับนิกเกิลในชั้นฟิล์มนิทีนอลเป็นนิกเกิลทองแดงซึ่งส่งผลทำให้ฟิล์มนิทีนอลมีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น

หลังจากสามารถสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทีนอลความหนา 5.8 ไมโครเมตรและทองแดงความหนา 12.2 ไมโครเมตรได้สำเร็จ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้นนี้ โดยจะทำการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ทั้งหมดสามชนิดคือ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบและไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบฟิล์มนิทีนอลที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแตกต่างกันสองลักษณะคือ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบและไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบโดยใช้แบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้งและนำผลการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกล สำหรับการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์นี้จะแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนคือ การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตย์และการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตยส์นี้จะทำการวัดระยะกระดกและทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ชนิดต่างๆ ในขณะที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิ จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดการกระดกขึ้นไปในทิศทางของนิทินอล และเมื่อไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ก็จะสูงขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการหยุดให้ความร้อนกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีระยะกระดกที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ลดลง แต่จะปรากฏฮิสเตอร์ริซิสของระยะกระดกขึ้น โดยที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิสูงจะมีระยะกระดกที่มากกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ซึ่งจะมีระยะกระดกมากกว่าประมาณ 1.5 เท่า นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แต่ละชนิดที่อุณหภูมิที่เท่ากัน ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที จะมีระยะกระดกที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะโค้งจะเห็นได้ว่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ของทั้งสองชนิดนี้มีระยะกระดกที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อแบนราบและโค้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 0.57, 0.94 และ 0.84 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาทีกับระยะกระดกของคานจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ความหนาของทองแดงและอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ใกล้เคียงกันจะเห็นได้ว่าระยะกระดกของคานจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีค่าที่สูงกว่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบในการทดสอบประมาณ 150% เนื่องจากฟิล์มนิทินอลที่สร้างขึ้นอาจจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่น้อยกว่าในการศึกษาในบทที่ 2 หรือในการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศตลอดเวลาจึงทำให้ระยะกระดกในการทดสอบจึงมีค่าที่น้อยกว่าระยะกระดกจากระเบียบวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์

การทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์นี้จะทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่ไม่ทำการอบและทำการอบที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ที่ลักษณะการอบต่างๆในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าและความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ จากการทดสอบพบว่า เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดการกระดกขึ้นทันทีไปในทิศทางของนิทินอลและเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า

ไมโครแอกซ์เอเตอร์จะกระดกกลับสู่ที่เดิม ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่สูงขึ้น โดยในการทดสอบจะทำการพิจารณาแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ชนิดต่างๆที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าและความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆพบว่า แอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่ำจะมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งหากเพิ่มความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นแนวโน้มของแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะมีค่าต่ำลง และนอกจากนี้แอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบจะมีค่าแอมพลิจูดที่มากกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ไม่ทำการอบ แต่ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบกับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้งจะมีแอมพลิจูดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะระหว่างระยะกระดกสูงสุดกับระยะกระดกต่ำสุดของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบกับไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่อบด้วยแบบหล่อแบนราบและโค้งที่กระแสไฟฟ้า 1.25 แอมแปร์ และความถี่ 0.5 เฮิรตซ์ จะมีค่าเท่ากับ 0.12, 1.7 และ 1.3 มิลลิเมตรตามลำดับ

จากการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสองการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนการอบฟิล์มนิทินอลมีผลต่อระยะกระดกและความเร็วในการตอบสนองของไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยที่ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบจะมีระยะกระดกและแอมพลิจูดที่สูงกว่าไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ แต่ลักษณะในการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตของไมโครแอกซ์เอเตอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้แบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบกับโค้งในการอบ จะส่งผลต่อระยะกระดกและแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เอเตอร์เพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้ในงานวิจัยได้นำไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบสร้างขึ้นมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็ก ซึ่งจะมีหลักการการดึงนี้คือเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์หีบจับ ไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสองชิ้นจะกางออกพร้อมที่จะจับชิ้นงาน และเมื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสองจะหุบกลับเพื่อทำการหีบชิ้นงานที่ต้องการได้ โดยอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กที่สร้างขึ้นนี้สามารถจับเพียงเม็ดโพลีที่มีน้ำหนักเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมขึ้นมาได้เท่านั้น เนื่องจากคุณสมบัติ trade off ของอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็ก แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการอุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กที่สามารถหีบวัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่านี้จำเป็นต้องทำการอบแบบให้อุปกรณ์หีบจับขนาดเล็กมีระยะกระดกที่น้อยลงเพื่อแลกกับแรงที่สามารถใช้งานที่มากขึ้น

จากการทำงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้สามารถสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นด้วยกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบใหม่ โดยไม่ใช่แผ่นซิลิกอนได้สำหรับ โดยกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบใหม่นี้จะ

ประกอบด้วยกระบวนการในการสร้างเพียงสองขั้นตอนหลักคือกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวและกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้าง โดยขั้นตอนการอบฟิล์มนิกเกิลในกระบวนการเคลือบผิวด้านบนของโครงสร้างนี้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของนิกเกิลจากอัมมอฟิตเป็นโครงสร้างผลึกได้ด้วยการอบฟิล์มนิกเกิลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่านได้ซึ่งต้องทำการอบที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยที่ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบที่อุณหภูมินี้จะมีระยะกระดกและแอมพลิจูดที่สูง ซึ่งส่งผลให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบใหม่นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย

รายการอ้างอิง

- [1] Bell, D.J., Lu, T.J., Fleck, N.A., Spearing, S.M. 2005. Observations on their performance and selection for purpose. J. Micromech. Microeng. 15: S153-S164.
- [2] Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S. 2012. The high potential of shape memory alloy in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. Sensors and Actuators A 158: 149-160.
- [3] Krulevitch, P., Lee, A.P., Ramsey, P.B., Trevino, J.C., Hamilton, J., Northrup, M.A. 1996. Thin film shape memory alloy microactuators. J. Microelectromechanical Systems 5: 270-282.
- [4] Fu, Y., Du, H., Huang, W., Zhang, S., Hu, M. 2004. TiNi-based thin films in MEMS applications a review. Sensors and Actuators A 112: 395-408.
- [5] Makino, E., Mitsuya, T., Shibata, T. 2001. Fabrication of TiNi shape memory micropump. Sensors and Actuators A 88: 256-262.
- [6] Kohl, M., Dittmann, D., Quandt, E., Winzek, B., Miyazaki, S., Allen, D.M. 1999. Shape memory microvalves based on thin films or rolled sheets. Materials Science and Engineering A273-275: 784-788.
- [7] Sassa, F., Al-Zain, Y., Ginoza, T., Miyazaki, S., Suzuki, H. 2012. Miniaturized shape memory alloy pumps for stepping microfluidic transport. Sensors and Actuators B 165: 157-163.
- [8] Takeuchi, S., Shimoyama, I. 2000. A three-dimensional shape memory alloy microelectrode with clipping structure for insert neural recording. J. Microelectromechanical Systems 9: 24-31.

- [9] Luo, J.K., He, J.H., Fu, Y.Q., Flewitt, A.J., Spearing, S.M., Fleck, N.A., Milne, W.I. 2005. Fabrication and characterization of diamond-like carbon - Ni bimorph normally closed microcages. J. Micromech. Microeng. 15: 1406-1413.
- [10] Makino, E., Mineta, T., Mitsunaga, T., Kawashima, T., Shibata, T. 2011. Sphincter actuator fabricated with PDMS-SMA bimorph cantilevers. Microelectronic Engineering 88: 2662-2665.
- [11] Gill, J.J., Chang, D.T., Momoda, L.A., Carman, G.P. 2001. Manufacturing issues of thin film NiTi microwrapper. Sensors and Actuators A 93: 148-156.
- [12] Kim, D.H., Park, Y.C., Park, S. 2010. Design and fabrication of twisting-type thermal actuation mechanism for micromirrors. Sensors and Actuators A 159: 79-87.
- [13] Qu, X.X., Zhang, Q.X., Zou, Q.B., Balasubramanian, N., Yang, P., Zeng, K.Y. 2002. Characterization of TiAl alloy films for potential application in MEMS bimorph actuators. Materials Science in Semiconductor Processing 5: 35-38.
- [14] Lin, I., Zhang, X., Zhang, Y. 2011. Inelastic deformation of bilayer microcantilevers with nanoscale coating. Sensors and Actuators A 168: 1-9.
- [15] Bullen, D., Wang, X., Zou, J., Chung, S., Mirkin, C.A., Liu, C. 2004. Design, Fabrication, and Characterization of Thermally Actuated Probe Arrays for Dip Pen Nanolithography. J. Microelectromechanical Systems 13: 594-602.
- [16] Chung, C.Y., Chan, P.M. 2011. NiTi shape memory alloy thin film micro-cantilever array. Thin Solid Films 519: 5307-5309.
- [17] Fu, Y.Q., Luo, J.K., Ong, S.E., Zhang, S., Flewitt, A.J., Milne, W.I. 2008. A shape memory alloy microcage of TiNi/DLC films for biological applications. J. Micromech. Microeng. 18: 1-8.

- [18] Wang, X., Bellouard, Y., Vlassak, J.J. 2005. Laser annealing of amorphous NiTi shape memory alloy thin films to locally induce shape memory properties. Acta Materialia 53: 4955-4961.
- [19] กฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ. 2554. การพัฒนาไมโครแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปสำหรับการจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [20] ภาคกร นนทวิวัฒน์วิช. 2553. กระบวนการสร้างเมมเบรนสังไมโครคอลลอยด์และการศึกษาสมรรถนะในการใช้งานเป็นแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [21] Francisco, M., Fernandes, B., Martins, R., Nogueira, M.T., Silva, R.J.C., Nunes, P., Costa, D., Ferreira, I., Martins, R. 2002. Structural characterization of NiTi thin film shape memory alloys. Sensors and Actuators A 99: 55-58.
- [22] Chan, P.M., Chung, C.Y., Ng., K.C. 2008. NiTi shape memory alloy thin film sensor micro-array for detection of infrared radiation. J. Alloys and Compounds 449: 148-151.
- [23] Ho, K.K., Carman, G.P. 2000. Sputter deposition of NiTi thin film shape memory alloy using a heated target. Thin Solid Films. 370: 18-29.
- [24] Zhang, L., Xie, C., Wu, J. 2007. Oxidation behavior of sputter-deposited Ti-Ni thin films at elevated temperatures. Materials Characterization 58: 471-478.
- [25] Sanjabi, S., Barber, Z.H. 2010. The effect of thin film composition on the structure and mechanical properties of NiTi shape memory thin films. Surface Coatings Tech. 204: 1299-1304.

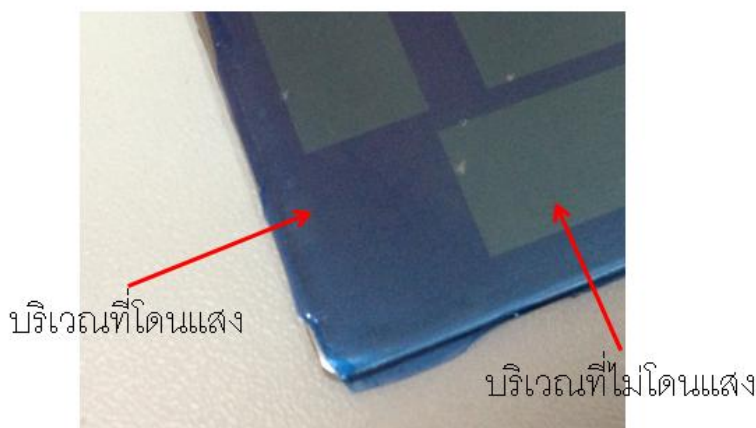
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วัสดุอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างไมโครแอกซิวเอเตอร์

ฟิล์มโฟโตรีซิส

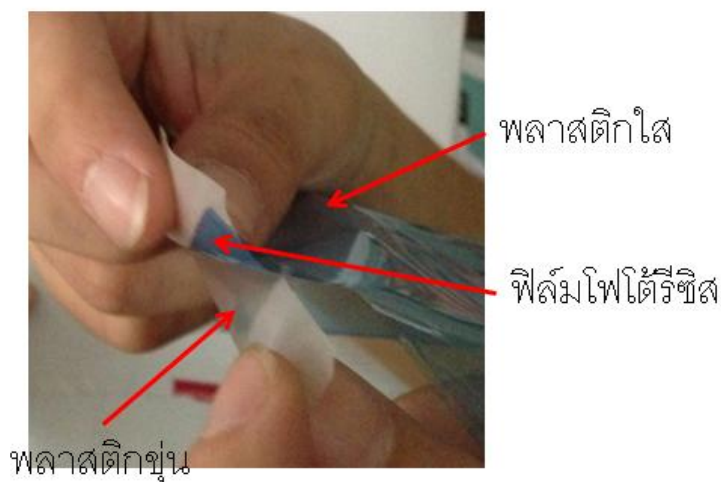
ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อใช้กระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์มโฟโตรีซิสโดยการฉายแสง งานวิจัยนี้ใช้ฟิล์มโฟโตรีซิสแบบเนกาทีฟ ซึ่งมีหลักการในการใช้คือ เมื่อทำการฉายแสงลงบนฟิล์มโฟโตรีซิสแบบเนกาทีฟ ฟิล์มส่วนที่โดนแสง จะมีคุณสมบัติของฟิล์มที่เปลี่ยนไปทำให้ทนต่อตัวทำละลาย ในทางตรงกันข้ามส่วนของฟิล์มที่ไม่โดนแสงจะมีคุณสมบัติเหมือนเดิม ฟิล์มจะหลุดออกเมื่อทำการล้างฟิล์มด้วยตัวทำละลาย ซึ่งหลังจากการฉายแสงสามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างฟิล์มที่โดนแสงและไม่โดนแสงได้ ดังภาพที่ ก.1 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ฟิล์มแบบเนกาทีฟที่มีลักษณะเป็นฟิล์มแข็ง ของบริษัทวาร์ฟ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (Warf corporation Co., Ltd.) ดังภาพที่ ก.2 โดยฟิล์มโฟโตรีซิสของบริษัทนี้ ประกอบด้วยฟิล์ม 3 ชั้น ฟิล์มโฟโตรีซิสจะอยู่ชั้นกลางระหว่างแผ่นฟิล์มพลาสติกประกบทั้งสองข้าง เพื่อป้องกันฟิล์มโฟโตรีซิสจากสิ่งสกปรกภายนอก โดยแผ่นฟิล์มพลาสติกด้านหนึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นใส อีกด้านหนึ่งเป็นแผ่นขุ่น ดังภาพที่ ก.3



ภาพที่ ก.1 ลักษณะฟิล์มหลังจากการฉายแสง



ภาพที่ ก.2 फिल्मแบบเนกาทีฟที่มีลักษณะเป็นฟิล์มแข็ง



ภาพที่ ก.3 ลักษณะการลอกฟิล์มโฟโตรีซิส

เครื่องรีดฟิล์มไวแสง

ในขั้นตอนการการสร้างแบบหล่อจำเป็นต้องมีการรีดฟิล์มโฟโตรีซิสเพื่อให้ติดกับแผ่นสแตนเลส สำหรับเครื่องมือที่นำมาใช้งานในการติดฟิล์มในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า เครื่องรีดฟิล์มไวแสง รุ่น LAM-150 แสดงดังภาพที่ก.4 ของบริษัทวาร์ฟ คอร์ปอเรชั่น จำกัด โดยในผนวกนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้งานของเครื่องรีดฟิล์มไวแสงและขั้นตอนการติดฟิล์มลงบนสแตนเลส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

วิธีการใช้งานของเครื่องรีดฟิล์มไวแสง

จากภาพที่ก.5 เครื่องรีดฟิล์มไวแสงจะประกอบด้วย ช่องป้อนแผ่นสเตรเลส ฝาครอบซึ่งได้ ฝาครอบจะมีลูกกลิ้งสำหรับรีดฟิล์มและฮีตเตอร์ และแผงควบคุม โดยรายละเอียดของแผงควบคุมมี ดังนี้

1. สวิตช์เปิด/ปิดเครื่อง ใช้สำหรับการเปิด/ปิดเครื่องฟิล์มไวแสง เมื่อทำการเปิดเครื่อง หลอดไฟสีแสงด้านบน "POWER" จะติดขึ้น
2. สวิตช์เปิด/ปิดมอเตอร์ ใช้สำหรับเปิด/ปิดการทำงานของมอเตอร์ภายในเครื่อง ซึ่งทำให้ ลูกกลิ้งหมุนและพร้อมใช้งาน เมื่อทำการเปิดมอเตอร์ หลอดไฟด้านบน "MOTOR" จะติดขึ้น
3. ปุ่มปรับควบคุมอุณหภูมิ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ โดยสามารถปรับได้ด้วยการหมุนปุ่มปรับควบคุมอุณหภูมิตามที่ต้องการ เมื่อหมุนปุ่มควบคุมอุณหภูมิ ฮีตเตอร์จะเริ่มทำงาน โดยจะมีหลอดไฟด้านบน "READY" บอกสถานะดังนี้

"สว่าง"	แสดงว่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์สูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้
"ดับ"	แสดงว่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้
"กระพริบ"	แสดงว่าอุณหภูมิตรงตามที่กำหนด



ภาพที่ก.4 เครื่องรีดฟิล์มไวแสง รุ่น LAM-150



ช่องป้อนแผ่นสแตนเลส

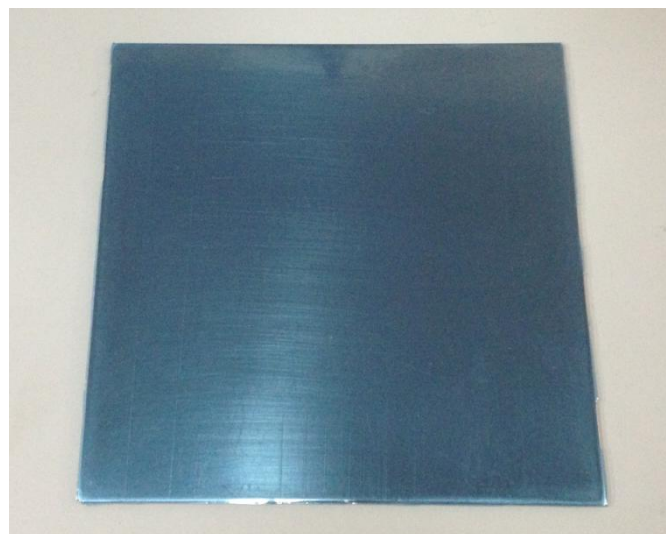
ภาพที่ ก.5 ส่วนประกอบของเครื่องรีดฟิล์มไวแสงที่ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ

ขั้นตอนการติดฟิล์มลงบนสแตนเลส

1. เปิดเครื่องรีดฟิล์มไวแสงและมอเตอร์ พร้อมปรับอุณหภูมิไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส
2. เตรียมฟิล์มโฟโตเรซิส โดยการตัดฟิล์มให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสแตนเลสเล็กน้อย จากนั้นทำการลอกแผ่นพลาสติกชั้นนอกเพียงหนึ่งในสี่ของฟิล์ม
3. คว่ำฟิล์มโฟโตเรซิสและนำไปติดบริเวณด้านบนบนของแผ่นสแตนเลส แล้วจึงป้อนเข้าเครื่องรีดฟิล์มไวแสง เครื่องจะเริ่มดึงแผ่นสแตนเลสเข้าไปพร้อมกับฟิล์ม ให้ทำการจับแผ่นพลาสติกชั้นในไว้ให้ค่อยๆ ลอกออกจากฟิล์มโฟโตเรซิส จนเครื่องรีดฟิล์มไวแสงดึงแผ่นสแตนเลสเข้าไปจนหมด ดังภาพที่ ก.6
4. นำแผ่นสแตนเลสที่มีฟิล์มโฟโตเรซิสติดอยู่ด้านบนเข้าเครื่องรีดฟิล์มไวแสงรีดซ้ำทั้งหมด 4 รอบ เพื่อให้ฟิล์มโฟโตเรซิสติดแน่นกับแผ่นสแตนเลส หลังจากนั้นปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นและติดฟิล์มโฟโตเรซิสส่วนเกินออก ดังภาพที่ ก.7 พร้อมนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ ก.6 ลักษณะการป้อนแผ่นสแตนเลสเข้าเครื่องรีดฟิล์มไวแสง



ภาพที่ ก.7 แผ่นสแตนเลสที่ทำการติดฟิล์มโฟโตเรซิสแล้ว

กล่องยูวี

ในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อใช้กระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง โดยในงานวิจัยนี้ใช้กล่องฉายยูวีที่จัดทำขึ้นเองในการฉายแสง โดยกล่องฉายยูวีที่จัดทำขึ้นเองนี้จะประกอบด้วยหลอด ยูวีขนาด 10 วัตต์จำนวน 4 หลอด ซึ่งกล่องฉายยูวีนี้สามารถเลือกระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับ

ต้นกำเนิดแสงได้ ดังภาพที่ ก.8 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับต้นกำเนิดแสงเท่ากับ 3.25 เซนติเมตรและมีแรงกดดันที่มากกว่า 0.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร [20]



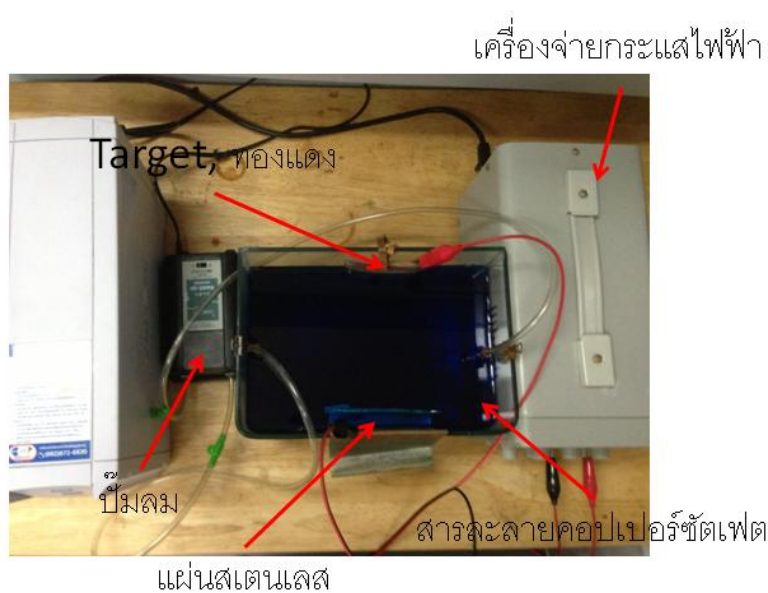
ภาพที่ ก.8 กล้องฉายยูวี

การชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

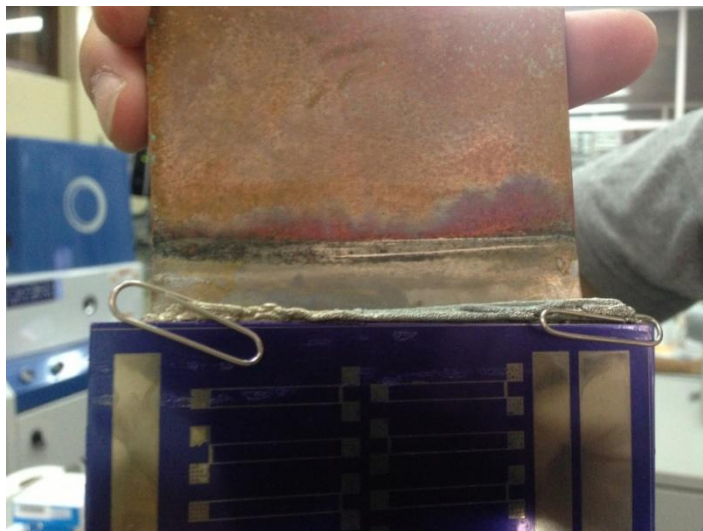
ในกระบวนการสร้างโครงสร้างทองแดงแบบลอยตัวใช้วิธีการชุบโลหะด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบโลหะจากอิเล็กโทรดหนึ่งลงบนอิเล็กโทรดอีกฝั่งหนึ่งที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ ภาพที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมการปลูกฟิล์มโลหะด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมีซึ่งอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดที่เป็นชิ้นโลหะผ่านสายไฟไปยังขั้วแคโทดที่เป็นชิ้นงานที่ต้องการปลูกโลหะ ทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดวิ่งผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังชิ้นงานที่ขั้วแคโทดได้

กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานทองแดงเป็นขั้วแอโนด แผ่นสแตนเลสที่ผ่านการสร้างแบบหล่อเป็นขั้วแคโทดและสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ได้แสดงดังภาพที่ ก.9 ซึ่งประกอบด้วย บีมลม แท่งทองแดง แผ่นสแตนเลสที่ทำแบบหล่อตามลวดลายที่ต้องการแล้ว อ่างสำหรับใส่สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยในภาคผนวกนี้ จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีดังภาพที่ ก.9
2. นำชิ้นทองแดงจุ่มลงในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต
3. นำแผ่นสแตนเลสที่ผ่านการสร้างแบบหล่อมาหนีบกับแผ่นทองแดง ดังภาพที่ ก.10 แล้วนำแผ่นสแตนเลสจุ่มลงในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต
4. ต่อสายไฟขั้วบวกกับชิ้นทองแดงและต่อสายไฟขั้วลบกับแผ่นสแตนเลส
5. ติดตั้งสายขงที่ต่อกับปั๊มลมให้ปลายของสายขงอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างชิ้นทองแดงกับแผ่นสแตนเลส เพื่อกวนสารละลายให้เกิดความปั่นป่วน ทำให้การปลูกทองแดงลงบนพื้นผิวของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอมากขึ้น
6. เปิดเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ทองแดงจะเริ่มเคลือบลงบนแผ่นสแตนเลส รอจนกระทั่งได้ความหนาตามที่ต้องการจึงปิดเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ ก.9 การติดตั้งอุปกรณ์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี



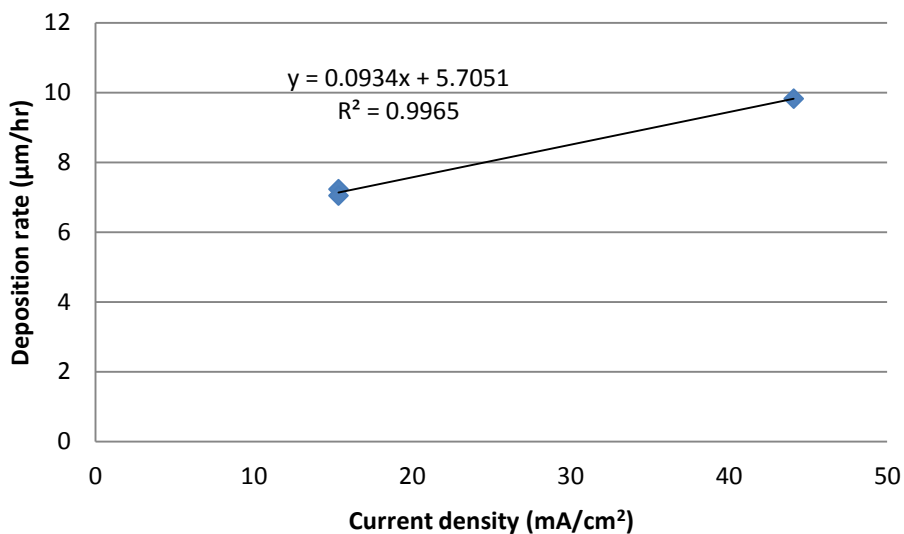
ภาพที่ ก.10 ลักษณะในการจับยึดแผ่นสแตนเลสในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมี

สำหรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบและระยะเวลาในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดในการจ่ายกระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วยมิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรกับอัตราการปลูกฟิล์มของทองแดงในหน่วยไมโครเมตรต่อชั่วโมง ของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยของภาคนันทวิวัฒน์วิช (2010) มาประยุกต์ใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังภาพที่ ก.11 ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ตามสมการข้างล่าง จากสมการนี้สามารถนำมาหากระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเคมีเพื่อนำมาใช้ในการสร้างโครงสร้างทองแดงของงานวิจัยนี้ได้

$$y = 0.0934x + 5.7051$$

y คืออัตราการปลูกฟิล์มของทองแดง (ไมโครเมตรต่อชั่วโมง)

x คือค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่กับอัตราการปลูกฟิล์มของทองแดง

เครื่องสเป็คเตอรืง

ในขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยนิตินอล ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการสเป็คเตอรืง ซึ่งเป็นวิธีการเร่งประจุของก๊าซอาร์กอนไปชนกับนิตินอลภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทำให้นิตินอลแตกตัวเป็นอนุภาคและกระเด็นลงมาเคลือบบนโครงสร้างทองแดง โดยในงานวิจัยนี้ทำการเคลือบผิวนิตินอลด้วยเครื่องสเป็คเตอรืง ดังภาพที่ ก.12 ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) โดยในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบของเครื่องสเป็คเตอรืงและขั้นตอนในการเตรียมเครื่องสเป็คเตอรืงสำหรับการเคลือบผิวด้วยนิตินอล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนประกอบของเครื่องสเป็คเตอรืง

1. ห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ สำหรับใส่ชิ้นงานที่ต้องการทำการเคลือบลงไป โดยด้านบนของห้องสุญญากาศเป็นส่วนที่ต้องบรรจุส่วนของ target บริเวณฝาปิดของห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ ดังภาพที่ ก.13 และ ภาพที่ ก.14 ตามลำดับ
2. มาตรการสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศ
3. มาตรการอัตราการไหลของก๊าซ เพื่ออัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในการเคลือบผิวนิตินอล ซึ่งสามารถหมุนปรับอัตราการไหลของก๊าซตามที่ต้องการได้

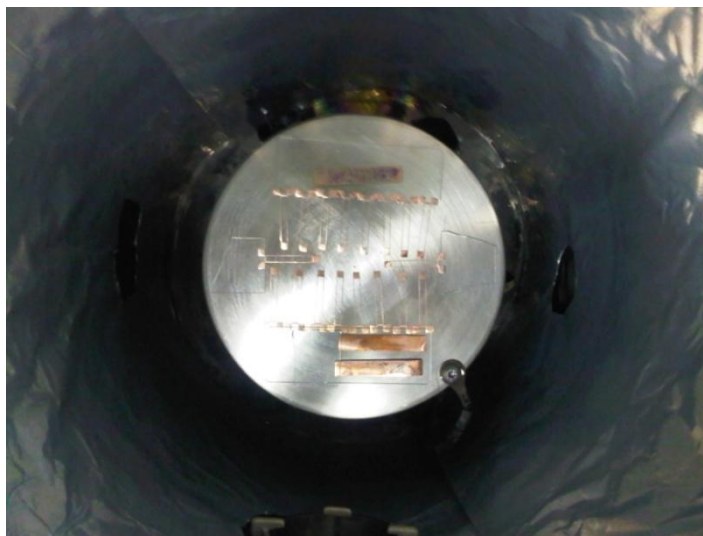
4. เครื่องควบคุม RF sputtering ใช้ในการควบคุมการสเปตเตอริงด้วย RF ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับการทำความสะอาดชิ้นงานภายในห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ
5. เครื่องควบคุม DC magnetron sputtering เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กภายในห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศเพื่อเหนี่ยวนำให้อนุภาคของนิทินอลไปเคลือบยังผิวของชิ้นงาน



ภาพที่ ก.12 เครื่องสเปตเตอริงที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยนิทินอล ณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ



ภาพที่ ก.13 ส่วนที่ต้องบรรจุส่วนของ target ของเครื่องสเปตเตอริง



ภาพที่ ก.14 ลักษณะภายในเครื่องสปีดเตอริง

ขั้นตอนในการเตรียมเครื่องสปีดเตอริงสำหรับการเคลือบผิวด้วยนิกทินอล

1. เปิดห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศและวางฐานที่มีชิ้นงานวางอยู่ด้านบนลงบนตำแหน่งวางฐานภายในห้องใส่ชิ้นงานบริเวณตรงกึ่งกลาง
2. ทำการเปลี่ยน target ที่ต้องการทำการเคลือบผิว บริเวณด้านบนของฝาปิดห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ target เป็นนิกทินอล อัตราส่วน 50:50 (Ni:Ti) ตรวจสอบว่า target ติดกับตัวระบายความร้อนแนบสนิท หลังจากนั้นทำการล็อก target และขันน็อตให้แน่น
3. ปิดฝาห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศและทำการเปิดปั๊มสุญญากาศและรอจนถึงความดันที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้จะทำการเคลือบผิวที่ความดัน 10^{-5} มิลลิบาร์ (ใช้เวลาในการรอประมาณ 1 ชั่วโมง)
4. เปิดเครื่องควบคุมและปรับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนจนได้ความดันที่ต้องการ
5. เปิดเครื่องควบคุม RF sputtering และตั้งเวลาสำหรับทำความสะอาดชิ้นงานภายในห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศ แล้วกดสวิทช์เริ่มต้นทำความสะอาดชิ้นงาน หลังจากทำความสะอาดเสร็จจึงปิดเครื่อง RF sputtering

6. เปิดเครื่องควบคุม DC magnetron sputtering และตั้งเวลาในเคลือบผิว หลังจากนั้นกดสวิทช์เริ่มทำการเคลือบผิวและปรับกระแสตามที่ต้องการ เมื่อทำการเคลือบผิวเสร็จ ทำการปิดเครื่องควบคุม DC magnetron sputtering และก๊าซอาร์กอน
7. ปิดปั๊มสุญญากาศ รอจนกว่ารอบของปั๊มลดลงต่ำกว่า 600 รอบต่อนาที แล้วจึงปิดระบบปั๊มทั้งหมด
8. เปิดฝาห้องใส่ชิ้นงานสุญญากาศและนำฐานที่มีชิ้นงานด้านบนอยู่ออกมา

เตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่าน

การสร้างฟิล์มนิตินอลประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ กระบวนการเคลือบผิวด้วยนิตินอลกับกระบวนการอบหลังการเคลือบผิวด้วยนิตินอล โดยกระบวนการอบหลังการเคลือบผิวด้วยนิตินอลหรือขั้นตอนในการอบฟิล์มนิตินอลนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้โครงสร้างภายในของนิตินอลเปลี่ยนแปลงจากอมอฟัสเป็นโครงสร้างผลึก ซึ่งทำให้ฟิล์มนิตินอลที่ผ่านการอบมีคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงรูปและคืนรูปได้และสภาพยืดหยุ่นยิ่งยวด เป็นต้น โดยทั่วไปในขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอลนี้จะทำการอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียสเพื่อให้โครงสร้างภายในของฟิล์มนิตินอลมีการเปลี่ยนแปลง โดยในงานวิจัยนี้จะทำขั้นตอนการอบฟิล์มนิตินอลด้วยเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่าน สำหรับก๊าซที่ใช้ในการอบคือ ก๊าซอาร์กอน เพราะก๊าสอาร์กอนเป็นก๊าซที่มีราคาถูกและสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในหลอดควอทซ์ เตาอบที่ใช้งานนี้จะประกอบด้วย หลอดควอทซ์ เตาอบ ปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในการอบ สำหรับเตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซไหลผ่านนี้เป็นเตาอบของภาควิชาโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังภาพที่ ก.15



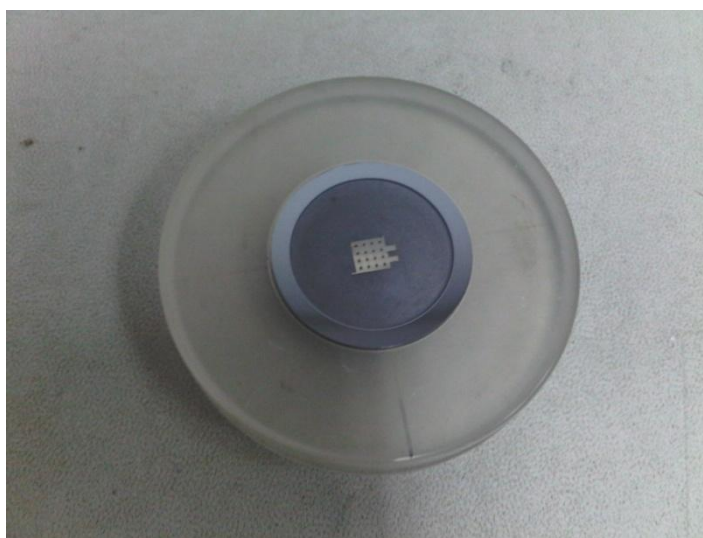
ภาพที่ ก.15 เตาอบแบบหลอดควอทซ์โดยมีก๊าซอาร์กอนไหลผ่าน

ภาคผนวก ข

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะจำเพาะของไมโครแอกซ์เวเตอร์

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแพ็คเกจที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะจำเพาะของนิทินอล หนึ่งในนั้นคือความเป็นโครงสร้างผลึกของนิทินอล โดยสามารถทำการศึกษาได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นี้เป็นเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังภาพที่ ข.1 แสดงแท่นวางชิ้นงาน และภาพที่ ข.2 แสดงลักษณะของเครื่องมือ สำหรับชิ้นงานที่จะนำไปทำการทดสอบนั้นควรมีขนาดอย่างน้อย 1×1 ตารางเซนติเมตร เพื่อให้ได้ผลวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ในงานวิจัยนี้ ตั้งอยู่ที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถติดต่อเพื่อทำการทดสอบได้ที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เบอร์ 02-218-5443



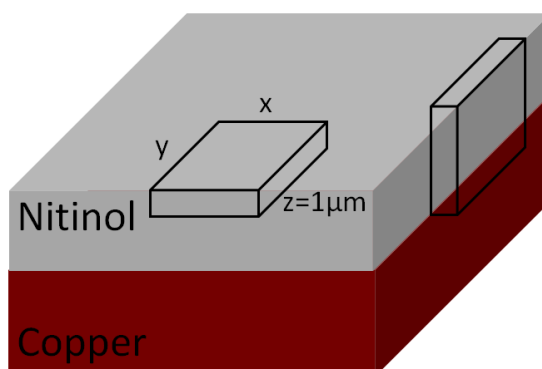
ภาพที่ ข.1 แท่นวางชิ้นงานสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



ภาพที่ ข.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

การศึกษาส่วนประกอบธาตุของตัวอย่างสามารถทำได้จากใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ซึ่งเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยอาศัยการวัดพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่คายออกมา ซึ่งธาตุแต่ละธาตุจะมีการคายพลังงานที่แตกต่างกัน จากหลักการนี้จึงสามารถระบุได้ว่าสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นี้เป็นธาตุชนิดใด ในการวิเคราะห์ธาตุของเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานจะสามารถกำหนดพื้นที่ในการวิเคราะห์ได้โดยมีความลึกในการวิเคราะห์เพียง 1 ไมโครเมตร ภาพที่ ข.3 แสดงปริมาตรที่ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถติดต่อเพื่อทำการทดสอบได้ที่ ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เบอร์โทรศัพท์ 02-218-5108



ภาพที่ ข.3 ลักษณะปริมาตรที่ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน

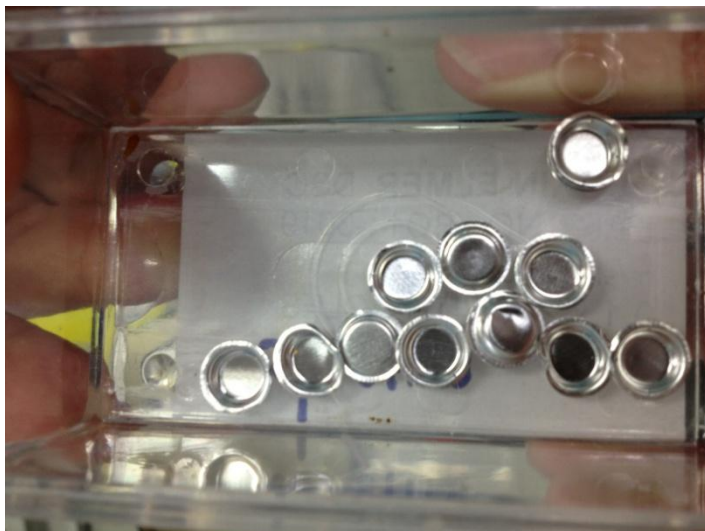
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของนิทินอลได้จากใช้เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนเป็นเครื่องที่ใช้เทคนิคในการวิเคราะห์วัสดุด้วยการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจากการวัดการถ่ายเทความร้อน โดยค่าพลังงานที่ใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทั้งสองสารจะแตกต่างกันต่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งพื้นภายในกราฟของการทดสอบที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความร้อนและโครงสร้างภายในของสารตัวอย่างด้วย ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์และตัวอย่างที่จะนำไปทำการทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ในการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนนี้สามารถเลือกช่วงในการทดสอบได้ หากต้องการทำการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนเหลวเพื่อทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานที่ทำการทดสอบมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องด้วยเช่นกัน

การเตรียมชิ้นงานสำหรับทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนนี้ จำเป็นต้องทำการบรรจุตัวอย่างเข้าไปในภาชนะขนาดเล็ก ซึ่งเป็นภาชนะที่ใช้เฉพาะสำหรับการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนแสดงดังภาพที่ ข.4 โดยมีข้อควรระวังคือ

1. ควรระวังไม่ให้มีช่องอากาศระหว่างชิ้นงานที่ทำการบรรจุลงในภาชนะขนาดเล็ก เพื่อป้องกันการผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากมีอากาศเข้าไปรบกวนในการทดสอบ
2. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบควรมีน้ำหนักอย่างน้อย 5 มิลลิกรัม เพื่อให้ผลการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนมีความแม่นยำ

โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดการถ่ายเทความร้อนที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถติดต่อเพื่อขอใช้เครื่องมือได้จากอาจารย์ ดร.วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข.4 ลักษณะภาชนะขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบด้วยเครื่องวัดการถ่ายเทความร้อน

ภาคผนวก ก

การทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์เบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์เบื้องต้น ซึ่งเป็นการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ โดยทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันซึ่งมีความหนาเท่ากับ 5.5 และ 20 ไมโครเมตรตามลำดับ ในการทดสอบจะทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสามชนิดคือ ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้ง ในขณะที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติเบื้องต้นแสดงดังภาพที่ ก.1 ซึ่งประกอบด้วย

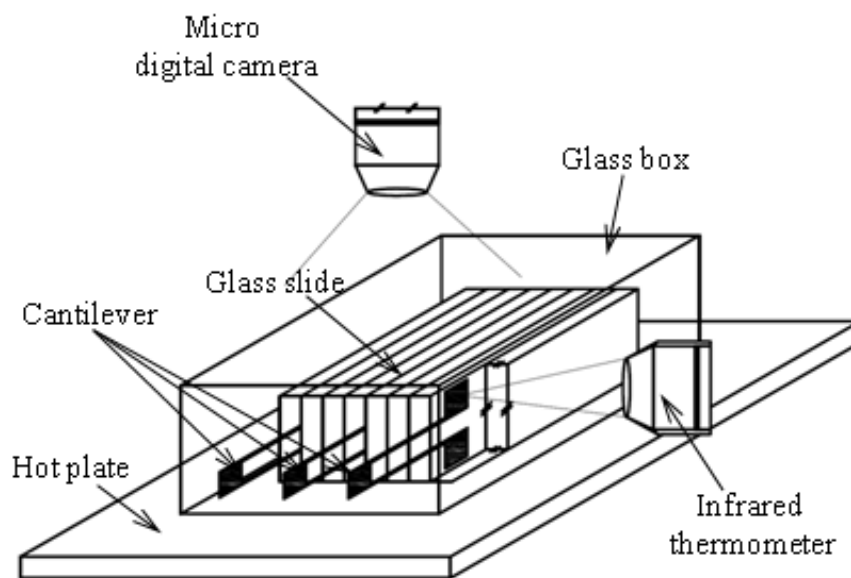
1. เครื่องสอตเพลด
2. กล่องกระจกสำหรับครอบชิ้นงานทดสอบ
3. กล้องวิดีโอไมโครสเกล (digital micro camera)
4. อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติเบื้องต้นจะทำการทดสอบไมโครแอกซ์เอเตอร์พร้อมกันทั้งสามชนิด โดยจะทำการจับยึดไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยกระจกแล้วทำการติดตั้งบนเครื่องสอตเพลดและครอบด้วยกล่องกระจก จากนั้นทำการเปิดเครื่องสอตเพลดเพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์อย่างช้าๆ ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 1.4 องศาเซลเซียสต่อนาที และลดอุณหภูมิอย่างช้าๆ ที่อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 1.3 องศาเซลเซียสต่อนาที สำหรับการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์จะใช้เทคนิคการตัดต่อวิดีโอมาประยุกต์ใช้ โดยการบันทึกภาพการกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยกล้องวิดีโอไมโครสเกลที่ทำการติดตั้งไว้ด้านบนของกล่องกระจกและทำการหาระยะกระดกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Photoshop) อีกทั้งยังทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์พร้อมกันด้วย ซึ่งทำการวัดบนแผ่นกระจกและอาจจะทำให้ความผิดพลาดในการวัดเกิดขึ้นได้

ภาพที่ ก.2(ก) แสดงลักษณะในการยึดจับไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยกระจกและเมื่อทำการเปิดเครื่องสอตเพลด ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันจะเกิดการกระดก โดยไมโครแอกซ์เอเตอร์ทั้งสามชนิดจะกระดกไปทางด้านขวาหรือไปในทิศทางนิทินอล ซึ่งในภาพที่ ก.2(ข) แสดงลักษณะการกระดกของ

ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แสดงดังภาพที่ ค.3 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะเกิดการกระดกไปทางด้านขวา และเมื่อไมโครแอกซ์เวเตอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ก็สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อทำการหยุดให้ความร้อนจะทำให้อุณหภูมิต่ำลง ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะกระดกกลับไปทางซ้ายหรือไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีระยะกระดกที่ลดลงแล้วกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิมในที่สุด โดยไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบจะมีระยะกระดกที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตที่มีลักษณะแบนราบกับไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง พบว่า ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ของทั้งสองชนิดนี้มีระยะกระดกที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ที่อุณหภูมิเท่ากับ 125 องศาเซลเซียสจะทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ไม่ทำการอบ ไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบและโค้ง มีระยะกระดกเท่ากับ 2.3, 3.0 และ 3.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์สามารถสรุปได้ว่า การอบฟิล์มนิทินอลที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ แต่ลักษณะในการอบด้วยแบบหล่อคอนกรีตจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์

แต่อย่างไรก็ตามในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติเบื้องต้นด้วยชุดการทดสอบนี้ ต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่นานและการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วยเทคนิคการตัดต่อวิดีโอที่มีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ เนื่องจากลักษณะในการบันทึกภาพด้วยกล้องวิดีโอไมโครคาเมราที่นำมาใช้งานนี้ มีความละเอียดในการบันทึกภาพที่ต่ำ ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการหาระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้ง่าย จากข้อเสียของชุดทดสอบเบื้องต้นที่ได้กล่าวถึงนี้ งานวิจัยจึงมีการปรับปรุงชุดทดสอบเพื่อทำให้การทดสอบมีความแม่นยำยิ่งขึ้น



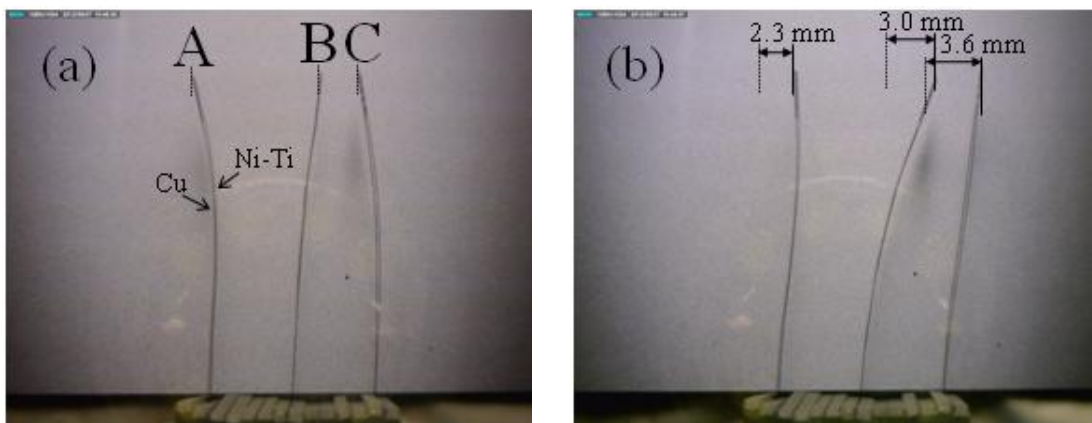
(ก)



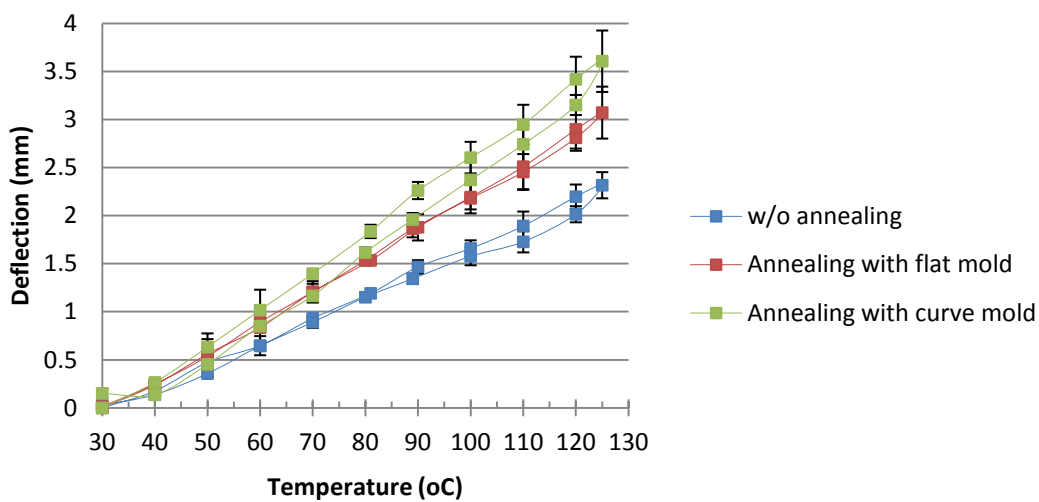
(ข)

ภาพที่ ค.1 ชุดทดสอบไมโครแอกชูเอเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติเบื้องต้น

(ก) ไดอะแกรมแสดงชุดทดสอบ (ข) ภาพถ่ายชุดทดสอบ



ภาพที่ ค.2 ลักษณะการกระดกของไมโครแอกซ์เอเตอร์ (ก) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ข) ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส โดย A: ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ไม่ทำการอบ B: ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะแบนราบ C: ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการอบด้วยแบบหล่อที่มีลักษณะโค้ง (รัศมีความโค้งเท่ากับ 22 มิลลิเมตร)



ภาพที่ ค.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระยะกระดกต่ออุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์แบบต่างๆ

ภาคผนวก ง

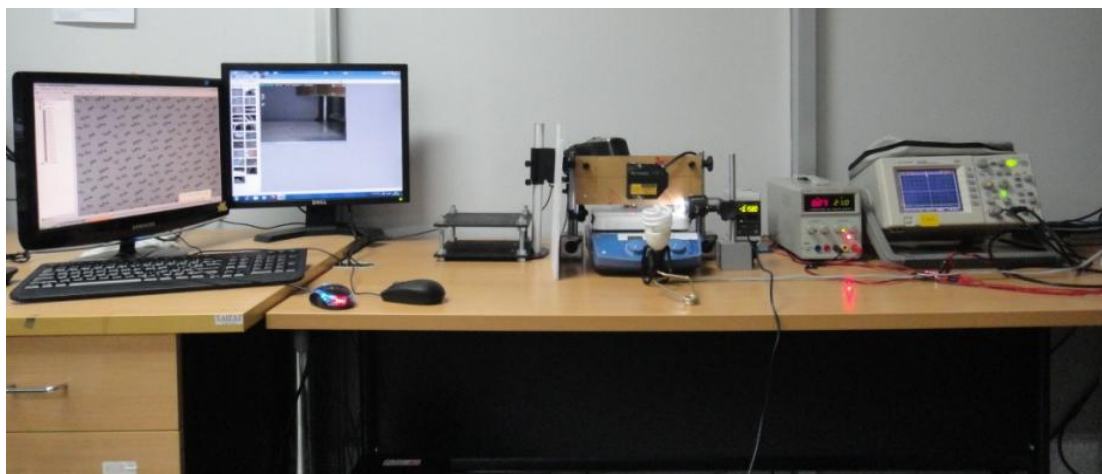
ชุดอุปกรณ์และการจัดการผลในการทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์

การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิตินี้จะทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจำรูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันในขณะที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิ พร้อมทั้งทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในขณะเดียวกัน โดยในผนวกนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและข้อควรระวังในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติแสดงดังภาพที่ ง.1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. เครื่องฮอตเพลต
2. เครื่องออสซิลโลสโคป
3. เลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และมิเตอร์
4. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์
5. อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์



ภาพที่ ง.1 ชุดทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติ

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติของไมโครแอกซ์เอเตอร์เป็นการทดสอบโดยมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์โดยตรงด้วยเครื่องสอตเพลต จากการทดสอบมีข้อควรระวังดังนี้

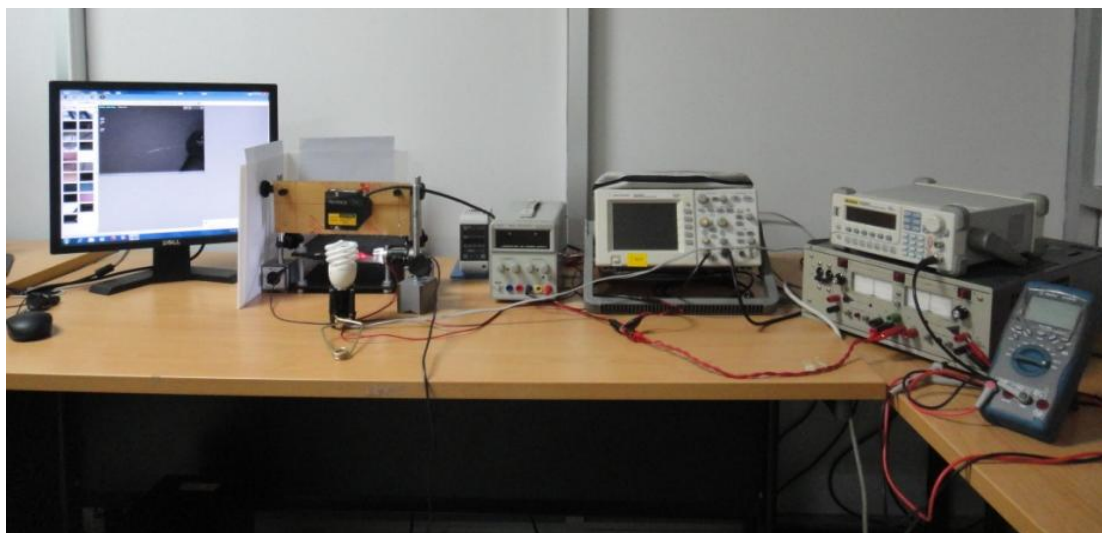
1. ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์ด้วยเครื่องสอตเพลตจะทำได้โดยการหมุนสวิทช์ปรับอุณหภูมิของเครื่องสอตเพลตไปยังค่าหนึ่งและเปิดเครื่องไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการทดสอบจำเป็นต้องห้ามปรับอุณหภูมิเกิน 250 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลานานกว่า 2 นาที เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาดังกล่าวนี้สามารถทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่ทำการทดสอบเกิดการเสียวรูป หรือบิดงอ หรือเกิดการลุกไหม้ได้ สำหรับในการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติของงานวิจัยนี้ทำการหมุนสวิทช์ปรับอุณหภูมิไปที่ 150 องศาเซลเซียสและเปิดเครื่องเป็นระยะเวลา 2 นาที
2. ในระหว่างทำการทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติโดยมีเครื่องสอตเพลตใช้ในการเพิ่มความร้อน ไมโครแอกซ์เอเตอร์จะเกิดการกระดกสั้นขึ้นลงได้ เนื่องจากไมโครแอกซ์เอเตอร์มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศรอบๆไมโครแอกซ์เอเตอร์ตลอดเวลาและพลังงานที่ให้กับไมโครแอกซ์เอเตอร์นี้มีอัตราในการจ่ายพลังงานที่ต่ำกว่า จึงทำให้ไมโครแอกซ์เอเตอร์เกิดการสั้นขึ้นลงได้
3. การทดสอบการตอบสนองเชิงสถิติของไมโครแอกซ์เอเตอร์นี้ จำเป็นต้องทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์นี้ควรทำการวัดที่บริเวณปลายของไมโครแอกซ์เอเตอร์ เนื่องจากบริเวณปลายของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่บอกถึงอุณหภูมิจริงของไมโครแอกซ์เอเตอร์ ซึ่งจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนของไมโครแอกซ์เอเตอร์อยู่ในทางตรงกันข้ามหากทำการวัดอุณหภูมิของไมโครแอกซ์เอเตอร์ที่บริเวณฐานที่ทำการยึดติดกับแผ่นกระจก จะเป็นการวัดอุณหภูมิแผ่นกระจกแทน เนื่องจากแผ่นกระจกมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกที่ช้าและมีการเก็บสะสมความร้อนได้ดี จึงทำให้มีการส่งความร้อนให้กับฐานของไมโครแอกซ์เอเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งอุณหภูมิของฐานที่ถูกจับยึดด้วยแผ่นกระจกจะเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นกระจกนั่นเอง ดังนั้นอาจจะทำให้เกิดความเข้าใจผลการทดสอบผิดได้หากทำการวัดผิดตำแหน่ง

การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์นี้จะทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกัน โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดต่างๆและความถี่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ โดยในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและข้อควรระวังในการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์แสดงดังภาพที่ ง.2 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้

1. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับไมโครแอกซ์เวเตอร์
2. เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า
3. เครื่องออสซิลโลสโคป
4. เลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์และมิเตอร์
5. เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ดิสเพลสเมนต์เซนเซอร์



ภาพที่ ง.2 ชุดทดสอบไมโครแอกซ์เวเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ของงานวิจัยนี้เป็นการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าและมีความถี่ต่างๆ จากการทดสอบมีข้อควรระวังดังนี้

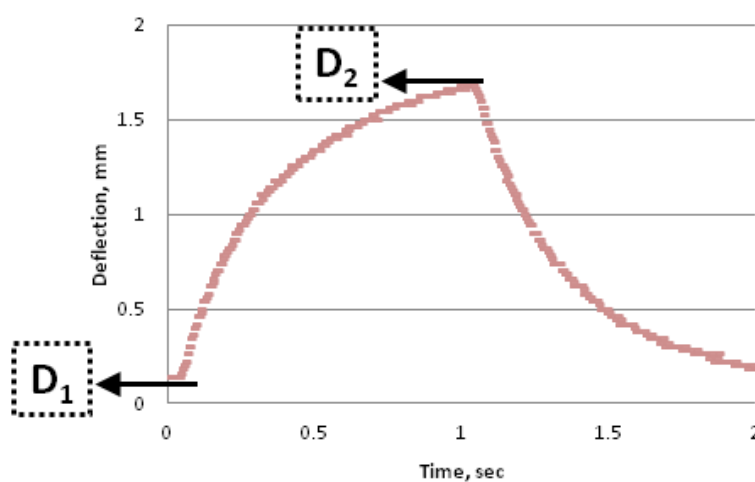
1. ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์ไม่ควรจ่ายกระแสไฟฟ้าเกิน 2 แอมแปร์ เนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงจะทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในไมโครแอกซ์เวเตอร์อย่างรวดเร็วส่งผลให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์เกิดการเผาไหม้ หรือเกิดการเสียหายขึ้น จำเป็นต้องระวังเป็นอย่างยิ่ง
2. ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไม่ควรจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำจนเกินไป เนื่องจากที่ความถี่ต่ำจะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอกซ์เวเตอร์เป็นระยะเวลาานาน ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและทำให้ระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์สูงขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจทำให้ไมโครแอกซ์เวเตอร์หลุดออกจากลำแสงของเลเซอร์คิสเพลสเมนต์เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดได้ โดยในงานวิจัยนี้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.25 แอมแปร์ที่ความถี่ต่ำที่สุดคือ 0.5 เฮิรตซ์ ซึ่งการจ่ายกระแสไฟฟ้าตามสภาวะดังกล่าวนี้ สามารถวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์ได้
3. ในการทดสอบของงานวิจัยนี้จะทำการจับยึดไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 22.5 มิลลิเมตร โดยปกติเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ความถี่สูงขึ้นเรื่อยๆ ไมโครแอกซ์เวเตอร์จะมีระยะกระดกต่ำลงแต่จากการศึกษาจะพบกับความถี่ที่ทำให้เกิดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์มีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งความถี่นี้เป็นความถี่ธรรมชาติของไมโครแอกซ์เวเตอร์นั่นเอง โดยความถี่เรโซแนนซ์ของไมโครแอกซ์เวเตอร์ที่มีความยาว 22.5 มิลลิเมตรเท่ากับ 20 เฮิรตซ์

การคำนวณหาแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์

ในการทดสอบการตอบสนองเชิงจลน์ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวัดระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์แบบโลหะผสมจํารูปที่มีลักษณะเป็นคานสองชั้นที่ประกอบด้วยนิทินอลกับทองแดงซ้อนทับกันที่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ทำกรเก็บค่ามาได้ง่ายขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำข้อมูลการทดสอบนี้มาจัดการเพื่อทำการเปลี่ยนจากค่าระยะกระดกของไมโครแอกซ์เวเตอร์เป็นค่าแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์เวเตอร์ด้วย

การคำนวณหาแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์แนวคิดในการหาค่าแอมพลิจูดแสดงดังภาพที่ ง.3 โดยทำการวัดระยะกระดกสูงสุดของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์และวัดระยะต่ำสุดของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์จากนั้นนำมาหาระยะระหว่างระยะกระดกสูงสุดและระยะกระดกต่ำสุด ซึ่งจากแนวคิดนี้สามารถทำให้คำนวณแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์ได้จากสมการนี้

$$Amplitude = D_1 - D_2$$



ภาพที่ ง.3 แนวคิดในการหาแอมพลิจูดของไมโครแอกซ์ฮอเตอร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกยุทธ ว่องวีระยุทธ เกิดเมื่อวันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ 2529 ที่จังหวัดพัทลุง เป็นบุตรคนกลางของนายไพบุลย์ ว่องวีระยุทธ และนางลัดดา ว่องวีระยุทธ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. เอกยุทธ ว่องวีระยุทธ, อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, วีระยุทธ ศรีธรรวานิช. กระบวนการผลิตโครงสร้างคานสองชั้นแบบลอยตัวระหว่างนิตินอลกับทองแดงสำหรับแอคชูเอเตอร์แบบโลหะผสมจำรูป. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25. AMM72. 19 - 21 ตุลาคม 2554 โรงแรมอ่าวนาง วิลล่า รีสอร์ท จังหวัดกระบี่
2. Eakayoot Wongweerayoot, Werayut Srituravanich, Alongkorn Pimpin. Parametric study of an annealing process for a fabrication of bimorph nitinol-copper cantilever using quartz tube furnace with argon overflow. 1st Mae Fah Luang University International Conference 2012. O-SC-A-10. 29 Nov - 1 Dec 2012. Mae Fah Luang University, Chiang Rai.