

กระบวนการสร้างเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และการศึกษาสมรรถนะ
ในการใช้งานเป็นแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า



นาย ภากร นนทิวฒน์วิช

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION PROCESS OF MICRO COIL EMBEDDED MEMBRANE AND ITS
PERFORMANCE INVESTIGATION AS AN ELECTROMAGNETIC ACTUATOR



Mr.Pakorn Nontiwatwanich

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กระบวนการสร้างเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และการศึกษา
สมรรถนะในการใช้งานเป็นแอคซิวเอเตอร์แบบ
แม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

นายภากร นนทิวัดมน์วณิช

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

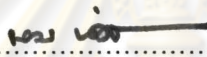
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

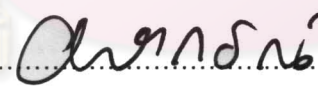
รองศาสตราจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

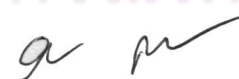

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

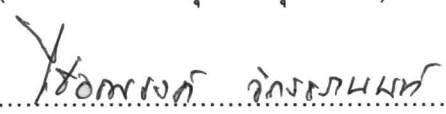
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีสุวรรณิช)

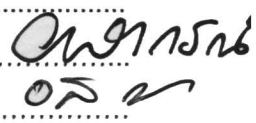

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

ภากร นนทิวฒน์วณิช : กระบวนการสร้างเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และการศึกษา
สมรรถนะในการใช้งานเป็นแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (FABRICATION
PROCESS OF MICRO COIL EMBEDDED MEMBRANE AND ITS
PERFORMANCE INVESTIGATION AS AN ELECTROMAGNETIC ACTUATOR)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม : รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ , 108 หน้า.

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรน PDMS ที่ถูกฝังด้วยคอยล์ทองแดงเพื่อ
ใช้เป็นส่วนประกอบของเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า กระบวนการสร้างที่
พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือกระบวนการสร้างคอยล์ทองแดง เริ่มจาก
การสร้างแบบหล่อที่มีรูปร่างของคอยล์บนแผ่นสแตนเลส โดยใช้เทคนิค Photolithography
หลังจากนั้นจึงนำแบบหล่อที่ได้ไปปลุกฟิล์มทองแดงด้วยเทคนิค Electroplating เพื่อสร้างคอยล์
ทองแดงขึ้นมา ขั้นตอนที่สองคือการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์ทองแดง โดยวิธีการ
เท PDMS เริ่มจากการสปิน PDMS ลงบนฐานอะคริลิกแล้วนำไปอบเพื่อให้แข็งตัว หลังจากนั้น
จึงวางคอยล์ทองแดงด้านบนแล้วสปิน PDMS ทับอีกครั้ง สุดท้ายจึงลอกแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์
ทองแดงอยู่ภายในออกมา ในการศึกษาพบว่า อัตราการปลุกฟิล์มทองแดงเป็นฟังก์ชันโดยตรง
กับค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ อีกทั้งขนาดความขรุขระของแผ่นสแตนเลสควรมีค่าน้อยกว่า
0.112 ไมโครเมตร เพื่อให้คอยล์ทองแดงหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสได้ หลังจากนั้นจึงนำ
แผ่นเมมเบรนที่ได้มาประกอบเป็นแอคชูเอเตอร์โดยแผ่นเมมเบรนหนา 300 ไมโครเมตร มีคอยล์
ทองแดงรูปร่างวงกลมรอบเดียวหนา 40 ไมโครเมตร กว้าง 500 ไมโครเมตร ฝังอยู่ ขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลางคอยล์เท่ากับ 1 เซนติเมตร ในการทดสอบได้ศึกษาขนาดเมมเบรนสองขนาดคือ เส้น
ผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร ผลการทดสอบของ Static Response พบว่าเมื่อ
จ่ายกระแสไฟฟ้า 3.16 แอมแปร์ แอคชูเอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 เซนติเมตร จะ
มีระยะกระดกเท่ากับ 25 และ 73 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบ Dynamic Response
ด้วยกระแสไฟฟ้ายาวในช่วงความถี่ 2-8 เฮิรท์และกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.9 แอมแปร์
พบว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นระยะกระดกสูงสุดจะมีค่าลดลงสำหรับ
ทั้งสองกรณี แอคชูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตรจะให้ระยะ
กระดกสูงสุดเท่ากับ 15 และ 21 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่ความถี่ 2 เฮิรท์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170421521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MICROCOIL / PDMS / MEMBRANE ACTUATOR /
ELECTROMAGNETIC / MEMBRANE

PAKORN NONTIWATWANICH : FABRICATION PROCESS OF MICRO COIL
EMBEDDED MEMBRANE AND ITS PERFORMANCE INVESTIGATION AS AN
ELECTROMAGNETIC ACTUATOR. THESIS ADVISOR : ALONGKORN
PIMPIN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF. ASI
BUNYAJITRADULYA, Ph.D., 108 pp.

The fabrication process of the micro coil embedded membrane is developed. This membrane is the main component in a micro electromagnetic membrane actuator. In this study, Polydimethylsiloxane (PDMS) and copper are used as the membrane and metal coil materials, respectively. The fabrication process is divided into two main parts, namely coil electroplating and membrane forming with coil assembly. Firstly, the mold in a shape of copper coil is created by photolithography technique on a stainless substrate, and copper is then electroplated into the mold until the desired thickness is achieved. Next, the copper coil is removed from the mold, and placed onto a polymerized PDMS layer that is previously coated on an acrylic substrate. After that, another layer of PDMS is poured over, spun, and polymerized to form the micro coil embedded membrane. Finally, the resulting micro coil embedded membrane is peeled off from the acrylic substrate. In this study, we found that the copper deposition rate is linearly increased with the applied current density. Moreover, the roughness of the stainless substrate should be less than $0.112 \mu\text{m}$ as the copper coil detached from the substrate naturally. The prototype actuator was assembled by using $300\text{-}\mu\text{m}$ -thick membrane with embedded $40\text{-}\mu\text{m}$ -thick, $500\text{-}\mu\text{m}$ -wide and 1 cm diameter single-turn copper coil. The membranes with 2-cm and 4-cm diameter were tested. The static response test reveals that the deflection of 2-cm diameter membrane is $25 \mu\text{m}$, while that of 4-cm diameter membrane is $73 \mu\text{m}$, at the applied DC current of 3.16 A. For the dynamic response test with AC sinusoidal current, the deflection of both actuators is decreased when the frequency of applied current is increased. At the driving frequency of 2 Hz and peak-to-peak current of 1.9 A, the amplitude of deflection is $15 \mu\text{m}$ for 2-cm diameter membrane, while that of 4-cm diameter membrane is $21 \mu\text{m}$.

Department : Mechanical Engineering

Student's Signature 

Field of Study : Mechanical Engineering

Advisor's Signature 

Academic Year : 2010

Co-Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย “อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน” ซึ่งได้มอบความรู้ คำแนะนำต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านของงานวิจัยและการดำเนินชีวิตต่อไป ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ที่ช่วยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และช่วยผลักดันให้ผู้วิจัยเดินทางมาถึงจุดหมายที่คาดหวังไว้ได้สำเร็จ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อติ บุญจิตราดุลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ ในการแก้ปัญหา ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จออกมาได้อย่างดี อีกทั้งยังให้แนวคิดที่ไม่สามารถเรียนรู้ได้จากตำราซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานและการใช้ชีวิตในภายภาคหน้า

งานวิจัยนี้ได้รับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือการทดลองต่างๆ จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี แห่งนี้ ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความเอื้ออาทรจาก พี่ เพื่อน และน้องใน ห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งแก่ พี่กรกช เพชรดี และพี่กฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ พี่ในห้องปฏิบัติการที่ช่วยให้คำปรึกษา และร่วมฟันฝ่าอุปสรรคตลอดการทำงาน มาด้วยกัน และขอขอบพระคุณ พี่ปริชญเอก ร่มไทรรัตน์ ที่ช่วยให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำงานด้วยความยินดีมาตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ นายวิโรจน์ เอกวงค์มั่นคง นายเชาวนพันธุ์ เหล็กขำ นายสมพงษ์ เจริญบุญลยวิวัฒน์ รวมถึงเพื่อนที่เรียนปริญญาโทมาด้วยกันทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและสร้างความสนุกสนานแก่ผู้วิจัยมาตลอด

และในท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นายสัตย์ชัย และนางกรรณา นนทิววัฒน์ วณิช บิดา-มารดาของผู้วิจัยที่ได้ให้การเลี้ยงดูทั้งกายและใจ ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีแรงใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝัังไมโครคอยล์.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 การพัฒนากระบวนการสร้าง.....	18
2.1 แนวคิดของกระบวนการสร้างแบบใหม่.....	18
2.2 กระบวนการสร้างคอยล์โลหะ.....	18
2.2.1 การสร้างแบบหล่อ.....	19
2.2.2 การปลุกคอยล์โลหะ.....	22
2.3 กระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์โลหะ.....	25
2.3.1 การสร้างแผ่นเมมเบรนและวิธีการประกบ.....	25
2.3.2 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นฐานสำหรับกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรน.....	26
2.4 สรุปผล.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การใช้งานเป็นไมโครแอกซ์เวเตอร์.....	40
3.1 การสร้างไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์เพื่อใช้ในการทดสอบ.....	40
3.1.1 การเลือกพารามิเตอร์ของแผ่นเมมเบรนฝึ่งไมโครคอยล์และการสร้าง.....	40
3.1.2 การประกอบเป็นเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์.....	41
3.2 การทดสอบ Static response.....	42
3.2.1 การทดสอบและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล.....	42
3.2.2 ผลการทดสอบ.....	43
3.3 การทดสอบ Dynamic response.....	45
3.3.1 การทดสอบและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล.....	45
3.3.2 ผลการทดสอบ.....	48
3.4 สรุปผล.....	50
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา.....	69
4.1 ข้อสรุปของการศึกษา.....	69
4.2 อภิปรายผลการศึกษา.....	71
4.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.....	78
ภาคผนวก ข.....	87
ภาคผนวก ค.....	92
ภาคผนวก ง.....	95
ภาคผนวก จ.....	100
ภาคผนวก ฉ.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ.....	28
2.2	คุณสมบัติของทองแดง.....	28
2.3	สรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอนการปลูกคอยล์ทองแดง.....	28
2.4	คุณสมบัติของ PDMS.....	29
2.5	ขั้นตอนในการสร้างแผ่นเมมเบรนฝั้ไมโครคอยล์.....	29
2.6	สรุปกระบวนการสร้างแผ่นเบรนฝั้ไมโครคอยล์ทองแดง.....	30



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1(ก-จ) ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค.....	8
1.2(ก-ค) เมมเบรนแอคชูเอเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นปั๊ม (Yin et al., 2007).....	11
1.3(ก-ข) การประยุกต์ใช้เมมเบรนแอคชูเอเตอร์ในรูปแบบซินเทติกส์เจ็ด.....	12
1.4 ไดอะแกรมส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของ piezoelectro microvalve (Doll et al., 2007).....	13
1.5 ไดอะแกรมลักษณะการทำงานและส่วนประกอบของ Thermopneumatic micropump (Jeong and Yang, 2000).....	13
1.6 ไดอะแกรมลักษณะการทำงานและส่วนประกอบของ TiNi shape memory micropump (Makino et al., 2001).....	14
1.7 ไดอะแกรมแสดงหลักการของเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า....	14
1.8 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Kim et al., 2005).....	15
1.9 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Yin et al., 2007).....	16
1.10 อุปกรณ์จ่ายพลังงานขนาดเล็กที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Wang et al., 2007).....	17
1.11 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างอุปกรณ์จ่ายพลังงานขนาดเล็กที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Wang et al., 2007).....	17
2.1 ไดอะแกรมและภาพตัดขวางของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์ที่ต้องการ.....	31
2.2 ตัวอย่างของคอยล์ทองแดงที่ถูกสร้างขึ้น.....	31
2.3 ไดอะแกรมรายละเอียดในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ.....	32
2.4 รูปร่างของคอยล์ที่ใช้ในการศึกษาและแผ่นแบบที่ใช้.....	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เกิดทับกับค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเทียบกับขนาดแบบที่ต้องการ.....	33
2.6(ก-ข)	ไดอะแกรมอธิบายการส่องผ่านของแสง.....	33
2.7	ไดอะแกรมอธิบายการฉายแสง.....	34
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดแสงถึงชิ้นงานกับความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับขนาดของแบบบนแผ่นแบบ.....	34
2.9	ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ.....	35
2.10	ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งชุด Electroplating.....	35
2.11	แผ่นแบบที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการปลูกฟิล์มทองแดง.....	36
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่และอัตราการปลูกฟิล์มทองแดง.....	36
2.13	ไดอะแกรมรายละเอียดการสร้างแผ่นเมมเบรนเพื่อให้คอลลอยด์ทองแดงฝังอยู่ภายใน.....	37
2.14	แผ่นเมมเบรนที่มีคอลลอยด์ทองแดงฝังอยู่ภายใน.....	37
2.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ PDMS กับเวลาในการสปิน.....	38
2.16	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอลลอยด์ทองแดง.....	39
3.1	ไดอะแกรมของคอลลอยด์ทองแดงที่ใช้ทดสอบ.....	53
3.2	เครื่องมือวัด Laser displacement sensor.....	53
3.3	ภาพถ่ายของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอลลอยด์ทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ.....	54
3.4	ไดอะแกรมการประกอบเมมเบรนแอคทีวเเลเตอร์และภาพตัดขวาง.....	55
3.5(ก-ข)	ภาพถ่ายของเมมเบรนแอคทีวเเลเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	56

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.6	ไดอะแกรมพารามิเตอร์ของการชิงแผ่นเมมเบรนในการประกบเข้ากับแผ่นอะคริลิก.....	56
3.7(ก-ข)	การติดตั้งชุดทดสอบเพื่อทดสอบ Static Response.....	57
3.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดก.....	58
3.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ป้อนให้แอกซ์เวเตอร์ต่อระยะกระดก...	58
3.10(ก-ข)	การติดตั้งชุดทดสอบเพื่อทดสอบ Dynamic response.....	59
3.11	ตัวอย่างสัญญาณขาออกที่แสดงบนออสซิลโลสโคป.....	60
3.12	ตัวอย่างกราฟแสดง Power Spectrum Density ณ ตำแหน่งค่าความถี่ขาออก	60
3.13	ตัวอย่างกราฟของสัญญาณขาออกที่ผ่านการเฉลี่ยแบบ Moving Average.....	61
3.14	ตัวอย่างกราฟแสดงลักษณะของสัญญาณที่ต่างเฟสกันระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออก.....	61
3.15(ก-ค)	ตัวอย่างการกระดกของแผ่นเมมเบรนที่เวลาต่างๆ ในการทดสอบ Dynamic response.....	62
3.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ขาเข้าและความถี่ขาออก.....	63
3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ขับกับระยะกระดกสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร.....	63
3.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ขับกับระยะกระดกสูงสุดในแต่ละครั้งในช่วงความถี่ 2 – 8 เฮิรท์ส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร.....	64
3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ขับกับระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เท่ากัน ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร.....	64
3.20	กราฟแสดงขนาดของ Forced vibration ที่ค่า damping ต่างๆกัน.....	65
3.21(ก-ข)	ไดอะแกรมแสดงลักษณะแอกซ์เวเตอร์.....	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซึบกับระยะกระดกสูงสุดของแอดชัวเอเตอร์ที่มี โพรงอากาศเปิดและปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร.....	67
3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซึบกับความต่างเฟสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร.....	67
3.24	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายกับระยะกระดกแบบ Static เมื่อใช้งาน แอดชัวเอเตอร์ที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้งานที่ความถี่ 5 เฮิรท์ซ ขนาดสัญญาณ 0.38 Vp-p.....	68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_t	พื้นที่ส่วนที่ใช้เชื่อมสายไฟ
B	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
B_t	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับขดลวด
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคอยล์
D_m	เส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน
D_t	เส้นผ่านศูนย์กลางของจุดวัดระยะกระดก
F	แรงแม่เหล็กไฟฟ้า
G	ระยะห่างระหว่างขาของคอยล์ทองแดง
I	กระแสไฟฟ้าที่ใส่ให้แอคชูเอเตอร์
L_t	ความยาวขาของคอยล์ทองแดง
P	พลังงานที่ป้อนให้แอคชูเอเตอร์
r	รัศมีของขดลวดโลหะ
ΔR	ระยะที่ยืดออกของแต่ละด้านของแผ่นเมมเบรน
R	ความต้านทานของคอยล์ทองแดง
R_m	รัศมีของเมมเบรน
T_c	ความหนาของคอยล์
T_M	ความหนาของแผ่นเมมเบรน
W_c	ความกว้างของคอยล์
x	ระยะกระดก

อักษรย่อ

MEMS	Micro Electromechanical Systems
PDMS	Polydimethylsiloxane

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือที่เรียกว่า MEMS (Micro Electromechanical Systems) หมายถึงระบบขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรที่รวมโครงสร้างทางกลและทางไฟฟ้าเข้าด้วยกันเพื่อนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัด (sensor) หรือ อุปกรณ์กระตุ้น (actuator) ในงานสาขาต่างๆ โดยอุปกรณ์เหล่านี้ผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีระดับไมโครสเกลที่เรียกว่า Micro Fabrication ซึ่งในช่วงสิบปีที่ผ่านมา ระบบหรืออุปกรณ์รูปแบบนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยสาขาต่างๆ เพิ่มขึ้น ข้อดีของอุปกรณ์ในรูปแบบนี้คือ มี Sensitivity สูงขึ้น ช่วยลดพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการนำไปใช้งาน อีกทั้งอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กนั้นจะใช้วัสดุที่น้อยลงทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ใช้ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคที่เห็นได้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น เซนเซอร์วัดความเร่งขนาดเล็ก (Micro accelerometer sensor) ในหน้าจอสัมผัสของสมาร์ทโฟนมือถือ โดยใช้การวัดประจุที่เปลี่ยนไปของนิ้วมือที่สัมผัสเพื่อระบุตำแหน่งบนหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 1.1ก เซนเซอร์วัดความเร่งขนาดเล็กเพื่อสั่งการทำงานของถุงลมนิรภัยในรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1ข อุปกรณ์การตรวจสอบการเคลื่อนที่และการหมุนของวัตถุ (MEMS gyroscope) ในเครื่องเล่นเฮลิคอปเตอร์ เครื่องเล่นเกม หรือโทรศัพท์มือถือ ดังแสดงในรูปที่ 1.1ค อารยจักรวาลขนาดจิ๋วสำหรับในงานเทคโนโลยีสื่อสารทางแสง ดังแสดงในรูปที่ 1.1ง อุปกรณ์วัดความดันเลือดขนาดเล็ก (Micro blood pressure sensor) ที่ใช้ในวงการแพทย์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1จ เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้จะสนใจศึกษาส่วนของอุปกรณ์กระตุ้นขนาดเล็กในงานทางด้านวิศวกรรมหรือที่เรียกว่า ไมโครแอกชูเอเตอร์ แอคชูเอเตอร์ในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์รูปแบบหนึ่งเมื่อใส่พลังงานเข้าไปจะทำงานได้ตามที่ต้องการ เช่น การกระตุ้นและควบคุมระบบ วัตถุหรือสารให้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยได้มีการนำไมโครแอกชูเอเตอร์นี้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางด้านวิศวกรรม เช่น ปั๊มขนาดเล็ก (micro pump) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic) เพื่อใช้ในการขับของเหลวจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ตัวอย่างงานวิจัย เช่น Yin et al. (2007) สร้างไมโครปั๊มโดยใช้ไมโครเมมเบรนแอคชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในคอยล์โลหะที่ติดอยู่บนแผ่น PDMS เมมเบรน (รูป

ที่ 1.2ก) จะเกิดแรงของสนามแม่เหล็กดันให้แผ่นไดอะแฟรมโค้งลง ส่งผลให้สารละลายที่อยู่ภายในไหลไปทางด้านขวามือ ดังรูปที่ 1.2ข ในรูปที่ 1.2ค แสดงภาพถ่ายของไมโครปั๊มตัวนี้โดยงานวิจัยอื่นที่นำไมโครแอกชูเอเตอร์มาใช้เป็นไมโครปั๊มมีดังนี้ Yokoyama et al. (2004), Luo and Xia (2005), Jeong and Konishi (2007), Yoon et al. (2007), Al-Halhouli et al. (2010)

อีกตัวอย่างหนึ่งที่เป็นที่สนใจกันอย่างแพร่หลายคือการนำไมโครแอกชูเอเตอร์มาใช้ในการสร้างซินเทติกส์เจ็ตซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยไดอะแฟรม (เมมเบรนแอกชูเอเตอร์) ในช่องปิด โดยด้านบนช่องปิดมีรูออริฟิสขนาดเล็กเจาะอยู่ เมื่อไดอะแฟรมขยับขึ้นลงจะสามารถสร้างเจ็ตการไหลที่ปากรูออริฟิสได้ โดยมีอัตราการไหลของมวลสุทธิเท่ากับศูนย์ ในขณะที่อัตราการไหลของโมเมนตัมสุทธิไม่เท่ากับศูนย์ (Zero net mass flux and Non-zero net momentum flux) ดังรูปที่ 1.3ก ซึ่งอุปกรณ์ในรูปแบบนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานประเภทการควบคุมการไหล (Flow control) Liu et al. (2006) ได้นำอุปกรณ์ที่ใช้สร้างซินเทติกส์เจ็ตไปติดบนปีกเครื่องบินขนาดเล็ก (รูปที่ 1.3ข) เพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงการไหลของอากาศที่ผ่านปีกเครื่องบินเพื่อลดแรงเสียดทาน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยอื่นๆที่นำไมโครแอกชูเอเตอร์มาประยุกต์ใช้งานในการสร้างซินเทติกส์เจ็ตมีดังนี้ Lee et al. (2003), Liu et al. (2004), Hong (2006)

จากตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ได้กล่าวข้างต้นและการศึกษาพบว่า รูปแบบหนึ่งของแอกชูเอเตอร์ที่ได้รับความนิยมมากคือ แอกชูเอเตอร์ที่มีรูปร่างเป็นไดอะแฟรมหรือที่เรียกว่า เมมเบรนแอกชูเอเตอร์ โดยมีหลักการหลายแบบถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้ไมโครเมมเบรนแอกชูเอเตอร์ทำงานได้ ยกตัวอย่างเช่น หลักการ Piezoelectric, Electrostatic, Thermopneumatic, Shape memory alloy และ หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic actuation) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของงานวิจัยที่อาศัยหลักการต่างๆ มีดังนี้ Doll et al. (2007) ได้สร้างเมมเบรนแอกชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการ Piezoelectric เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นไมโครวาล์วซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์ปั๊มขนาดเล็ก โดยแอกชูเอเตอร์ตัวนี้ทำงานโดย อาศัยการป้อนความต่างศักย์เข้าที่วัสดุที่เป็น piezo ในรูปที่ 1.4 ด้วยคุณสมบัติของวัสดุ piezo เมื่อมีความต่างศักย์ตกคร่อมจะทำให้เกิดแรงขึ้นบนโครงสร้างของตัววัสดุทำให้เมมเบรนขยับได้ เมื่อเมมเบรนขยับมาปิดตรงตำแหน่ง valve lip จะเป็นลักษณะของการปิดวาล์ว สำหรับ Zengerle et al. (1995) ได้สร้างเมมเบรนแอกชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการ Electrostatic โดยนำมาประยุกต์ใช้เป็นไมโครปั๊ม ซึ่งในการศึกษาพบว่า หลักการ Piezoelectric และ Electrostatic นั้นจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงเพื่อทำให้ได้ระยะเคลื่อนที่

(deflection) ที่สูง นอกจากนั้น Jeong and Yang (2000) ได้สร้างไมโครปั๊มที่ใช้หลักการของ Thermopneumatic ดังรูปที่ 1.5 ปั๊มนี้อาจทำงานได้โดยการให้ความร้อนแก่อากาศที่อยู่ในช่องปิด (Cavity) อากาศภายในจะขยายตัวทำให้แผ่นไดอะแฟรมขยับออกด้านของเหลวออกมาจากตัวปั๊ม และเมื่อทำให้อากาศเย็นตัวลงไดอะแฟรมนี้ก็จะหดตัวเป็นการดูดของเหลวเข้ามาในปั๊ม Makino et al. (2001) ได้สร้างไมโครปั๊มที่ใช้หลักการของ Shape memory alloy คือการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิมาใช้เป็นไดอะแฟรม ในงานนี้ใช้ Titanium Nickelide (TiNi) โดยสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 แบบได้แก่ Pressurization คือการเพิ่มความดันเข้าไปใน glass cap ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 1.6ก) แผ่นไดอะแฟรมก็จะขยายตัวด้านของเหลวออก หลังจากนั้นให้ความร้อนแผ่นไดอะแฟรมจะคืนรูปดั้งเดิม ทำให้ของเหลวถูกดูดเข้ามาในช่องปิด และแบบ Evacuation จะมีลักษณะคล้ายแบบแรกแต่ต่างกันตรงที่แบบนี้จะทำการลดความดันใน glass cap (รูปที่ 1.6ข) เพื่อให้แผ่นไดอะแฟรมขยายตัวเข้ามาฝั่งด้านใน ทำให้ของเหลวถูกดูดเข้ามาแทน หลักการของทั้ง Thermopneumatic และ Shape memory alloy จะมีเวลาในการตอบสนอง (frequency response) ค่อนข้างช้าอีกทั้งยังเกิดความร้อนขึ้นด้วย

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมา หลักการต่างๆจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่มีข้อเสียสองประการคือ ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงและต้องอาศัยความร้อนในการทำงานของแอคชูเอเตอร์ การศึกษาวิจัยจึงมุ่งความสนใจไปที่เมมเบรนแอคชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถให้ความถี่ตอบสนองที่สูงได้ หากมีการออกแบบเมมเบรนที่เหมาะสมจะทำให้การตอบสนองเร็ว ให้ระยะกระดกสูง ใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ และมีความร้อนเกิดขึ้นน้อย Jeong et al. (2000) ได้สร้างแอคชูเอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อจ่ายกระแส 0.38 แอมแปร์ จะทำให้เกิดระยะกระดกสูงถึง 143 ไมครอน เช่นเดียวกับ Kim et al. (2005) ได้สร้างแอคชูเอเตอร์ขนาด 4.5x4.5 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งขับเคลื่อนด้วยไดอะแฟรมโดยใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแอคชูเอเตอร์ที่สร้างขึ้นทั้งทางด้าน Static และ Dynamic response เปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนที่เป็นแผ่นเรียบกับเมมเบรนที่มีโครงสร้างหยัก พบว่าเมื่อป้อนความดัน 500 ปาสคาล บนแผ่นเมมเบรนทั้งสองแบบ ระยะกระดกของแผ่นเมมเบรนแผ่นเรียบและเมมเบรนที่มีโครงสร้างหยักเท่ากับ 15 และ 37 ไมครอนเมตร ตามลำดับ และเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แอคชูเอเตอร์ 0.1 แอมแปร์ ความถี่ 1 เฮิรท์ ระยะกระดกของแผ่นเมมเบรนของแผ่นเรียบและเมมเบรนที่มี

โครงสร้างหยักเท่ากับ 20 และ 30 ไมโครเมตร ตามลำดับ อีกหนึ่งงานวิจัยคือ Yin et al. (2007) ได้สร้างไมโครเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในงานไมโครปั๊ม พบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้า 500 มิลลิแอมแปร์ และจำนวนรอบของคอยล์ทองแดงเท่ากับ 12 รอบ จะให้ระยะกระดกสูงสุดเท่ากับ 55 ไมโครเมตร หรือเทียบเท่ากับปริมาตร 2 ไมโครลิตรเมื่อใช้งานเป็นปั๊ม

เมมเบรนแอคซิวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนของแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ติดอยู่และส่วนของแม่เหล็กถาวร โดยการทำงานของเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้าอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่ขดลวดโลหะที่ติดอยู่บนแผ่นไดอะแฟรมแล้วจะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมีปฏิกริยากับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงผลักหรือดูดทำให้ไดอะแฟรมขยับขึ้นลงได้ ดังรูปที่ 1.7 โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (F) ที่จะทำให้ไดอะแฟรมขยับได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก 3 ตัว คือ กระแสไฟฟ้าที่ใส่ให้ขดลวดของแอคซิวเอเตอร์ (I), รัศมีของขดลวดโลหะ (r) และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับขดลวด (B_t) มีความสัมพันธ์ตามสมการ $F = I \times 2\pi r \times B_t$ สำหรับในรายละเอียดการหาขนาดของแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก

ส่วนประกอบที่สำคัญของเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลทำให้แอคซิวเอเตอร์นี้มีสมรรถนะสูง คือ ความหนาแผ่นเมมเบรน วัสดุของแผ่นเมมเบรนและคอยล์ ความกว้างของคอยล์ ความหนาของคอยล์ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการสร้างในส่วนของแผ่นเมมเบรนฝ้งไมโครคอยล์ เพื่อสามารถออกแบบพารามิเตอร์ของแอคซิวเอเตอร์ให้มีสมรรถนะได้ตามที่ต้องการ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝ้งไมโครคอยล์

ที่ผ่านมา Kim et al. (2005) ได้ทำการศึกษาและสร้างไมโครเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการสร้างถูกแสดงด้วยรูปที่ 1.8 เริ่มจากการนำแผ่นซิลิกอนเพื่อใช้เป็นฐาน มากัดให้เป็นลักษณะของโครงสร้างที่มีรูปร่างหยัก (Corrugation) แล้วจึงปลูก Parylene ซึ่งใช้เป็นแผ่นเมมเบรน ตามด้วยการปลูกชั้นของ Cr/Au หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการ Photolithography สร้างลายของคอยล์โลหะ แล้วปลูกชั้นของทองแดงโดยวิธีการ Electroplating

เพื่อใช้เป็นส่วนของคอยล์ ในตอนหลังจึงกัด Cr/Au ออกแล้วเคลือบฟิล์ม Parylene ทับอีกครึ่ง ชั้นตอนสุดท้ายจึงกัดแผ่นซิลิกอนจากด้านหลัง (backside etching) ทำให้ได้แผ่นเมมเบรนที่ คอยล์ทองแดงฝังอยู่ภายใน โดยที่แผ่นเมมเบรนที่ใช้มีขนาด 4.5x4.5 ตารางมิลลิเมตร

สำหรับ Yin et al. (2007) ได้ทำการศึกษาหากระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอคซิวเอ เตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในงานไมโครปั๊ม โดยกระบวนการสร้างที่ถูกนำเสนอถูก อธิบายด้วยรูปที่ 1.9 เริ่มจากการนำแผ่นซิลิกอนมาทำการกัดให้เกิดเป็นลักษณะเป็นหลุมลงไป หลังจากนั้นจึงปลูกชั้นฟิล์มของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพื่อจะเป็นการป้องกันไม่ให้ด้านหลัง แผ่นเมมเบรนถูกทำลายจากการกัดแบบแห้ง (Dry etching) ในขั้นตอนต่อไปจึงปลูกฟิล์มของ โลหะและใช้วิธีการ Photolithography เพื่อสร้างลายของคอยล์โลหะ แล้วทำการปลูกชั้นของ ทองแดงลงบนลายที่สร้างด้วยวิธีการ Electroforming หลังการล้างวัสดุที่ใช้ทำแบบแล้วจึงเท PDMS ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้เป็นเมมเบรนทับบนคอยล์ทองแดง สุดท้ายจึงใช้วิธีการกัดแบบแห้ง ในการ กัดซิลิกอนที่ใช้เป็นฐานออกจากทางด้านหลัง (backside etching) ซึ่งการกัดจะหยุดทันทีที่ถึงชั้น ของซิลิกอนไดออกไซด์

นอกจากนั้น Wang et al. (2007) ได้ทำการนำเสนอกระบวนการสร้างอุปกรณ์สร้าง พลังงานขนาดเล็ก (micro power generator) ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.10 สำหรับรายละเอียดของกระบวนการสร้างถูกอธิบายด้วยรูปที่ 1.11 โดยเริ่มจาก การเคลือบแผ่นโฟ ได้รีซิสบนฐานซิลิกอนแล้วใช้เทคนิค Photolithography ในการสร้างลายบนฐานซิลิกอน ปลูกชั้น ฟิล์มของซิลิกอนไดออกไซด์และ Cr/Cu เพื่อใช้เป็นส่วนในการเชื่อมสายไฟ หลังจากนั้นจึงทำใช้ เทคนิค Photolithography เพื่อสร้างลายแล้วทำการ Electroplating ทองแดงบนลายนั้น ใน ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการกัดซิลิกอนจากด้านหลังด้วยวิธีการที่เรียกว่า Wet etching โดยงานวิจัยที่ มีลักษณะกระบวนการสร้างคล้ายกับงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นคือ ใช้การกัดซิลิกอนออกจากทาง ด้านล่างในขั้นตอนสุดท้าย เช่น Jeong et al. (2000), Kulkarni et al. (2008), Sari et al. (2008)

จากการศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้น กระบวนการสร้างเมมเบรนแอคซิวเอเตอรืในส่วน ของแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ฝังอยู่จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ การเทวัสดุที่ใช้เป็นเมมเบรนไว้บน แผ่นซิลิกอน เมื่อสร้างโครงสร้างด้านบนเสร็จแล้วจึงกัดซิลิกอนจากด้านหลังด้วยสารเคมีหรือ วิธีการทางเคมีอื่นๆ วิธีการนี้มีขั้นตอนการสร้างที่ละเอียดซับซ้อนเพื่อป้องกันความเสียหายของ

โครงสร้างอื่นๆ อีกทั้งจำเป็นที่จะต้องมีการลงทุนสูง เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง จากกระบวนการสร้างดังกล่าว การที่ตัวเมมเบรนถูกยึดติดอยู่กับฐานซิลิกอนที่มีลักษณะเรียบแข็ง จึงเป็นข้อจำกัดในการติดตั้งแอคชัวเอเตอร์ หากพื้นผิวที่ต้องการติดตั้งมีลักษณะเป็นพื้นผิวโค้ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่ที่ง่ายต่อการสร้าง มีรายละเอียดในขั้นตอนการสร้างที่ไม่ซับซ้อน โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการที่ต้องกัดโครงสร้างจากด้านหลังซึ่งจะทำให้มีต้นทุนต่ำด้วย นอกจากนี้ยังสามารถนำเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้ไปประยุกต์ใช้ติดบนพื้นผิวที่มีความโค้ง (curved surface) ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีฐานแข็งแรง (Supportless membrane) หลังจากนั้นจึงนำเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังภายในที่ได้พัฒนาขึ้นมาไปสาธิตการใช้งานเป็นเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อพัฒนากระบวนการสร้างแบบใหม่สำหรับแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่ภายใน
- เพื่อทดสอบสมรรถนะของแผ่นเมมเบรนที่ได้สร้างขึ้นโดยการใช้งานเป็นแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 พัฒนาการกระบวนการสร้างที่ทำให้คอยล์ของโลหะฝังอยู่ในแผ่นเมมเบรน

- ศึกษาหาแนวคิดในการพัฒนากระบวนการสร้าง
- ศึกษาหาพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการสร้าง

1.4.2 สร้างเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์และการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้น

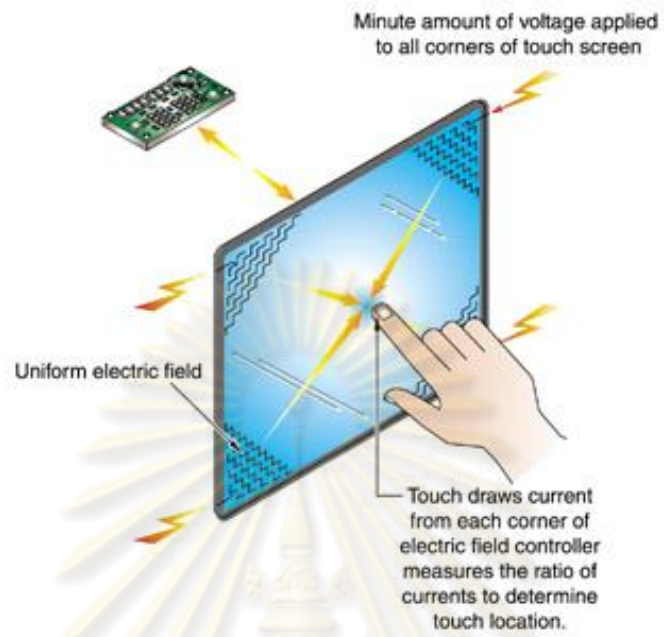
- เลือกพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์แล้วสร้างตามกระบวนการสร้างที่น่าเสนอ
- นำแผ่นเมมเบรนมาประกอบเป็นเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์และทดสอบสมรรถนะทั้ง Static และ Dynamic response ของแอคชัวเอเตอร์ที่สร้างขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการวางรากฐานการพัฒนากระบวนการสร้างเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าในอีกรูปแบบหนึ่งที่ยืดหยุ่น ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับฐานที่มีลักษณะโค้งได้ โดยผู้ที่สนใจสามารถนำความรู้หรือวิธีการที่ได้ไปประยุกต์ใช้สร้างแอกซ์เวเตอร์ ในงานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของซินเทติกส์เจ็ดหรือไมโครบีมีในระบบของไหลจุลภาค เป็นต้น



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



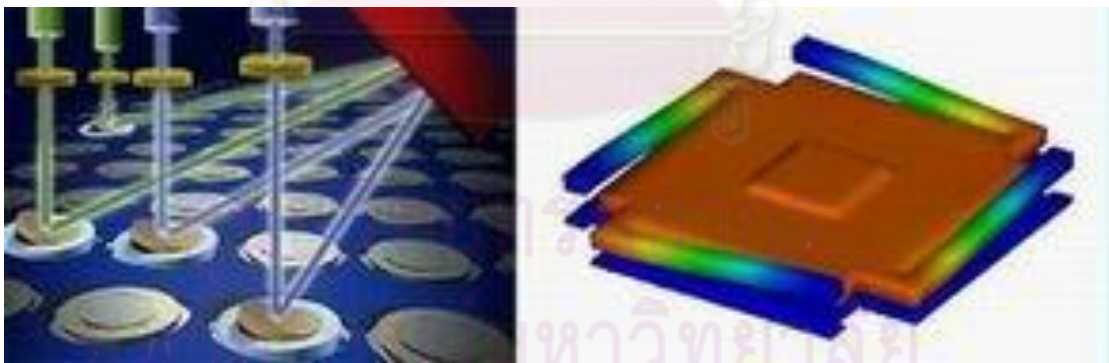
(ก)



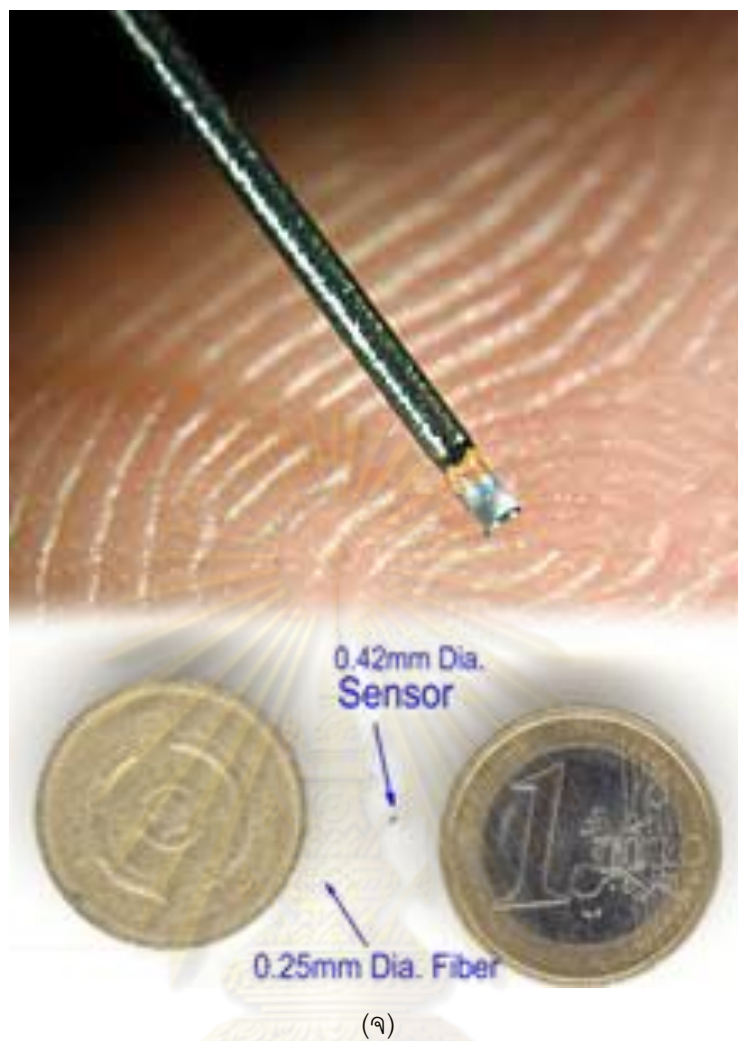
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค

(ก) เซนเซอร์วัดความเร่งในหน้าจอรระบบสัมผัส

(<http://www.cdummond.qc.ca/cegep/informat/Professeurs/diane/Cours/420-UC1/420-UC1.html>)

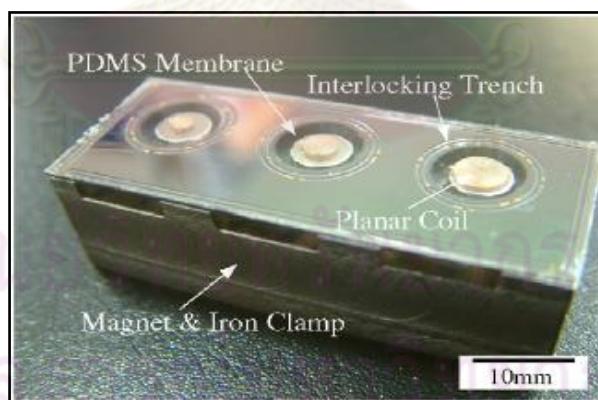
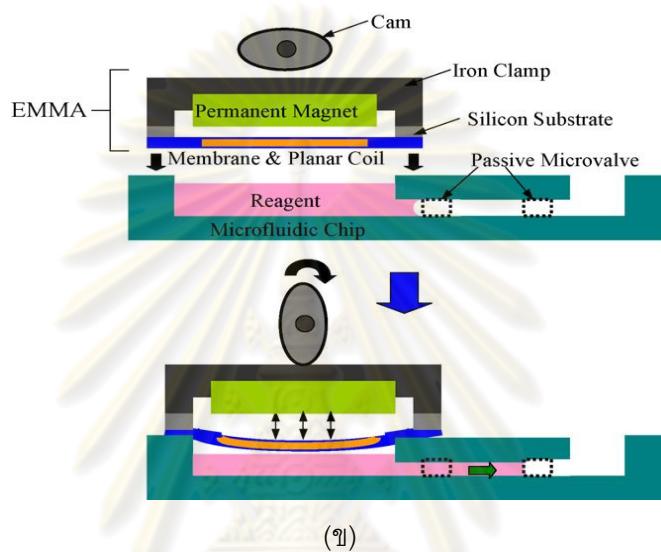
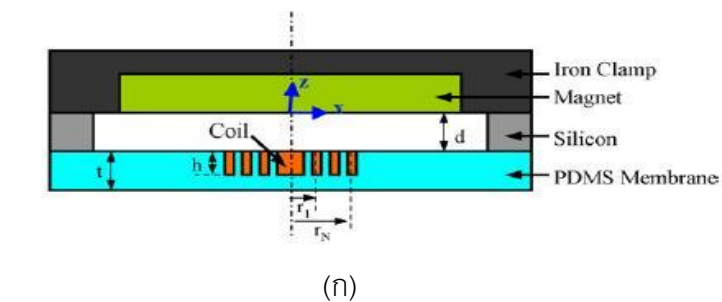
(ข) เซนเซอร์วัดความเร่งของถุงลมนิรภัย (<http://www.452-engines.com>)

(ค) อุปกรณ์การตรวจสอบการหมุน (<http://embeddedsystemnews.com>)

(ง) อาร์เรย์กระจกขนาดจิ๋วสำหรับในงานเทคโนโลยีสื่อสารทางแสง

(<http://www.nectec.or.th/rd/electronics/be314-45/be314-45.php>)

(จ) เซนเซอร์วัดความดันเลือดขนาดเล็ก (<http://www.bioseb.com>)

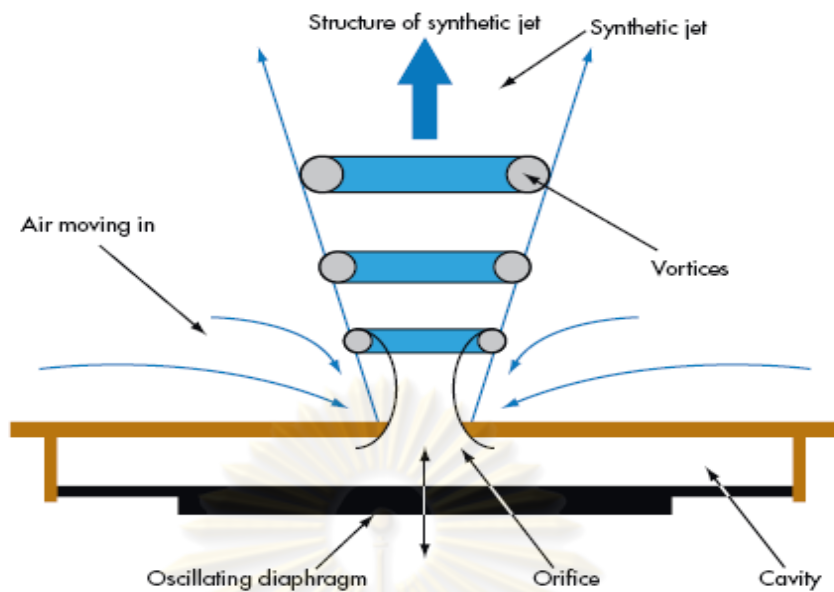


รูปที่ 1.2 เมมเบรนแอกชูเอเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นปั๊ม (Yin et al., 2007)

(ก) ไดอะแกรมแสดงโครงสร้าง

(ข) ไดอะแกรมแสดงการทำงาน

(ค) ภาพถ่ายจริง

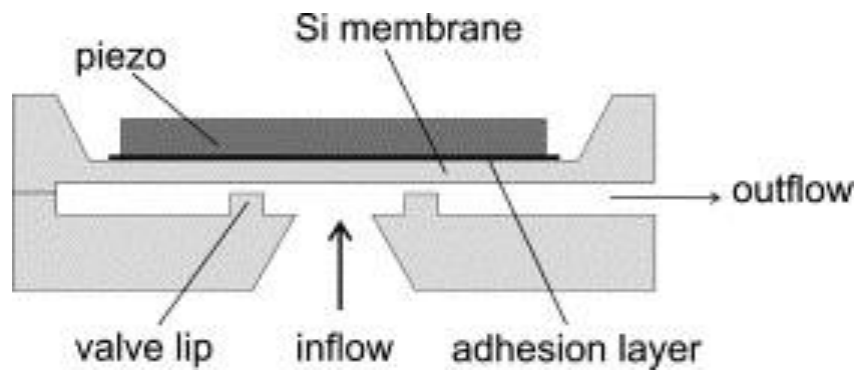


(ก)

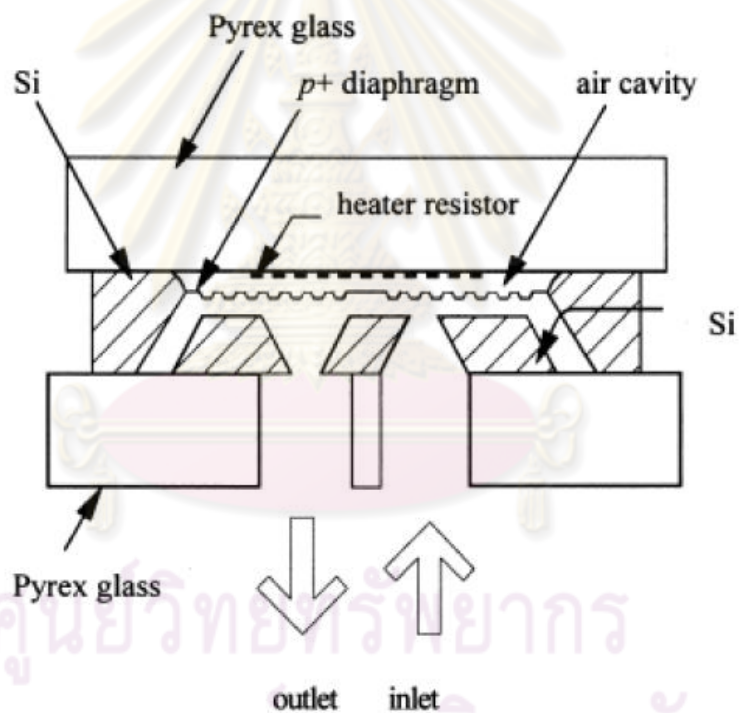


(ข)

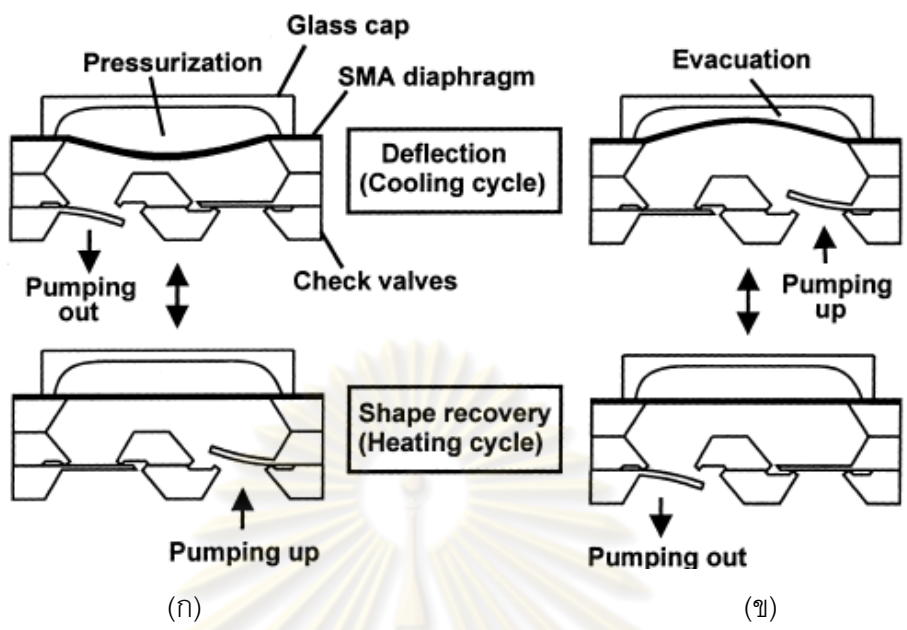
รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้เมมเบรนแอคชูเอเตอร์ในรูปแบบซินเทติกส์เจ็ต
 (ก) ไดอะแกรมแสดงลักษณะโครงสร้างซินเทติกส์เจ็ต
 (ข) แบบจำลองเครื่องบินที่มีซินเทติกส์เจ็ตติดที่ปีก (Liu et al., 2006)



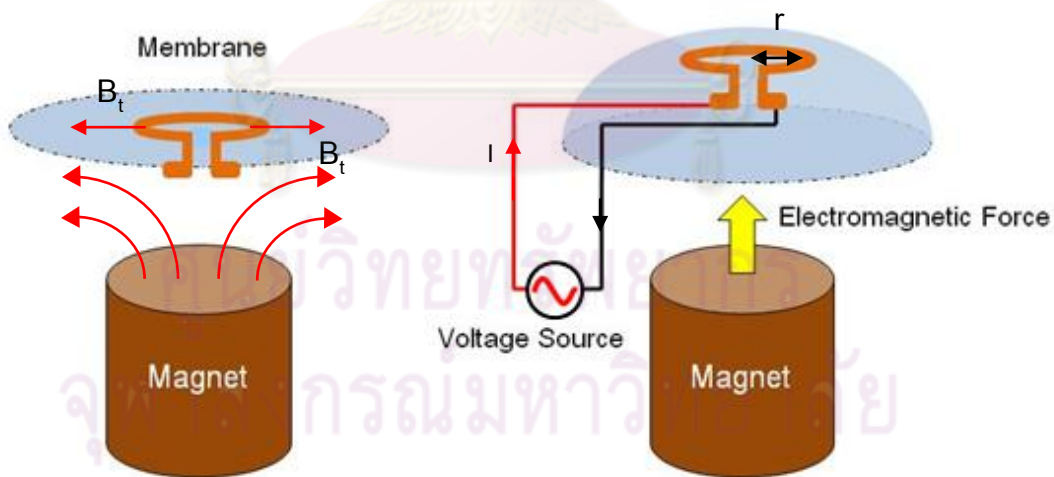
รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของ piezoelectric microvalve (Doll et al., 2007)



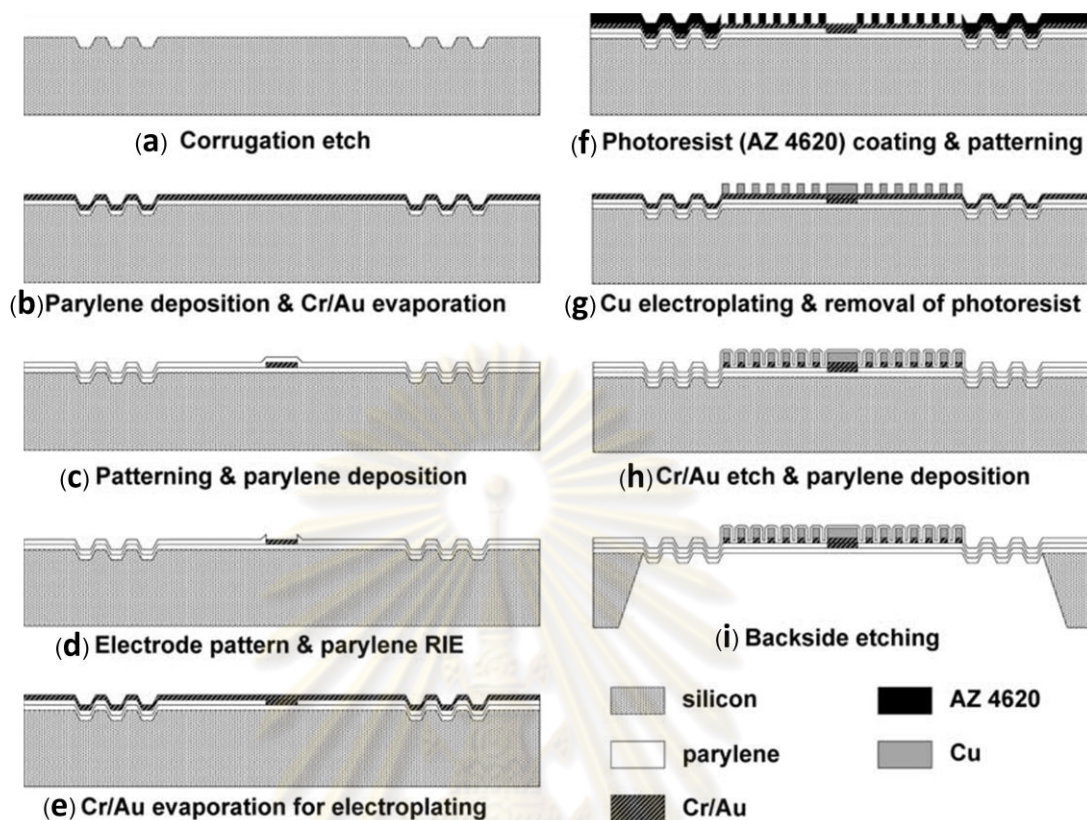
รูปที่ 1.5 ไดอะแกรมลักษณะการทำงานและส่วนประกอบของ Thermopneumatic micropump (Jeong and Yang, 2000)



รูปที่ 1.6 ไดอะแกรมลักษณะการทำงานและส่วนประกอบของ TiNi shape memory micropump (Makino et al., 2001)

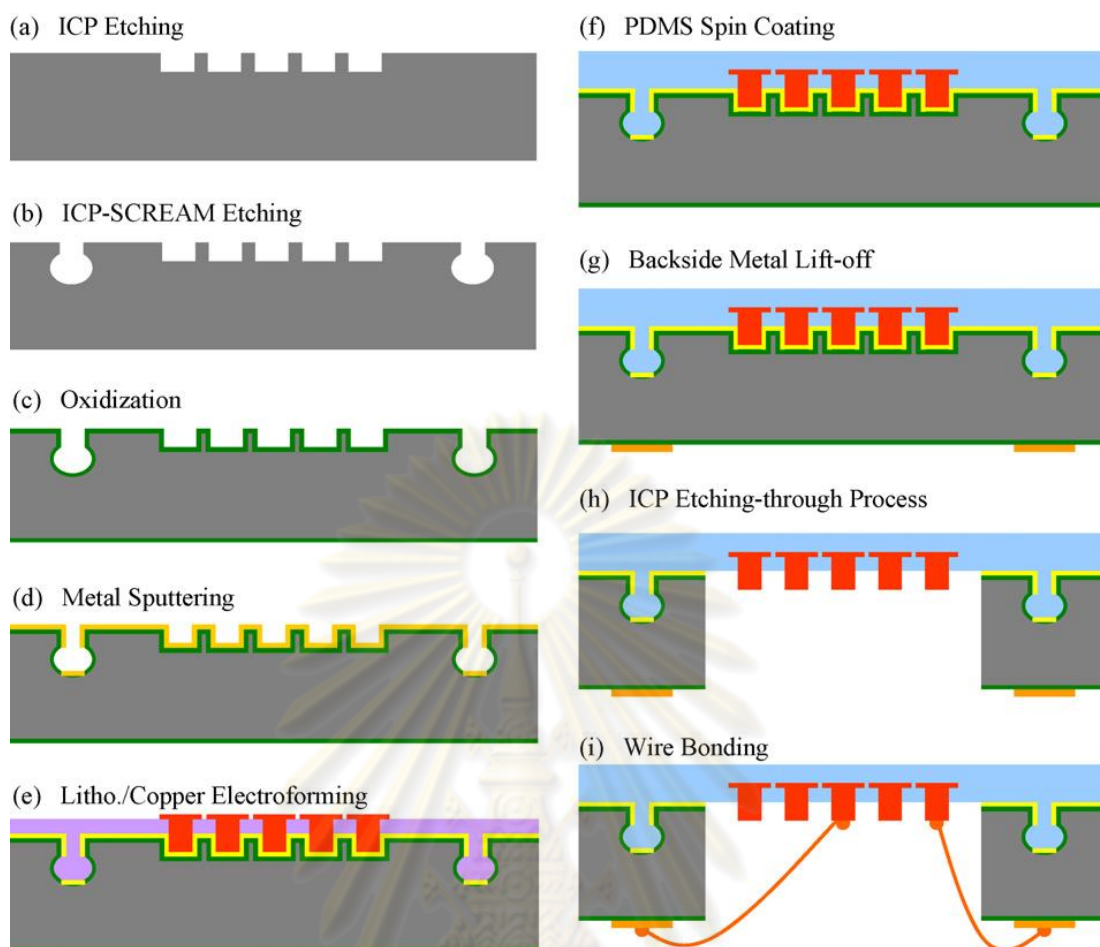


รูปที่ 1.7 ไดอะแกรมแสดงหลักการของเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า



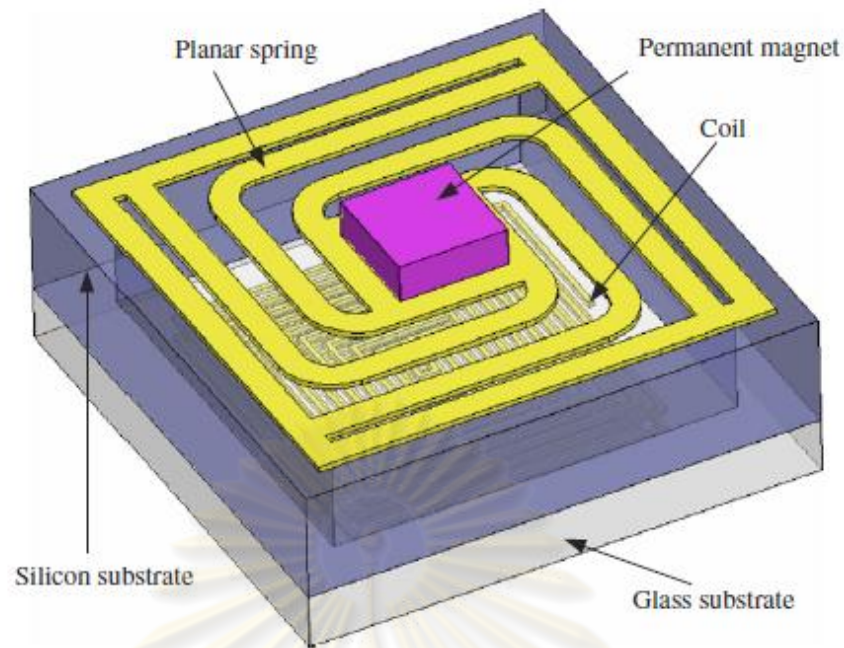
รูปที่ 1.8 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Kim et al., 2005)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

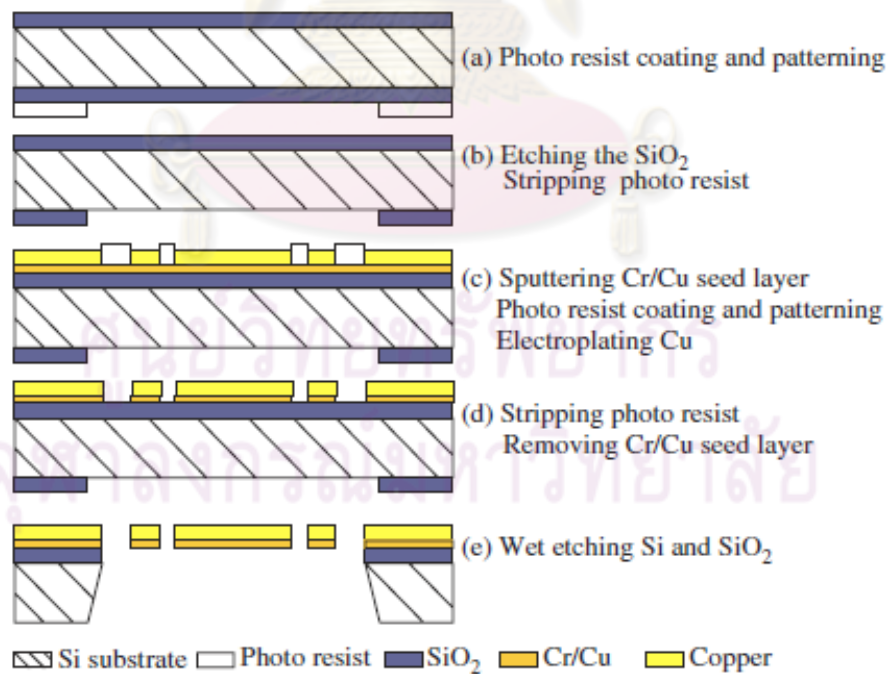


รูปที่ 1.9 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอดซิวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Yin et al., 2007)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.10 อุปกรณ์จ่ายพลังงานขนาดเล็กที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Wang et al., 2007)



รูปที่ 1.11 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างอุปกรณ์จ่ายพลังงานขนาดเล็กที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Wang et al., 2007)

บทที่ 2

การพัฒนากระบวนการสร้าง

2.1 แนวคิดของกระบวนการสร้างแบบใหม่

แผ่นเมมเบรนฝั้งไมโครคอยล์ถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักของไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปที่การพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝั้งไมโครคอยล์โดยหลีกเลี่ยงการกัดฐานจากด้านหลัง เนื่องจากการกัดจากด้านหลังต้องใช้เครื่องมือเฉพาะ มีความซับซ้อนในการสร้าง และมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังทำให้มีฐานซิลิกอนของวัสดุเรียบแข็งติดอยู่กับแผ่นเมมเบรน ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปติดตั้งบนพื้นผิวโค้งได้ โดยเป้าหมายของการพัฒนากระบวนการสร้างคือ ต้องสร้างคอยล์ของโลหะอยู่ภายในแผ่นเมมเบรนโดยไม่มีฐานของวัสดุแข็งรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยคอยล์เป็นวัสดุทองแดง และแผ่นเมมเบรนเป็นวัสดุ Polydimethylsiloxane (PDMS) จากไดอะแกรมแสดงภาพตัดขวางของแผ่นเมมเบรนที่ต้องการโดยให้มีคอยล์ของโลหะฝั้งอยู่ภายใน โดยลักษณะของโครงสร้างแบบนี้จะทำให้ใช้งานบนพื้นผิวโค้งได้ดีในลักษณะเดียวกับการติดกระดาษกาได้

จากวัตถุประสงค์ดังกล่าว จึงเกิดแนวคิดว่าจะใช้วิธีการนำแผ่นเมมเบรน 2 แผ่นมาประกบคอยล์โลหะที่สร้างไว้ในขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อสร้างเป็นแผ่นเมมเบรนฝั้งไมโครคอยล์ ดังนั้นจึงแบ่งการพัฒนากระบวนการสร้างออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ กระบวนการสร้างคอยล์โลหะ และกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์โลหะ ในขั้นตอนแรกจะเป็นการสร้างเฉพาะส่วนของคอยล์โลหะให้มีรูปร่างตามที่ต้องการแบบขั้นมา ในขั้นตอนที่สองจะนำคอยล์โลหะที่ได้แล้วมาวางบนแผ่นเมมเบรนที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนที่สอง แล้วจึงนำแผ่นเมมเบรนอีกแผ่นมาปิดทับด้านบน ทำให้ได้แผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ของโลหะฝั้งอยู่ภายในได้

2.2 กระบวนการสร้างคอยล์โลหะ

เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้ต้องการพัฒนากระบวนการสร้างคอยล์ของโลหะที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ดังนั้นความแม่นยำในการสร้างถือเป็นสิ่งสำคัญ การสร้างคอยล์ในขั้นตอนนี้จึงเลือกใช้วิธีการปลูกโลหะขึ้นมาในแบบหล่อ (mold) ที่สร้างไว้ ดังนั้นในการสร้างคอยล์โลหะจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ ขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ ซึ่งใช้เทคนิค

Photolithography และขั้นตอนการปลูกโลหะขึ้นบนแบบหล่อ ซึ่งใช้เทคนิค Electroplating เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนดังกล่าว ก็จะทำให้ได้คอยล์ของโลหะที่มีลักษณะรูปร่างตามแบบที่ออกแบบมา รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของคอยล์ทองแดงที่เป็นเป้าหมายของการสร้าง ซึ่งมีลักษณะเป็นคอยล์ทองแดงวงกลมรอบเดียว มีขนาดความกว้างของคอยล์ 500 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความหนาเท่ากับ 40 ไมโครเมตร โดยขั้นตอนของการสร้างมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การสร้างแบบหล่อ

การสร้างแบบหล่อเพื่อให้ได้รูปร่างของคอยล์ตามที่ออกแบบและมีความคลาดเคลื่อนของขนาดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ มีแนวคิดในการสร้างคือ การใช้เทคนิคที่เรียกว่า Photolithography ซึ่งเป็นเทคนิคการเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นโฟโตเรซิสต์ (Photoresist) โดยการฉายแสง เพื่อให้สามารถสร้างแบบที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรได้ โดยรายละเอียดของขั้นตอนนี้เริ่มจาก (พิจารณารูปที่ 2.3 ประกอบ) การเคลือบแผ่นสแตนเลสที่ใช้เป็นฐานด้วยฟิล์ม Negative photoresist ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องรีดฟิล์มไวแสง (รายละเอียดการใช้งานแสดงในภาคผนวก ข) เพื่อให้ฟิล์มโฟโตเรซิสต์ติดแน่นกับแผ่นสแตนเลส แล้วนำแผ่นแบบ (mask) ซึ่งมีรูปร่างของคอยล์ที่ต้องการสร้างอยู่ (แผ่นแบบนี้สามารถเปลี่ยนรูปร่างของคอยล์ได้ตามต้องการ โดยในงานวิจัยใช้วาดคอยล์ด้วยโปรแกรม Solid Work และพิมพ์ด้วยเลเซอร์ปริ้นเตอร์บนแผ่นใส) มาวางไว้ด้านบน หลังจากนั้นก็ฉายแสง UV ด้วยกล่องฉาย UV ซึ่งสร้างขึ้นเองซึ่งประกอบด้วยหลอด UV ขนาด 10 วัตต์ จำนวน 4 หลอด และสามารถเลือกระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับต้นกำเนิดแสงได้ เมื่อมีแสงมากระทบ ส่วนที่กระทบกับแสงของโฟโตเรซิสต์จะเปลี่ยนคุณสมบัติไปทำให้ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย (Developer : Na_2CO_3) ในทางตรงกันข้ามส่วนที่ไม่กระทบแสงซึ่งมีหมึกพิมพ์กันแสงไว้จะสามารถล้างออกได้ด้วยตัวทำละลาย เพราะฉะนั้นฟิล์ม Negative Photoresist ที่ถูกปิดด้วยพื้นที่สีดำในรูปที่ 2.4 จะถูกล้างออกภายหลังการฉายแสง ทำให้เกิดเป็นรูปร่างของคอยล์ตามแผ่นแบบ ขั้นตอนสุดท้ายจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ภายในชิ้นงานออก

ในรูปที่ 2.4 แสดงลักษณะรูปร่างของคอยล์ในการทดลองนี้ซึ่งเป็นคอยล์ที่มีความกว้างเท่ากับ 500 ไมโครเมตร รัศมีวงในเท่ากับ 1 มิลลิเมตร มีบริเวณสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสองข้างซึ่งจะใช้

เป็นบริเวณที่จะเชื่อมสายไฟเพื่อจ่ายกระแสเข้าและออก โดยเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามขนาดของพื้นที่เริ่มจาก 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20 และ 32 ตารางมิลลิเมตร

สำหรับพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของแบบ มีทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ (1) คุณหมุ่ในการเคลือบ Photoresist ให้ติดกับแผ่นสแตนเลสซึ่งในการทดลองกำหนดอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส, (2) เวลาที่ใช้ในการฉายแสงกำหนดอยู่ที่ 20 วินาที, (3) ความเข้มข้นของตัวทำละลายในที่นี่คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วน 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิตร (4) ระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิสและ (5) ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงาน โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ตัวที่ 4 และ 5 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1.1 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิส

ในการทดลองเบื้องต้นพบว่า หากนำแผ่นแบบมาวางบนฟิล์มโฟโตรีซิส โดยไม่มีการกดให้แนบติดกัน ขนาดของแบบหล่อที่เกิดขึ้นจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าในกรณีที่เกิดให้แผ่นแบบติดกับฟิล์มโฟโตรีซิส จึงคาดว่าระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิสเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของแบบหล่อ แต่ด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์การวัดที่มีอยู่จึงไม่สามารถที่จะวัดระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิสได้ ในการศึกษานี้จึงใช้แรงในการกดทับบนแผ่นแบบอ้างอิงแทนระยะห่าง โดยถ้าหากแรงกดทับมาก ระยะห่างก็จะน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าหากแรงกดทับมีน้อยหรือไม่มี ระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิสก็จะมามาก

ในการทดลองเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กดทับกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยการใช้น้ำหนักกดทับลงบนแผ่นแบบทั้งหมด 4 กรณี เริ่มที่ 0, 9, 36 นิวตัน โดยคิดเป็นค่าความดันกดทับได้ 0, 0.9, 3.6 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และในกรณีสุดท้ายนำแผ่นแบบที่ติดกับฟิล์มโฟโตรีซิสเข้าเครื่องรีด (คาดว่าในกรณีนี้จะเกิดแรงที่กดทับมากที่สุด ทำให้ระยะห่างน้อยที่สุด อ้างอิงด้วยสัญลักษณ์ 10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆในการทดลองคือ ต้นกำเนิดแสงอยู่เหนือชิ้นงานพอดีและระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานคงที่ที่ 3.25 เซนติเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นลบหมายถึงลายของแบบเล็กกว่าที่ออกแบบ และหากเป็นบวกหมายถึงลายของแบบใหญ่กว่าที่ออกแบบ ซึ่งพบว่า

ในกรณีที่ไม่มีความดันมากดทับเลย (0 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) ขนาดของแบบที่ออกมาจะคลาดเคลื่อนมากถึง -26.85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับขนาดของแบบที่ออกแบบไว้ แต่ในกรณีที่มีความดันมากดทับ คือ 0.9, 3.6 และ 10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมากที่สุดเพียง 2.43 เปอร์เซ็นต์ โดยแถบความคลาดเคลื่อนที่แสดงในรูปคิดเฉพาะความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากกันวัด (Precision uncertainty) เท่านั้น ซึ่งหาจากการวัดขนาดความกว้างของคอยล์แต่ละชิ้นจากแต่ละพื้นที่ สำหรับความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (Bias uncertainty) มีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตรซึ่งน้อยมากสามารถละทิ้งได้

จากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ในกรณีที่ระยะห่างมาก (รูปที่ 2.6ก) เมื่อฉายแสงแสงจะเล็ดลอดผ่านเข้ามาในส่วนที่มีแผ่นแบบบังอยู่ได้ทำให้ในส่วนนั้นไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย แต่หากระยะห่างน้อยลง (รูปที่ 2.6ข) แสงก็จะผ่านเข้ามาได้น้อยลงเช่นกัน ทำให้ขนาดของแบบมีค่าใกล้เคียงขนาดแบบที่ออกแบบไว้มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้อยู่ภายใต้สภาวะที่ต้นกำเนิดแสงอยู่เหนือชิ้นงานพอดีและระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานคงที่ที่ 3.25 เซนติเมตร กล่าวคือ ตำแหน่งของแสงและชิ้นงานใกล้กันมากขึ้นและทำให้มุมของแสงมากขึ้น (ทิศทางของแสงเข้ามาด้านข้าง) อาจทำให้ผลการทดลองแตกต่างกันไป

การทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า หากไม่มีแรงมากดทับระหว่างแผ่นแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิส จะทำให้ขนาดของแบบเกิดความคลาดเคลื่อนมากถึง -26.84 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่หากกดแรงด้วยความดันที่มากกว่า 0.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ความคลาดเคลื่อนของแบบจะลดลงและเกิดขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

2.2.1.2 การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงาน

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานขณะที่มีการฉายแสง เกิดจากแนวคิดที่ว่าหากระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานน้อย จะทำให้ทิศทางที่แสงจะส่องเข้ามาทำมุมมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของแบบหล่อ ดังแสดงแนวคิดในรูปที่ 2.7 ในทางกลับกันถ้าหากระยะนี้มีค่ามากขึ้น มุมที่แสงส่องลงมากก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้น จึงทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานกับค่าความคลาดเคลื่อน โดยการเปลี่ยนระยะความห่างจาก 0, 1.3, 1.95, 3.25 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.8 พบว่า ความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนของทั้ง 4

กรณีมีค่าน้อยมาก โดยในกรณีนี้ระยะห่างเป็น 3.25 เซนติเมตร คลาดเคลื่อนไปเพียง 1.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับขนาดของแบบที่ออกแบบไว้ จากผลการทดลอง เราจึงสามารถสรุปได้ว่า ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแสงกับชิ้นงานมีผลต่อความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ในเงื่อนไขที่ระยะ ความสูงนี้ไม่เกิน 3.25 เซนติเมตร

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอน Photolithography ได้ดังตารางที่ 2.1 โดยรูปที่ 2.9 แสดงภาพชิ้นงานเมื่อเสร็จสิ้นหลังจากสร้าง แบบลายบนโฟโตรีซิสเพื่อเป็นแบบหล่อแล้ว

2.2.2 การปลูกคอยล์โลหะ

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการปลูกโลหะขึ้นบนแบบหล่อ (รูปที่ 2.9) ที่ได้จากขั้นตอน Photolithography เพื่อให้ได้คอยล์ของโลหะที่มีรูปร่างตามแบบและมีความหนาตามที่ต้องการ โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electroplating) ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบโลหะจาก อิเล็กโทรดหนึ่งลงบนขั้วอิเล็กโทรดอีกฝั่งหนึ่ง ที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้การป้อน กระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดที่เป็นชิ้นโลหะผ่าน สายไฟไปยังขั้วแคโทดที่เป็นชิ้นงานที่ต้องการปลูกโลหะ ทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดวิ่งผ่าน สารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังชิ้นงานที่ขั้วแคโทดได้ โดยไดอะแกรมของชุด Electroplating แสดงดังรูปที่ 2.10 (รายละเอียดการใช้ชุด Electroplating แสดงในภาคผนวก ค) โดยในการ งานวิจัยนี้ใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการทำ Electroplating เนื่องจากเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดรองจาก เงิน ทนทานต่อการถูกร่อน และไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งทองแดงมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2.2 ซึ่งมีค่า Young's modulus เท่ากับ 130 GPa สภาพนำไฟฟ้าประมาณ 60×10^6 ซีเมนส์ต่อ เมตร และค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 24.44 จูลต่อโมลเคลวิน

จุดประสงค์ของขั้นตอนนี้คือ ต้องการที่จะปลูกฟิล์มของคอยล์ทองแดงที่มีความหนาลงบน แบบหล่อ ภายหลังจากขั้นตอนนี้คอยล์ทองแดงจะต้องสามารถหลุดลอกออกมาจากแบบหล่อได้และ ยังคงไว้ซึ่งรูปร่างที่สมบูรณ์ โดยรายละเอียดของขั้นตอนนี้เริ่มจาก การนำชิ้นงานไป Electroplating ให้ได้ความหนาตามที่ต้องการในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) หลังจาก นั้นล้างโฟโตรีซิสออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้ ชิ้นของคอยล์ของทองแดงตามที่ต้องการ ในการทดสอบกระบวนการสร้างได้ศึกษา 2 หัวข้อ คือ

การศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (Current density) ต่ออัตราการปลูกทองแดง (Deposition rate) เพื่อให้สามารถนำผลลัพธ์มากำหนดความหนาของคอลลอยด์ทองแดงได้ และ การศึกษาการลอกออกของคอลลอยด์ทองแดงจากแบบหล่อที่มีฐานเป็นแผ่นสแตนเลส โดยรายละเอียด ของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

2.2.2.1 การศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ต่ออัตราการปลูกฟิล์มทองแดง

ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปต่อพื้นที่ที่ถูก Electroplating มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับอัตราการปลูกฟิล์มทองแดง (Deposition rate) ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนาของโลหะต่อเวลาที่ใช้ในการ Electroplating มีหน่วยเป็นไมโครเมตรต่อชั่วโมง

ในการศึกษานี้ได้ใช้แผ่นแบบที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดพื้นที่ต่าง ๆ กันคือ 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ตารางมิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 คิดเป็นพื้นที่รวมที่จะถูก Electroplating ได้เท่ากับ 31 ตารางเซนติเมตร ในการศึกษาได้เปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด 6 ค่า ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วจึงนำชิ้นทองแดงที่ได้จากการ Electroplating มาวัดหาค่าเฉลี่ยความหนาที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่กับอัตราการปลูกฟิล์มทองแดงของการ Electroplating ทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นอัตราการปลูกฟิล์มทองแดงก็มากขึ้นตามเช่นกัน โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และมีความสัมพันธ์ดังสมการ $y = 0.72x$ โดย y คืออัตราการปลูกฟิล์มทองแดงในหน่วย ไมโครเมตรต่อชั่วโมง และ x คือค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ในหน่วย มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สำหรับแถบความคลาดเคลื่อนที่แสดงในรูปคิดเฉพาะความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัด (Precision uncertainty) เท่านั้น ซึ่งหาจากการวัดความหนาของชิ้นทองแดงแต่ละชิ้นจากแต่ละพื้นที่ สำหรับความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (Bias uncertainty) มีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

2.2.2.2 การศึกษาการลอกออกของคอยล์ทองแดงจากแผ่นสแตนเลส

ตามปกติภายหลังจากการ Electroplating คอยล์ทองแดงจะยังคงติดอยู่บนผิวของแผ่นสแตนเลส แต่ก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนสุดท้ายคือการประกบกับแผ่นเมมเบรนนั้น จำเป็นที่จะต้องได้คอยล์ทองแดงที่หลุดออกมาอิสระจากแผ่นสแตนเลส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่จะทำให้คอยล์ทองแดงหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้โดยที่ยังคงรูปร่างที่สมบูรณ์ไว้

ในการศึกษานี้มีแนวคิดว่าการยึดติดกันระหว่างคอยล์ทองแดงกับแผ่นสแตนเลสเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากพื้นผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง ซึ่งถ้าสามารถลดแรงนี้ลงได้จนถึงจุดหนึ่ง คาดว่าคอยล์ทองแดงจะสามารถหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้ โดยในการศึกษางานของ Udomtarak and Charassuriyong (2010) ซึ่งได้นำเสนอแนวคิดหนึ่งในการลดแรงยึดเหนี่ยว พบว่าการขัดผิวของแผ่นสแตนเลสให้เรียบมากยิ่งขึ้น จะช่วยลดพื้นที่ที่เป็นหลุมและบ่อทำให้ความขรุขระลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสลดลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุทั้งสองก็ควรที่จะลดลงด้วยเช่นกัน โดยรายละเอียดของการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก

จากการศึกษาผลการทดลองของ Udomtarak and Charassuriyong (2010) จึงนำแนวคิดนี้มาทดสอบกับชิ้นงานที่ได้สร้างขึ้น โดยการนำกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1500 มาขัดผิวของแผ่นสแตนเลสก่อนทำ Photolithography ซึ่งทำให้มีค่าความขรุขระของพื้นผิวสแตนเลสเท่ากับ 0.112 ไมโครเมตร จากการทดลองพบว่าภายหลังจากขั้นตอนการ Electroplating สามารถลอกคอยล์ของทองแดงออกมาได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเรียบของพื้นผิวสแตนเลสทำให้ความขรุขระของผิวสแตนเลสลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับสแตนเลสลดน้อยลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจึงลดลงด้วย ช่วยให้คอยล์ทองแดงหลุดลอกออกมาได้ที่ทุกขนาดพื้นที่บนแบบหล่อ ในการศึกษาสรุปได้ว่าหากใช้กระดาษทรายละเอียดตั้งแต่เบอร์ 1500 ขึ้นไปจะทำให้คอยล์ทองแดงที่มีขนาดพื้นที่น้อยกว่า 32 ตารางมิลลิเมตร หลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้อย่างสมบูรณ์ทุกชิ้น ภายหลังจากการ Electroplating

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาเพื่อจะให้ได้คอยล์ทองแดงหลุดออกมาตามที่ต้องการ สามารถสรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอน Electroplating ได้ดังตารางที่ 2.3 ภายหลังจากขั้นตอนการสร้างคอยล์นี้ จะเป็นการนำคอยล์ทองแดงที่ได้เข้าสู่กระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรน และประกบให้คอยล์อยู่ภายใน

2.3. กระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์โลหะ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการสร้างแผ่นเมมเบรนและวิธีการทำให้คอยล์ทองแดงที่ได้จากหัวข้อ 2.2 ผังอยู่ภายในแผ่นเมมเบรน ซึ่งได้กล่าวไว้เบื้องต้นแล้วว่าจะใช้วิธีการประกบแผ่นเมมเบรน 2 แผ่นเข้ากับคอยล์ทองแดง โดยวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นเมมเบรนคือ Polydimethylsiloxane (PDMS) เนื่องจากว่า PDMS เป็นวัสดุที่มีค่ายืดหยุ่นสูงซึ่งจะช่วยให้มีระยะกระดกสูง สามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ และราคาถูก เป็นต้น คุณสมบัติของ PDMS ได้แสดงดังตารางที่ 2.4 โดยที่ PDMS จะมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง หากผสมกับ silicone elastomer curing agent แล้วนำไปอบจะทำให้ PDMS แข็งตัวได้ โดยมีค่า Young's modulus เท่ากับ 360-870 KPa

2.3.1 การสร้างแผ่นเมมเบรนและวิธีการประกบ

ในการสร้างแผ่นเมมเบรนนั้นเริ่มจาก การผสม PDMS เข้ากับ silicone elastomer curing agent ด้วยอัตราส่วนโดยมวล 10 ต่อ 1 แล้วเทลงบนฐานรอง หลังจากนั้นจึงนำไปสปินในเครื่องสปินเนอร์เพื่อกำหนดความหนา (รายละเอียดการใช้งานเครื่องสปินเนอร์แสดงในภาคผนวก จ) หลังจากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ PDMS แข็งตัว ก็จะได้แผ่นเมมเบรนหนึ่งชั้น สำหรับการประกบกับคอยล์ทองแดงเพื่อทำให้คอยล์ทองแดงผังอยู่ภายในนั้น (พิจารณารูปที่ 2.13 ประกอบ) เริ่มจากการนำคอยล์ทองแดงมาวางบนแผ่น PDMS ชั้นแรกที่แข็งตัวแล้วซึ่งยังติดอยู่บนฐานรองอยู่ แล้วเท PDMS ชั้นที่สองลงบนคอยล์ นำไปสปินเพื่อกำหนดความหนา แล้วนำไปอบให้แข็งตัว สุดท้ายจึงลอกแผ่นเมมเบรนออกมาจากฐาน ได้เป็นแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงผังอยู่ภายใน ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงแผ่นเมมเบรนหลังจากลอกออกจากฐานรอง และแสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นเมมเบรนบนวัสดุโค้ง

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแผ่น PDMS กับเวลาในการสปินที่ความเร็วรอบต่างๆถูกแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่า ที่ความเร็วรอบใดๆเมื่อใช้เวลาในการสปินมากขึ้นความหนาของ PDMS จะน้อยลง สำหรับเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 60 วินาที ในขณะที่เวลาใดๆ ความเร็วรอบที่สูงกว่าจะทำให้ได้ความหนาของ PDMS น้อยกว่า โดยในการทดสอบใช้ความเร็วรอบที่ 500 rpm ที่เวลา 30 วินาที จะทำให้ได้ความหนาของ PDMS ประมาณ 250 ไมโครเมตร สำหรับแถบความคลาดเคลื่อนที่แสดงในรูปคิดเฉพาะความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัด (Precision uncertainty) เท่านั้น ซึ่งหาจากการวัดความหนาของ PDMS ที่จุดกึ่งกลางโดยทดลองในแต่ละกรณีทั้งหมด 5 ครั้ง สำหรับ

ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด (Bias uncertainty) มีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตรจนสามารถละทิ้งได้

2.3.2 การเลือกวัสดุที่ใช้เป็นฐานสำหรับกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรน

ในการเท PDMS จำเป็นต้องมีฐานรองรับ โดยในเบื้องต้นใช้กระจกใสเป็นฐานรอง ภายหลังจากอบ PDMS กลับพบว่าไม่สามารถลอก PDMS ออกมาเป็นแผ่นที่สมบูรณ์ได้ กล่าวคือ เมื่อลอก PDMS ออกมา PDMS เกิดการฉีกขาดขึ้น จึงได้เปลี่ยนวัสดุจากกระจกใสเป็นแผ่นพลาสติกใส โดยการติดแผ่นใสลงบนกระจกอีกที เพื่อให้พื้นผิวของแผ่นใสเป็นฐานรองแทน ซึ่งพบว่าการใช้แผ่นใสเป็นฐานรองนั้นสามารถลอก PDMS ออกมาได้ง่ายโดยที่ PDMS ไม่มีการฉีกขาด และเมื่อเปลี่ยนฐานรองมาเป็นแผ่นอะคริลิกก็ยังคงพบว่า สามารถลอก PDMS ออกมาได้โดยที่ไม่ฉีกขาดเช่นกัน จึงคาดว่า คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง PDMS นั้นมีส่วนสำคัญในการช่วยให้ PDMS ลอกได้ง่ายขึ้น

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาเพื่อจะให้ได้แผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ ภายในตามที่ต้องการ สามารถสรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกอบได้ดังตารางที่ 2.5

2.4 สรุปผล

บทนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการสร้างแบบใหม่ที่ทำให้ได้แผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่ โดยเป้าหมายของกระบวนการสร้างคือ ต้องการทำให้คอยล์ทองแดงฝังอยู่ในแผ่นเมมเบรน PDMS สำหรับกระบวนการสร้างที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกระบวนการทั้งหมด 2 ขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างคอยล์ทองแดง และกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกอบคอยล์

ไดอะแกรมและรายละเอียดแสดงกระบวนการสร้างทั้งหมดแสดงในรูปที่ 2.16 และในตารางที่ 2.6 โดยกระบวนการแรกนั้นเริ่มจากการสร้างแบบหล่อที่มีรูปร่างของคอยล์ตามที่ต้องการ ในขั้นตอนที่เรียกว่า Photolithography ซึ่งเริ่มจากการเคลือบ Negative Photoresist บนแผ่นสแตนเลสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นำแผ่นแบบมาวางทับด้านบนแล้วทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 20 วินาที หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อ

น้ำ 100 มิลลิลิตร เพื่อล้างโพได้รียซิสในส่วนที่ไม่กระทบแสงออกไป สุดท้ายจึงนำแบบหล่อที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพื่อระเหยน้ำออก โดยในกระบวนการพัฒนาพบว่า ควรกดทับแผ่นแบบกับโพได้รียซิสด้วยแรงอย่างน้อย 0.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของขนาดแบบหล่อที่เกิดขึ้น โดยการกดแผ่นแบบด้วยแรงนี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจึงนำแบบหล่อที่ได้ไป Electroplating เพื่อปลูกคอยล์ทองแดงบนแบบหล่อ โดยพารามิเตอร์ที่ควรควบคุมเพื่อเป็นการกำหนดความหนาของคอยล์ทองแดงที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งพบว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่มีค่าสูงขึ้นอัตราการปลูกฟิล์มทองแดงก็จะมีค่าสูงขึ้นเช่นกันเป็นเชิงเส้นตรง อีกทั้งในขั้นตอนนี้ยังควรคำนึงความขรุขระของแผ่นสแตนเลสที่ใช้ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อารหลุดออกของคอยล์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กระดาษทรายเบอร์ 1500 ในการขัดแผ่นสแตนเลสจนมีค่าความขรุขระที่ผิวประมาณ 0.112 ไมโครเมตร จะทำให้คอยล์ทองแดงที่มีขนาดเล็กกว่า 32 ตารางมิลลิเมตร หลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสทุกชิ้น

ในขั้นตอนที่สองคือการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์ เพื่อที่จะทำให้ได้แผ่นเมมเบรนนั้นมีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ภายใน การพัฒนากระบวนการสร้างในขั้นตอนนี้ พบว่า วิธีการเท PDMS นั้นควรเริ่มจากการเท PDMS ลงบนฐานอะคริลิกหรือแผ่นพลาสติกใส สปินให้ได้ความหนาตามต้องการ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้แข็งตัว หลังจากนั้นจึงวางคอยล์ทองแดงด้านบนแล้วสปิน PDMS ทับอีกครั้ง สุดท้ายจึงลอกแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ออกมาจากฐาน ทั้งนี้ในการเท PDMS ลงบนแผ่นพลาสติกใสหรือแผ่นอะคริลิกจะช่วยทำให้สามารถลอกแผ่นเมมเบรนออกมาได้ง่ายขึ้น สำหรับพารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมความหนาของแผ่นเมมเบรนคือ ความเร็วรอบและเวลาในการสปิน ในการทดลองพบว่าที่ความเร็วรอบใดๆเมื่อใช้เวลาในการสปินมากขึ้นความหนาของ PDMS จะน้อยลง สำหรับเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 60 วินาที ในขณะที่เวลาใดๆ ความเร็วรอบที่สูงกว่าจะทำให้ได้ความหนาของ PDMS น้อยกว่า โดยในการศึกษานี้ใช้ความเร็วรอบที่ 500 rpm ที่เวลา 30 วินาที จะทำให้ได้ความหนาของ PDMS ประมาณ 250 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2.1 สรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ

ขั้นตอน	พารามิเตอร์	จุดประสงค์
1. เคลือบโฟโตเรซิส	90 °C	เพื่อให้โฟโตเรซิสกับสแตนเลสติดแน่นมากขึ้น
2. กัดแผ่นแบบลงบนสแตนเลส	> 0.9 kN/m ²	เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของขนาดแบบหล่อ
3. ฉายแสง	20 วินาที	เพื่อให้ส่วนที่ถูกแสงไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย
4. ล้างโฟโตเรซิสออกด้วยตัวทำละลาย	ผสมตัวทำละลายในอัตราส่วน 1 g : น้ำ 100 ml	เพื่อล้างโฟโตเรซิสออก
5. อบ	อุณหภูมิ 120°C, 7 นาที	เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ภายในออก

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของทองแดง

Property	Value	Property	Value
Mass Density	8.96 g/cm ³	Specific heat	24.44 J/mol K
Young's modulus	130 GPa	Thermal conductivity	401 W/m K
Shear modulus	48 GPa	Thermal Expansion	16.5 μm/m K
Poisson ratio	0.34	Electrical Resistivity	16.78 nΩm

ตารางที่ 2.3 สรุปกระบวนการสร้างในขั้นตอนการปลูกคอยล์ทองแดง

ขั้นตอน	พารามิเตอร์	จุดประสงค์
1. ชัดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่ Photolithography	กระดาษทราย >1500	เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับสแตนเลส
2. Electroplating	Current Density	เพื่อปลูกคอยล์ทองแดงลงบนสแตนเลส
3. ล้างโฟโตเรซิสด้วย NaOH	-	-

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของ PDMS

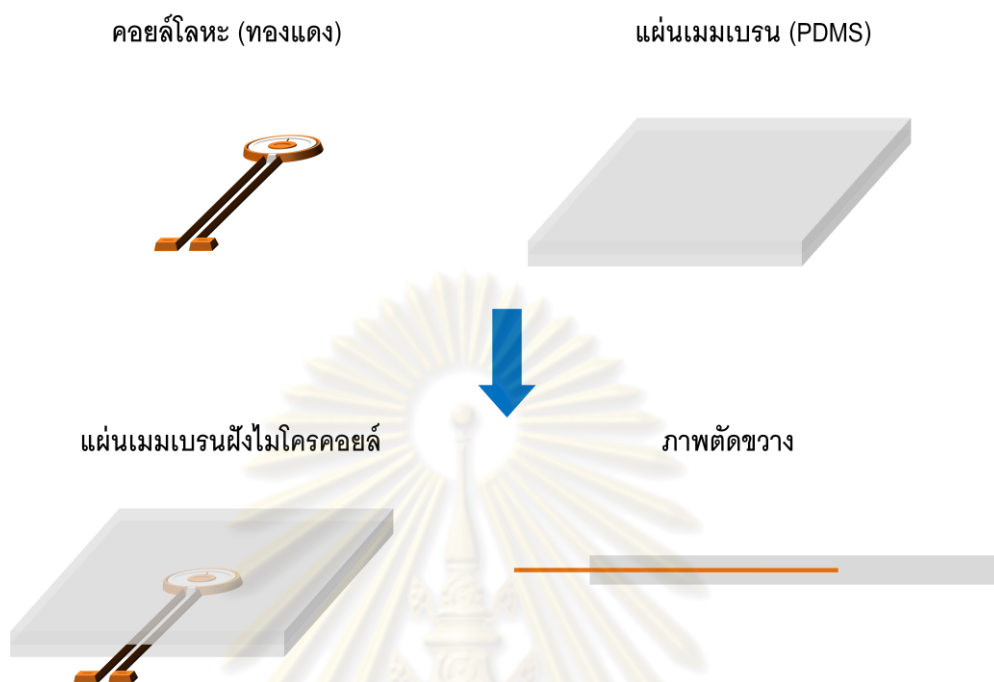
Property	Value	Property	Value
Mass Density	0.97 kg/m ³	Thermal conductivity	0.15 W/m K
Young's modulus	360-870 KPa	Dielectric constant	2.3-2.8
Poisson ratio	0.5	Index of refraction	1.4
Tensile strength	2.24 MPa	Electrical conductivity	4x10 ¹³ Ωm
Specific heat	1.46 kJ/kg K	Magnetic permeability	0.6x10 ⁶ cm ³ /g

ตารางที่ 2.5 ขั้นตอนในการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์

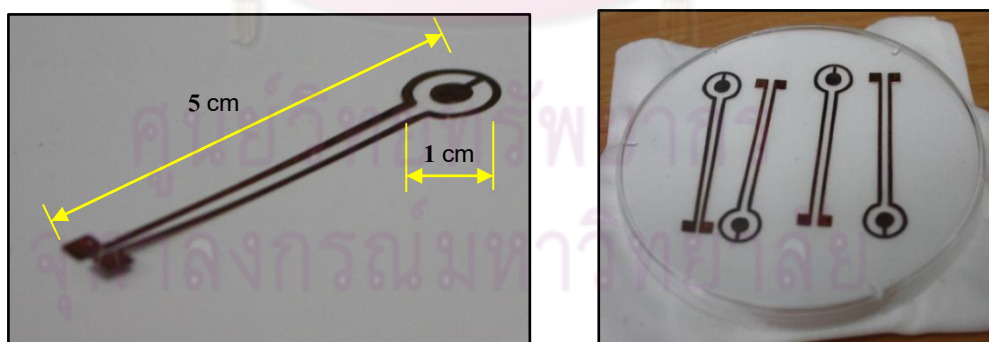
ขั้นตอน	พารามิเตอร์	จุดประสงค์
1.ผสม PDMS	อัตราส่วน 10 : 1	-
2. สป็น PDMS ลงบนอะคริลิก	ความหนา PDMS	เพื่อใช้เป็นฐานรองคอยล์ทองแดง
3.อบ	อุณหภูมิ 70°C, 1 ชั่วโมง	เพื่อทำให้ PDMS แข็งตัว
4.วางคอยล์ทองแดงลงบน PDMS	-	-
5.สป็น PDMS ทับลงบนคอยล์ทองแดง	ความหนา PDMS	เพื่อทำให้คอยล์ทองแดงอยู่ภายใน PDMS
6.อบ	อุณหภูมิ 70°C, 1 ชั่วโมง	เพื่อทำให้ PDMS แข็งตัว

ตารางที่ 2.6 สรุประบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝิ่งไมโครคอยล์ทองแดง

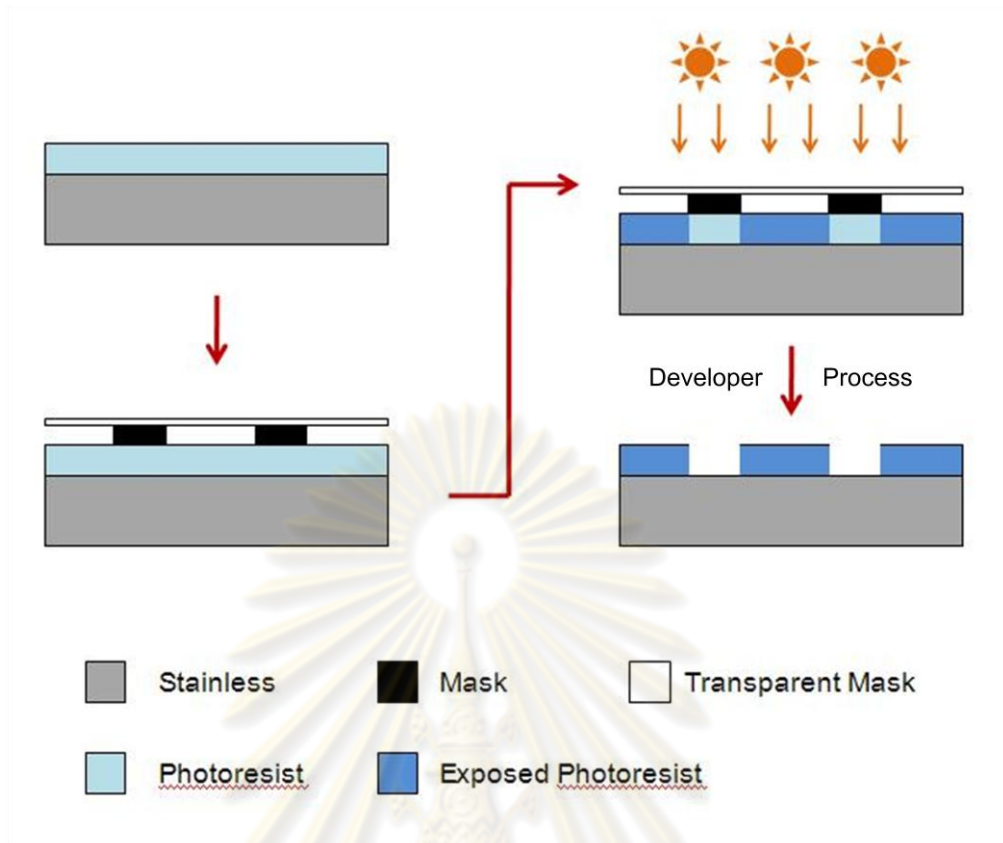
ขั้นตอน	พารามิเตอร์	จุดประสงค์
1. ขัดผิวสแตนเลส	กระดาษทราย >1500	เพื่อลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับสแตนเลส
2. เคลือบโฟโตเรซิส	90 °C	เพื่อให้โฟโตเรซิสกับสแตนเลสติดแน่นมากขึ้น
3. กัดแผ่นแบบลงบนสแตนเลส	> 0.9 kN/m ²	เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของขนาดแบบหล่อ
4. ฉายแสง	20 วินาที	เพื่อให้ส่วนที่ถูกแสงไม่ทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย
5. ล้างโฟโตเรซิสออกด้วยตัวทำละลาย	ผสมตัวทำละลายในอัตราส่วน 1 g : น้ำ 100 ml	เพื่อล้างโฟโตเรซิสออก
6. อบ	อุณหภูมิ 120°C, 7 นาที	เพื่อระเหยน้ำที่อยู่ภายในออก
7. Electroplating	ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่	เพื่อปลูกคอยล์ทองแดงลงบนสแตนเลส
8. ล้างโฟโตเรซิสด้วย NaOH	เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์	-
9. ผสม PDMS	อัตราส่วน 10 : 1	-
10. สปิน PDMS ลงบนอะคริลิก	ความหนา PDMS	เพื่อใช้เป็นฐานรองคอยล์ทองแดง
11. อบ	อุณหภูมิ 70°C, 1 ชั่วโมง	เพื่อให้ PDMS แข็งตัว
12. วางคอยล์ทองแดงลงบน PDMS	-	-
13. สปิน PDMS ทับลงบนคอยล์ทองแดง	ความหนา PDMS	เพื่อให้คอยล์ทองแดงอยู่ใน PDMS
14. อบ	อุณหภูมิ 70°C, 1 ชั่วโมง	เพื่อให้ PDMS แข็งตัว
15. ลอกแผ่นเมมเบรน	-	-



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมและภาพตัดขวางของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครอิเล็กโทรดที่ต้องการ



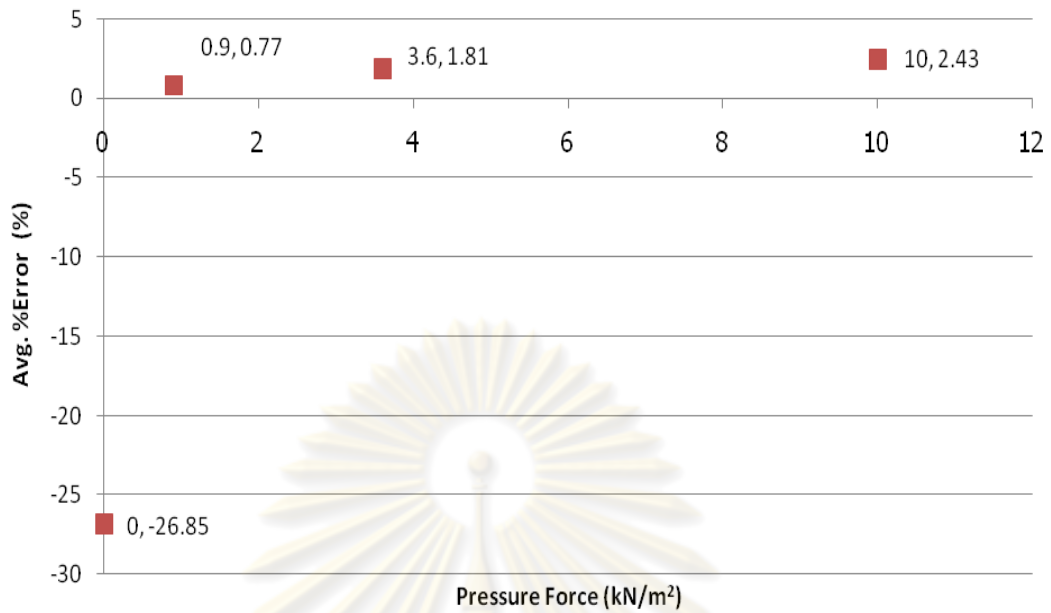
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของคอล์ยทองแดงที่ถูกสร้างขึ้น



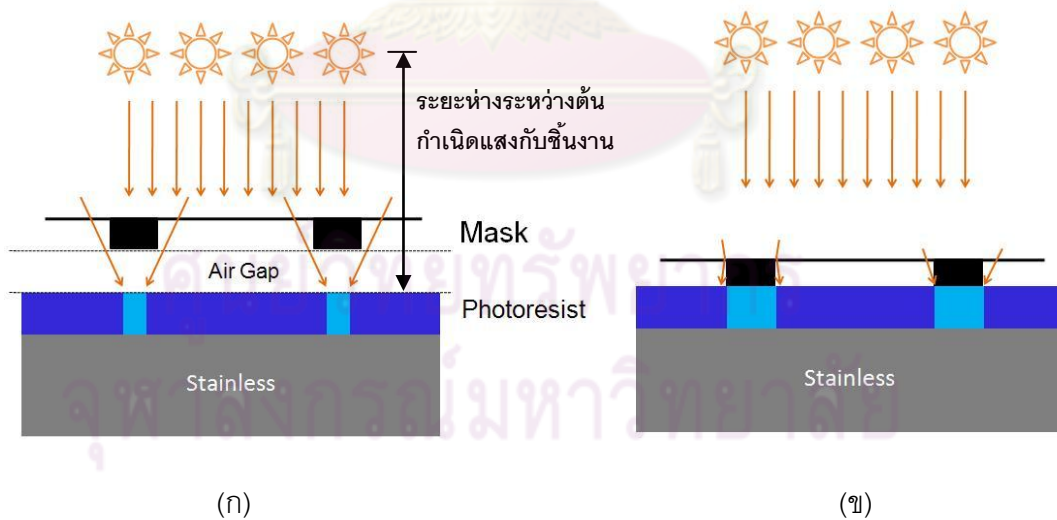
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมรายละเอียดในขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ



รูปที่ 2.4 รูปร่างของคอยล์ที่ใช้ในการศึกษาและแผ่นแบบที่ใช้



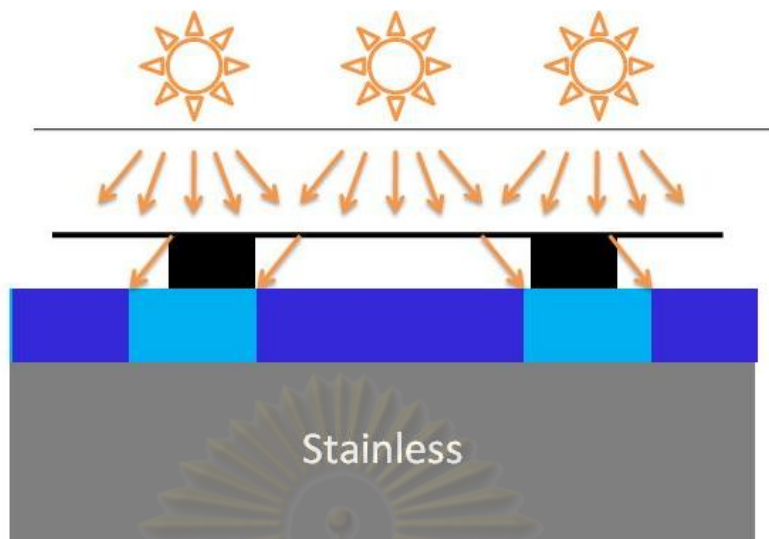
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่เกิดทับกับค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเทียบกับขนาดแบบที่ต้องการ



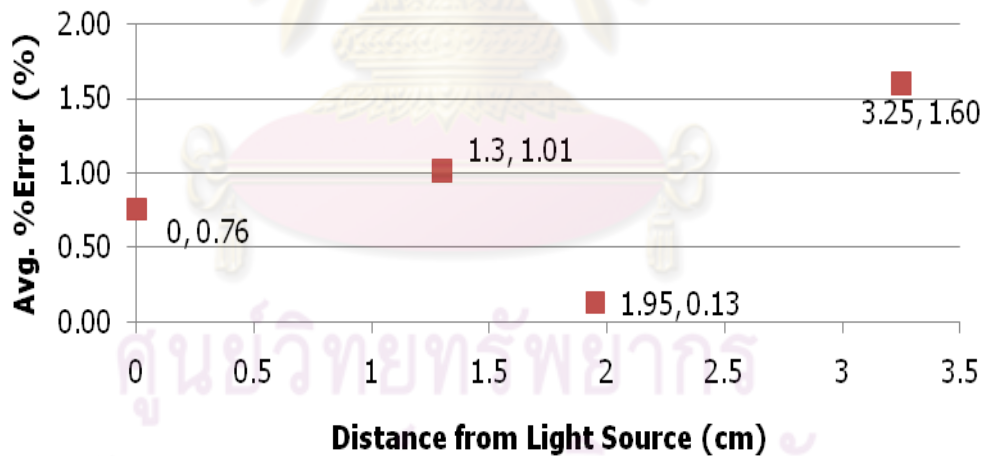
รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมอธิบายการส่องผ่านของแสง

(ก) ระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับโฟโต้เรซิสมาก

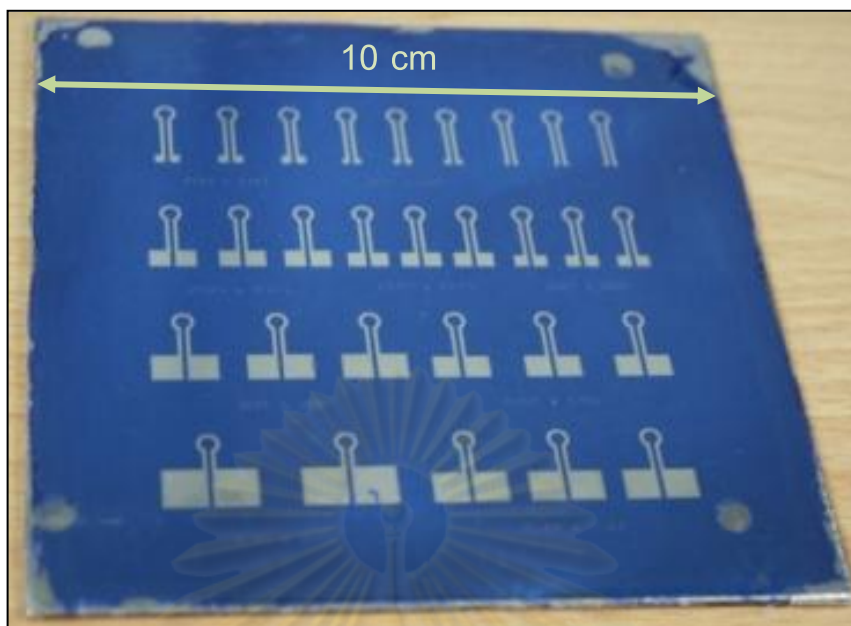
(ข) ระยะห่างระหว่างแผ่นแบบกับโฟโต้เรซิสน้อย



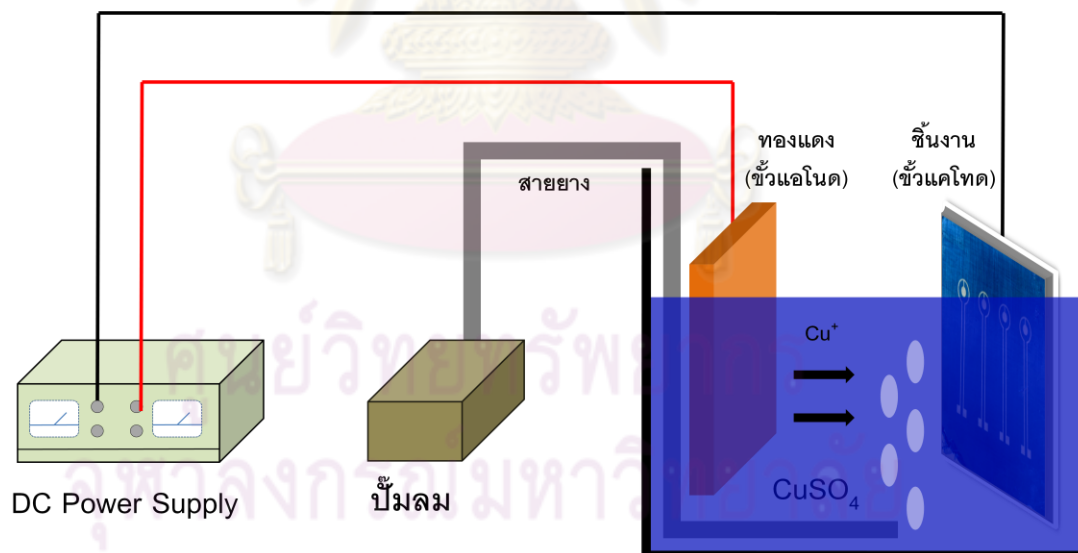
รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมอธิบายการฉายแสง



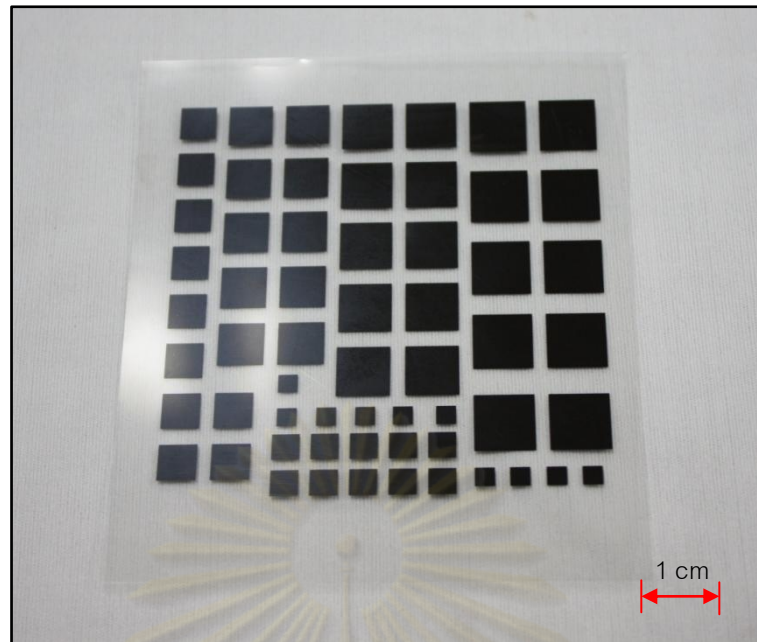
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากต้นกำเนิดแสงถึงชิ้นงานกับความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับขนาดของแบบบนแผ่นแบบ



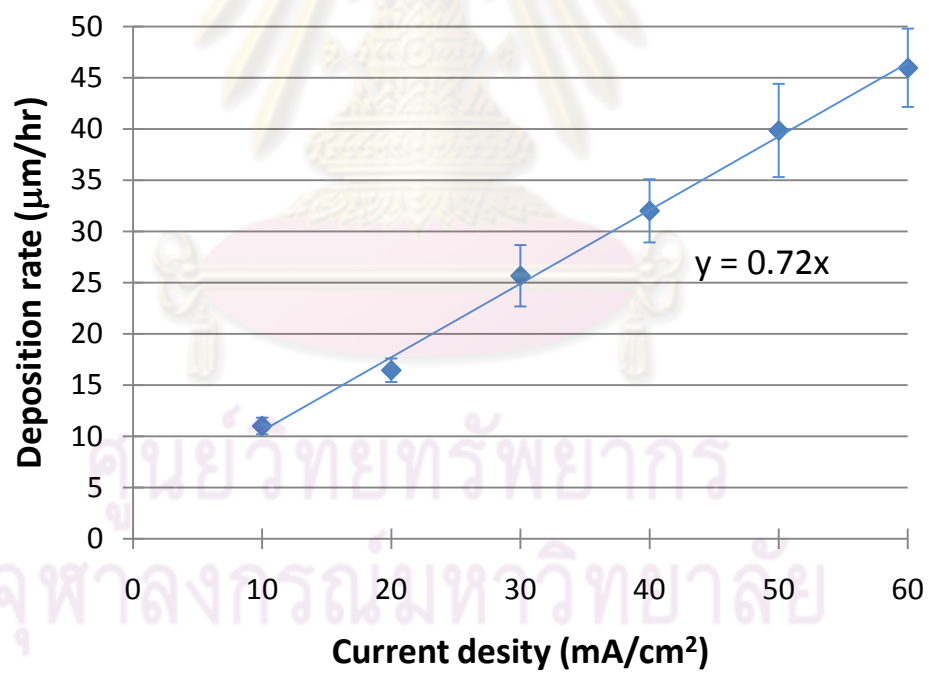
รูปที่ 2.9 ชิ้นงานหลังผ่านขั้นตอนการสร้างแบบหล่อ



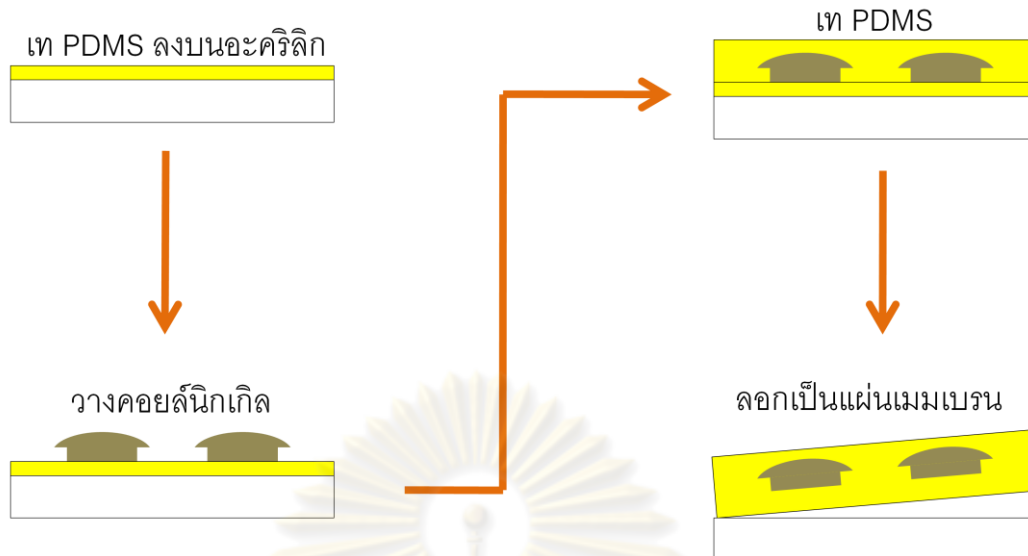
รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งชุด Electroplating



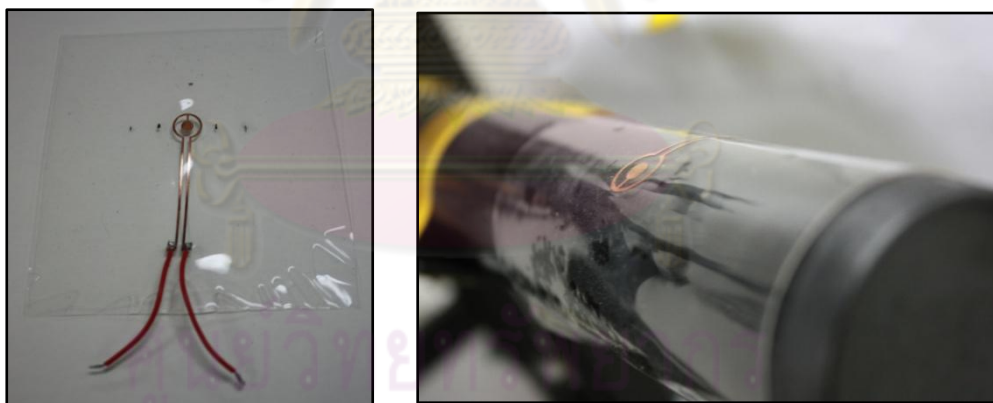
รูปที่ 2.11 แผ่นแบบที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการปลูกฟิล์มทองแดง



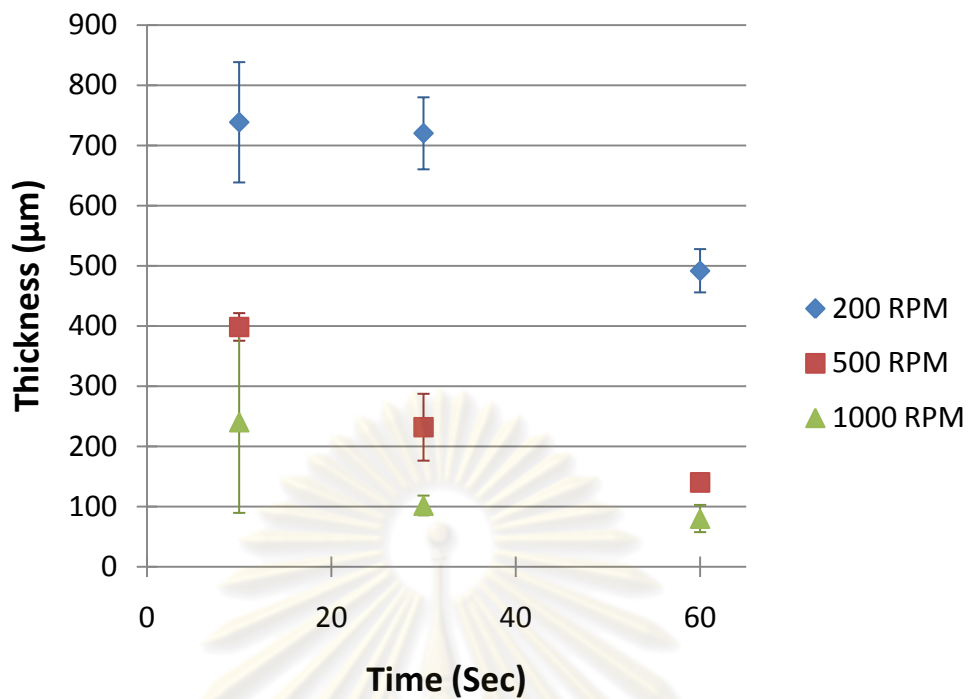
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่และอัตราการปลูกฟิล์มทองแดง



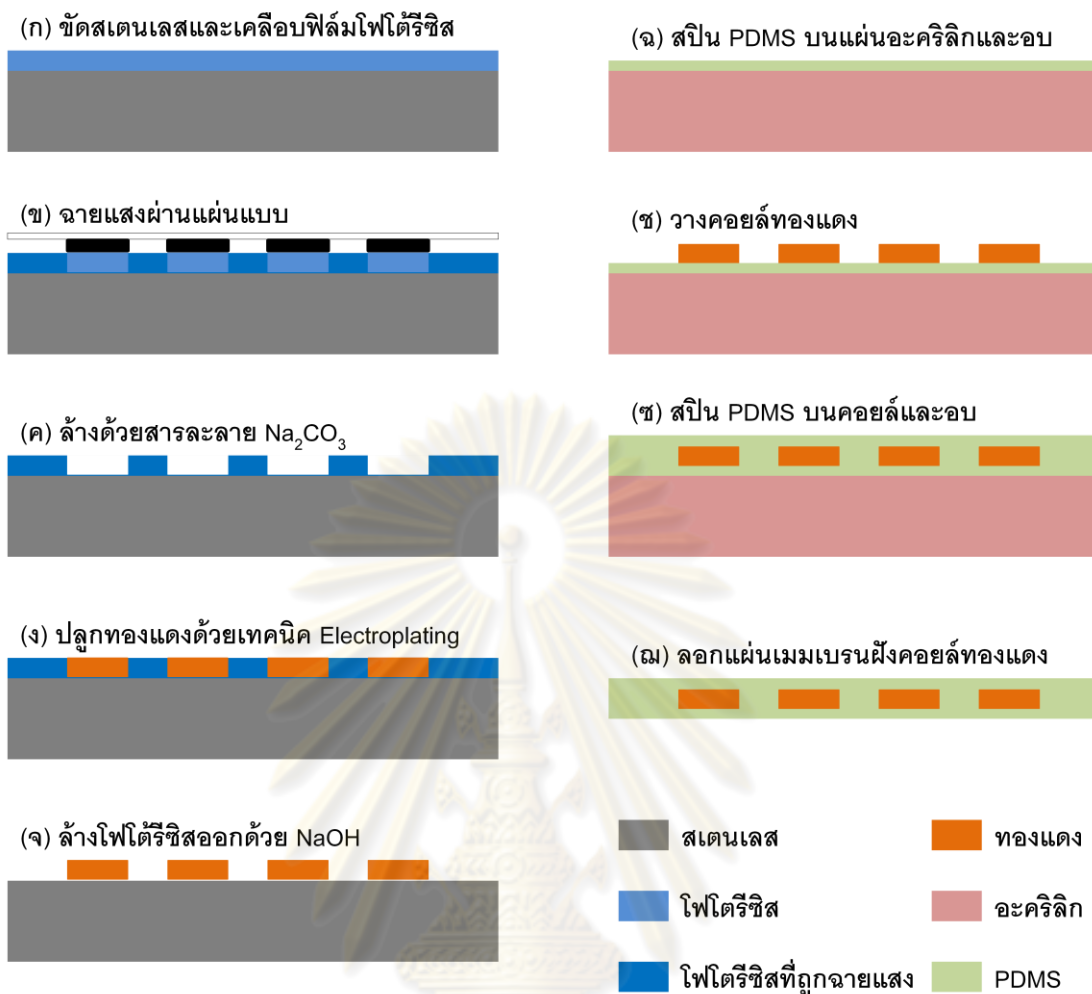
รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมรายละเอียดการสร้างแผ่นเมมเบรนเพื่อให้คอยล์ทองแดงฝังอยู่ภายใน



รูปที่ 2.14 แผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ภายใน



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ PDMS กับเวลาในการสปิน



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์ทองแดง

บทที่ 3

การใช้งานเป็นไมโครแอกซ์เวเตอร์

ในบทนี้จะสาธิตการนำแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์มาใช้งานโดยประกอบเป็นแอกซ์เวเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากนั้นจะทดสอบสมรรถนะซึ่งประกอบด้วย Static และ Dynamic response เพื่อเป็นการสาธิตลักษณะการทำงานของเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ สำหรับขนาดของแอกซ์เวเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน (D_m) ต่างกัน 2 ขนาดคือ 2 และ 4 เซนติเมตร โดยการทดสอบ Static response ต้องการดูผลของกระแสไฟฟ้าและพลังงานที่จ่ายให้แอกซ์เวเตอร์ต่อระยะกระดก ในขณะที่การทดสอบ Dynamic response ต้องการดูผลของความถี่ที่จับต่อความถี่ของการสั่นที่ตอบสนองของแอกซ์เวเตอร์ ผลของความถี่ที่จับต่อระยะกระดกสูงสุด และผลของความถี่ที่จับต่อความต่างเฟสของสัญญาณไฟฟ้าและการกระดกของแอกซ์เวเตอร์

3.1 การสร้างไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์เพื่อใช้ในการทดสอบ

การสร้างไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเลือกพารามิเตอร์ของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และการสร้าง และการประกอบเป็นไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 การเลือกพารามิเตอร์ของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และการสร้าง

ในการเลือกพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์เพื่อนำมาสร้าง ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเลือกพารามิเตอร์ของคอยล์ทองแดง และการเลือกพารามิเตอร์ของแผ่นเมมเบรน โดยในการศึกษานี้เลือกใช้แม่เหล็กชนิด Neodymium ($NdFeB$) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และยาว 1 เซนติเมตร

สำหรับรูปร่างและขนาดของคอยล์ทองแดงที่ถูกสร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีลักษณะเป็นคอยล์วงกลมรอบเดียว ความกว้างของคอยล์ (W_c) เท่ากับ 500 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคอยล์ (D_c) เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กถาวรคือ 1 เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศตั้งฉากจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งขอบของแม่เหล็กถาวร ซึ่งได้อธิบายในภาคผนวก ก ส่วนความหนาของคอยล์ (T_c) เท่ากับ 40 ไมโครเมตร และมี

ส่วนของทองแดงยื่นมาบริเวณจุดศูนย์กลางของคอยล์ เรียกว่า จุดวัดระยะกระดก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร การที่ต้องมีจุดนี้อยู่บนคอยล์ เนื่องจากต้องการวัดระยะกระดกที่จุดศูนย์กลางของคอยล์ทองแดง โดยเครื่องมือที่ใช้วัดระยะกระดกคือ Laser displacement sensor ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G37 ดังรูปที่ 3.2 โดยวัดจากการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ต่อพื้นผิวที่ทึบแสง ซึ่งอุปกรณ์นี้มีค่า Measurement range เท่ากับ ± 5 มิลลิเมตร มี Sensitivity เท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ต่อ 5 ไมโครเมตร และค่า Resolution เท่ากับ 1 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้บริเวณศูนย์กลางของคอยล์มีลักษณะทึบแสง เพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์กลับไปที่อุปกรณ์วัด

ในส่วนของพารามิเตอร์ของแผ่นเมมเบรนกำหนดให้ความหนาของแผ่นเมมเบรน (T_M) คงที่เท่ากับ 300 ไมโครเมตร โดยในกระบวนการสร้างชั้นของเมมเบรนชั้นแรกทำการสปิน PDMS ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 วินาที ให้ได้ความหนา 100 ไมโครเมตร แล้วจึงวางคอยล์ทองแดง สุดท้ายจึงสปิน PDMS ชั้นที่สองที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 วินาที ได้ความหนารวมของแผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์เป็น 300 ไมโครเมตร

แผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์ที่ใช้ทดสอบ แสดงในรูปที่ 3.3 โดยในรูปมีการเชื่อมสายไฟเข้ากับคอยล์ทองแดงเรียบร้อยแล้ว เพื่อเตรียมใช้ในการประกอบเป็นไมโครเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ต่อไป

3.1.2 การประกอบเป็นเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์

การนำแผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์ที่ได้สร้างขึ้นเรียบร้อยแล้ว มาประกอบเป็นเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์นั้นได้แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 3.4 เริ่มจากการนำแผ่นอะคริลิกใสที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เจาะรูวงกลมที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนที่ต้องการ แล้วนำมาประกบด้านบนและด้านล่างของแผ่นเมมเบรนโดยวางให้จุดศูนย์กลางของคอยล์ทองแดงอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางของรูวงกลม หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานมาติดกับฐานอะคริลิกซึ่งมีแม่เหล็กถาวรวางอยู่ โดยวางให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางของคอยล์ทองแดง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างคอยล์กับแม่เหล็กจะถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับขนาดความหนาของแผ่นอะคริลิก คือ 1 มิลลิเมตร รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายของเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ที่พร้อมนำไปทดสอบ โดยรูป 3.5ก คือเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

เมมเบรนเท่ากับ 2 เซนติเมตร และรูป 3.5x เป็นเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนเท่ากับ 4 เซนติเมตร

ในการประกอบแผ่นเมมเบรนให้เป็นเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์นี้ มีพารามิเตอร์ที่ต้องพิจารณาอีกหนึ่งตัว คือ ความตึงของการซึ่งแผ่นเมมเบรนในการประกบเข้ากับแผ่นอะคริลิก โดยในการทดสอบนี้นิยมให้ความตึงเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะที่ยืดออกของแต่ละด้านต่อรัศมีของเมมเบรน ($\frac{\Delta R}{R_m}$) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 การซึ่งแผ่นเมมเบรนเริ่มต้นจาก การนำแผ่นเมมเบรนมาวางบนแผ่นอะคริลิกทำเครื่องหมายที่ตำแหน่งขอบของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นอะคริลิกทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ ซ้าย ขวาและบน หลังจากนั้นจึงทำการยืดแผ่นเมมเบรนออกให้เท่ากับระยะยืดกำหนดไว้โดยการยืดแผ่นเมมเบรนให้จุดที่ทำเครื่องหมายทับกับขีดสีแดงในรูปที่ 3.6 พอดี

3.2 การทดสอบ Static response

ในการทดสอบ Static response เป็นการศึกษาคุณสมบัติของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและพลังงานที่ป้อนให้แก่แอคซิวเอเตอร์ต่อระยะกระดกที่เกิดขึ้นตรงจุดศูนย์กลางของเมมเบรน ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนคือ 2 และ 4 เซนติเมตร

3.2.1 การทดสอบและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

สำหรับการติดตั้งชุดทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ถูกแสดงดังไดอะแกรมรูปที่ 3.7k ซึ่งเริ่มจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขาของคอยล์ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแผ่นเมมเบรนกระดกขึ้นหรือลง ตัวเซนเซอร์ของเครื่องมือวัดจะวัดความเปลี่ยนแปลงแล้วแสดงบนจอแสดงผล โดยที่จอแสดงผลจะแสดงผลเป็นหน่วยมิลลิเมตร รูปที่ 3.7x แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชุดทดสอบจริงสำหรับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับไมโครแอคซิวเอเตอร์ และใช้ป้อนไฟฟ้าสำหรับ Laser displacement sensor

ในการทดสอบ Static response เป็นการทดสอบคุณสมบัติของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและพลังงานที่ใส่ให้แก่แอคซิวเอเตอร์ต่อระยะกระดก การทดสอบได้ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนเป็น 2 และ 4 เซนติเมตร ทั้งนี้ในการทดสอบในแต่ละกรณีใช้แผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์แผ่นเดียวกัน และกำหนดความตึงของการซึ่งแผ่นเมมเบรน ($\frac{\Delta R}{R_m}$) บนอะคริลิกให้กับ 0.1 ซึ่งจะได้ว่า

ระยะที่ยืดออกของแต่ละด้าน (ΔR) ของกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร เท่ากับ 1 และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ

การบันทึกข้อมูลของระยะกระดกใช้จุดบันทึกค่าระยะกระดกจากจอแสดงผลโดยตรง หลังจากนั้นจึงนำระยะกระดกที่ได้ในแต่ละกรณี มาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายกับระยะกระดกที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 เซนติเมตร สำหรับการหาพลังงานที่ใส่ให้แอคชูเอเตอร์เพื่อนำมาหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใส่กับระยะกระดกได้จาก $P = I^2 R$ โดยที่ R คือค่าความต้านทานของคอยล์ทองแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 โอห์ม และ I คือค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์

ในการทดสอบแต่ละกรณี ทำการทดสอบซ้ำกัน 5 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่าความไม่แน่นอน ซึ่งในการทดสอบ Static response นี้จะคำนวณเฉพาะค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการวัด (Precision uncertainty) เท่านั้น โดยละทิ้งความไม่แน่นอนของเครื่องมือ (Bias uncertainty) เพราะมีค่าน้อยมากประมาณ 0.02 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัด

3.2.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบของ Static response ถูกแบ่งออกได้ 2 หัวข้อ คือ ผลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดก และผลของพลังงานที่ป้อนให้ไมโครแอคชูเอเตอร์ต่อระยะกระดก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 ผลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดก

ในการทดสอบเพื่อดูผลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดกได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมด 5 ค่า คือ 1.41, 2.00, 2.45, 2.83 และ 3.16 แอมแปร์ กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดกแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งพบว่า เมื่อจ่ายกระแสให้กับแอคชูเอเตอร์สูงขึ้น ระยะกระดกจะมีค่าสูงขึ้นตามโดยมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง และพบว่าถ้าที่กระแสไฟฟ้าเท่ากันแอคชูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน 4 เซนติเมตรจะมีระยะกระดกที่มากกว่าแอคชูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน 2 เซนติเมตร โดยในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนเท่ากับ 2 และ 4 เซนติเมตร แนวโน้ม

ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าต่อระยะกระดกเป็นดังสมการ $x = 8l$ และ $x = 23.5l$ ตามลำดับ โดย x คือระยะกระดกในหน่วย ไมโครเมตร และ l คือค่ากระแสไฟฟ้าในหน่วย แอมแปร์

จากผลการทดสอบข้างต้นพบว่า เมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนใหญ่กว่ามีแนวโน้มที่จะให้ระยะกระดกที่สูงกว่าที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเท่ากัน อีกทั้งพฤติกรรมของแอคซิวเอเตอร์ทั้งสองตัวนี้สามารถอ้างอิงได้ด้วยแบบจำลองพื้นฐานคือ $F = kx$ (Hook's Law) โดย F คือแรงที่มากระทำ k คือค่าคงที่ของสปริง และ x คือระยะยืดออก เนื่องจากทฤษฎีของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (ภาคผนวก ก) แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย จากการวิเคราะห์เบื้องต้นนี้จึงเห็นได้ว่าแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตรจะมีค่า k น้อยกว่าแอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลที่คาดเอาไว้ โดยที่แอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตรจะมีค่า k ประมาณ 400 นิวตันต่อเมตร ในขณะที่แอคซิวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตรจะมีค่า k ประมาณ 133 นิวตันต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่าประมาณ 3 เท่า

3.2.2.2 ผลของพลังงานที่ใส่ให้แอคซิวเอเตอร์ต่อระยะกระดก

ผลของพลังงานที่ใส่ให้กับแอคซิวเอเตอร์ต่อระยะกระดกถูกแสดงดังรูปที่ 3.9 พบว่า เมื่อพลังงานมากขึ้นระยะกระดกจะมีค่ามากขึ้น โดยหากใส่พลังงานกับระบบเท่ากับ 1 วัตต์ แอคซิวเอเตอร์จะให้ระยะกระดกของแผ่นเมมเบรนสูงสุดที่ 25 และ 73 ไมโครเมตรในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนเท่ากับ 2 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ของพลังงานกับระยะกระดกนี้มีลักษณะเป็นความสัมพันธ์แบบยกกำลัง (Power-Law) ดังสมการ $x = 25P^{0.5}$ และ $x = 74P^{0.5}$ ในกรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนเท่ากับ 2 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ โดย x คือระยะกระดกในหน่วย ไมโครเมตร และ P คือพลังงานที่ป้อนให้แอคซิวเอเตอร์ในหน่วย วัตต์

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า หากต้องการให้ระยะกระดกมีมากก็จำเป็นที่จะต้องใส่พลังงานให้มากขึ้นเช่นกัน และผลการทดสอบสอดคล้องกับทางทฤษฎี โดยที่พลังงานสัมพันธ์กับระยะกระดกแบบยกกำลัง เนื่องจากพลังงานแปรผันตามกระแสไฟฟ้ายกกำลังสอง และกระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับระยะกระดกตามหัวข้อ 3.2.2.1 จึงทำให้ระยะกระดกแปรผันตามรากที่สองของพลังงาน

3.3 การทดสอบ Dynamic response

สำหรับการทดสอบ Dynamic response เป็นการศึกษาดูผลของความถี่ที่ขับต่อความถี่ที่ตอบสนองของแอกซ์เวเตอร์ ความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้น และความถี่ที่ขับต่อความต่างเฟสของสัญญาณขาเข้าและขาออก ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร

3.3.1 การทดสอบและขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

ในการวัดระยะกระดกใช้เครื่องมือเช่นเดียวกับการทดสอบ Static response คือ Laser displacement sensor โดยต่อเพิ่มสัญญาณขาออกจากอุปกรณ์เข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อดูเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณขาออกและสัญญาณขาเข้า รูปที่ 3.10ก แสดงไดอะแกรมของชุดทดสอบ Dynamic response โดยเริ่มต้นจากการจ่ายสัญญาณขาเข้าด้วย Function generator เข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณเพื่อขยายกำลังของสัญญาณ แล้วจึงจ่ายสัญญาณเข้าสู่แอกซ์เวเตอร์ เมื่อแผ่นเมมเบรนกระดกตามสัญญาณที่จ่ายเข้าไป เครื่องมือวัด Laser displacement sensor จะส่งสัญญาณขาออกซึ่งเป็นสัญญาณแสดงระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์มาแสดงผลบนออสซิลโลสโคป รูปที่ 3.10ข แสดงภาพถ่ายของการติดตั้งชุดทดสอบจริง โดยในการทดสอบจริงจะต่อตัวต้านทานขนาด 8 โอห์มขนานกันรวมเป็นค่าความต้านทาน 4 โอห์มก่อนที่กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่แอกซ์เวเตอร์ เพื่อไม่ให้เครื่องขยายสัญญาณจ่ายกำลังมากเกินไป ในการต่ออุปกรณ์สำหรับการทดสอบ Dynamic response พบว่ามีข้อสังเกตที่ควรระวังคือ ควรแยกสายดิน (Ground) ของอุปกรณ์วัด (เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง) ออกจากอุปกรณ์ขับ (Function generator และเครื่องขยายสัญญาณ) เนื่องจากการต่อสายดินร่วมกันจะทำให้เกิดการรบกวนต่อสัญญาณขาออกได้

ในการทดสอบนี้จะดูผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขับต่อความถี่ที่ตอบสนอง ความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุด และความถี่ที่ขับต่อความต่างเฟส โดยจะเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขับตั้งแต่ 2 – 200 เฮิรท์ ทั้งหมด 21 ค่า และควบคุมให้ค่าพลังงานสูงสุดที่ป้อนให้กับชิ้นงานไม่เกิน 0.36 วัตต์ สำหรับทุกค่าความถี่ ข้อสังเกตสำหรับการปรับค่าความถี่และขนาดของสัญญาณที่จ่ายให้กับแอกซ์เวเตอร์คือ เมื่อเปลี่ยนค่าความถี่บน Function generator (สำหรับช่วงความถี่ต่ำที่น้อยกว่า 30 เฮิรท์) ขนาดของสัญญาณขาเข้าบนจอออสซิลโลสโคปจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทั้งนี้ทุก

ครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าความถี่จึงต้องทำการปรับขนาดของสัญญาณบน Function generator เพื่อให้ขนาดสัญญาณขาเข้าบนจ้อออสซิลโลสโคปกลับมาเท่าเดิมทุกครั้ง สำหรับในส่วนของแผ่นเมมเบรนจะมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบ Static response คือ ใช้แผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์แผ่นเดียวกัน และกำหนดความถี่ของการซึ่งแผ่นเมมเบรนบนอะคริลิกให้เท่ากัน โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างระยะที่ยืดออกของแต่ละด้านต่อรัศมีของเมมเบรนเท่ากับ 0.1

ผลของการทดสอบ Dynamic response จะได้ลักษณะสัญญาณขาออกบนหน้าจ้อออสซิลโลสโคป ดังตัวอย่างรูปที่ 3.11 สัญญาณขาเข้าแอกซ์เตอรุ่มถูกแสดงด้วยเส้นสีเหลือง ส่วนสัญญาณขาออกถูกแสดงด้วยเส้นสีเขียว โดยจะนำข้อมูลดิบ (ในงานนี้เป็นไฟล์นามสกุล .csv) มาผ่านกระบวนการวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระยะกระดก ความถี่ขาออก และความต่างเฟส ต่อไป ซึ่งข้อมูลดิบที่ได้จะเป็นข้อมูลของค่าขนาดของสัญญาณที่เวลาต่างๆกัน โดยในการเก็บข้อมูลของสัญญาณจากเครื่องจ้อออสซิลโลสโคปจะเก็บในลักษณะของ AC Coupling

สำหรับการทดสอบแต่ละกรณี ทำการทดสอบซ้ำกัน 5 ครั้ง เช่นเดียวกับการทดสอบ Static response เพื่อนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอน ซึ่งในการทดสอบ Dynamic response นี้จะคำนวณเฉพาะค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการวัด (Precision uncertainty) เช่นเดียวกัน สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของตัวแปรต่างๆที่สนใจมีรายละเอียด ดังนี้

3.3.1.1 การหาความถี่ตอบสนองของแอกซ์เตอรุ่ม

เมื่อได้ข้อมูลดิบของสัญญาณขาออกในแต่ละกรณีมาแล้ว สามารถหาความถี่ขาออกของสัญญาณซึ่งเป็นสัญญาณของการตอบสนองของแอกซ์เตอรุ่ม (output frequency) ได้โดยการนำข้อมูลที่ได้ออกไปหา Power spectrum density โดยใช้โปรแกรม Matlab (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงใน ภาคผนวก ข) ซึ่งค่าความถี่ของสัญญาณจะถูกแสดงด้วยค่า Power spectrum density ที่มากที่สุด ดังตัวอย่างของผลการทดลองในรูปที่ 3.12

3.3.1.2 การหาระยะกระดกสูงสุด

สำหรับการหาระยะกระดกสูงสุด (Maximum deflection) จะเริ่มจากการนำข้อมูลดิบมาทำการเฉลี่ยโดยเฉลี่ยแบบ Moving average บนโปรแกรม Matlab เพื่อให้สัญญาณราบเรียบมากยิ่งขึ้น โดยในการศึกษานี้ใช้การเฉลี่ยจุดละ 14 ค่า คือ ด้านหน้า 7 ค่าและด้านหลัง 7

ค่า ($R = 7$ ในภาคผนวก ข) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.13 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณตั้งต้น (เส้นสีน้ำเงิน) และสัญญาณที่ผ่านการเฉลี่ยแล้ว (เส้นสีแดง) แล้วจึงนำสัญญาณที่เฉลี่ยเรียบร้อยแล้วมาหาค่ามากที่สุด และน้อยที่สุด ซึ่งระยะกระดกในการทดลองนี้นิยมว่าเป็นค่าเฉลี่ยของผลบวกของค่าสัมบูรณ์ทั้งสอง

ในความเป็นจริงหากกำหนดการเก็บข้อมูลของสัญญาณเป็นแบบ DC Coupling ลักษณะของสัญญาณขาออก (เส้นสีเขียว) ของรูปที่ 3.11 จะเลื่อนลงมาด้านล่างต่ำกว่าแกน x เพราะว่าแผ่นเมมเบรนจะกระดกขึ้นน้อยกว่ากระดกลง เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีขนาดลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากแท่งแม่เหล็ก แต่ในการนำไปใช้งานส่วนใหญ่จะสนใจระยะกระดกรวมทั้งหมด (Displacement stroke) ที่แอกซ์เวเตอร์ทำได้ จึงเป็นการสะดวกกว่าที่จะดูสัญญาณแบบ AC Coupling

3.3.1.3 การหาค่าความต่างเฟส

ความต่างเฟส (Phase lag) ของสัญญาณไฟฟ้าขาเข้าและการตอบสนองของแอกซ์เวเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณขาออกคือ ความแตกต่างของเวลาของสัญญาณกระแสลับ 2 สัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งวิธีการหาค่าความต่างเฟสที่นำมาพิจารณามี 2 วิธีด้วยกัน วิธีแรกคือ การนำค่าของเวลาที่แตกต่างกัน ณ จุดที่มีขนาดของสัญญาณประมาณ 0 องศา ระหว่างสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก (ผลต่างของเวลาที่จุด B และจุด A ในรูป 3.14) ที่ผ่านการเฉลี่ย (Moving Average ตามหัวข้อ 3.3.1.2) เรียบร้อยแล้วหารด้วยเวลาใน 1 คาบ (ผลต่างของเวลาที่จุด C และจุด A ในรูป 3.14) แล้วจึงคูณด้วย 360 องศาจะได้เป็นค่าความต่างเฟสใน 1 ګรณึ สำหรับวิธีที่สองคือ การหาค่าของเวลาที่แตกต่างกันจากจุดที่มีขนาดของสัญญาณสูงสุดระหว่างสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกที่ผ่านการเฉลี่ย (ผลต่างของเวลาที่จุด D และ E ในรูป 3.14) แล้วจึงนำผลต่างของเวลาที่ได้หารด้วยเวลาใน 1 คาบ สุดท้ายจึงคูณด้วย 360 องศาเช่นเดียวกับวิธีแรก

โดยในการศึกษานี้จะใช้วิธีการหาความต่างเฟสด้วยวิธีที่สอง คือ การหาค่าความแตกต่างของเวลาจากขนาดของสัญญาณสูงสุด เนื่องจากวิธีนี้จะทำให้ค่าความต่างเฟสไม่เกิดความคลาดเคลื่อนไป หากเปลี่ยนการเก็บข้อมูลเป็นแบบ DC Coupling ซึ่งสัญญาณขาออกอาจมีการเลื่อนตำแหน่งลงต่ำกว่าแกน ในทางตรงกันข้าม หากใช้วิธีการหาค่าความแตกต่างของเวลา

จากจุดที่มีขนาดสัญญาณเป็น 0 หากสัญญาณขาออกเลื่อนต่ำลงจากแกน x จะทำให้ จุดตัดแกน เลื่อนห่างออกจากกันมากขึ้น ผลของค่าความต่างเฟสจึงอาจคลาดเคลื่อนได้

3.3.2 ผลการทดสอบ

รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างการกระดกของแผ่นเมมเบรนที่ถูกนำมาใช้งานเป็นเมมเบรน แอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่เวลาต่างๆ ในการทดสอบ Dynamic response โดยขับที่ ความถี่ 2 เฮิรท์ ขนาดสัญญาณ 0.38 Vp-p โดยมีจุด A เป็นจุดอ้างอิงเพื่อให้เห็นการกระดกที่ ชัดเจนขึ้น โดยตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้นที่ 0 วินาทีแสดงในรูปที่ 3.15ก จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 3.15ข ใน เฟรมที่ 1/10 วินาทีและรูปที่ 3.15ค ในเฟรมที่ 4/10 วินาที จะเห็นความแตกต่างของระยะกระด ก ตำแหน่ง A ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นลักษณะของแผ่นเมมเบรนกระดกกลาง สำหรับผลการทดสอบ Dynamic response ถูกแบ่งเป็น 3 หัวข้อคือ ผลของความถี่ที่ขับต่อความถี่ที่ตอบสนองของ แอคชัวเอเตอร์ ผลของความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุด และผลของความถี่ที่ขับต่อความต่างเฟส ของสัญญาณเข้าและออก โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 ผลของความถี่ที่ขับต่อความถี่ที่ตอบสนองของแอคชัวเอเตอร์

ในส่วนนี้ต้องการดูผลของสัญญาณที่ขับว่ามีผลต่อการกระดกของแอคชัวเอเตอร์ ทำให้ความถี่ที่ตอบสนองออกมาเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ซึ่งพบว่า ความถี่สัญญาณตอบสนองที่ คำนวณออกมามีค่าเท่ากับความถี่ของสัญญาณที่ขับในช่วงความถี่ 2-6 เฮิรท์ ดังรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าแอคชัวเอเตอร์ที่ทำการทดสอบนั้นเคลื่อนที่ตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ใส่ให้

3.3.2.2 ผลของความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุด

รูปที่ 3.17 แสดงกราฟของผลของความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุดของแอคชัวเอ เตอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนเท่ากับ 2 และ 4 เซนติเมตร พบว่า ในช่วงความถี่ 2 – 8 เฮิรท์ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ระยะกระดกสูงสุดจะมีค่าลดลงทั้ง 2 ขนาด ในขณะที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิรท์ขึ้นไป ระยะกระดกสูงสุดของทั้งสองกรณีมีค่าน้อยมากประมาณ 1-2 ไมโครเมตร ซึ่งยังอยู่ ในช่วงของความคลาดเคลื่อนที่คำนวณมาได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะพิจารณาเฉพาะผลในช่วง 2 - 8 เฮิรท์เท่านั้น โดยพบว่าแอคชัวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร มีระยะกระดกสูงสุดเท่ากับ 15 และ 21 ไมโครเมตรที่ความถี่ 2 เฮิรท์ ตามลำดับ และจาก

ความสัมพันธ์ในความถี่ช่วงต้นประเด็นที่น่าสนใจ 2 ส่วนได้แก่ แถบความคลาดเคลื่อนมีค่าค่อนข้างสูงและลักษณะของกราฟที่มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆแสดงถึงระบบที่มีค่า damping ค่อนข้างสูง จึงทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุของประเด็นดังกล่าว

การที่ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดมีค่าสูงนั้นคาดว่าเกิดจาก ความแตกต่างของผลการทดลองในการวัดแต่ละครั้ง จึงได้นำผลการทดลองแต่ละครั้งมาเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.18 พบว่า ผลการทดลองครั้งที่ 2 จะมีค่าแตกต่างจากผลการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ค่อนข้างมาก กล่าวคือ ที่ความถี่ 2 เฮิรท์จะมีค่าระยะกระดกสูงสุดต่างกันถึงเกือบ 2 เท่า ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุของความแตกต่างในผลการทดลองในแต่ละครั้ง ซึ่งเรามุ่งความสนใจไปที่ค่าความตึงในการชิงแผ่นเมมเบรนซึ่งเดิมกำหนดให้มีคงที่ โดยตั้งสมมติฐานที่ว่า หากค่าความตึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะส่งผลให้ระยะกระดกเปลี่ยนไปค่อนข้างมาก เนื่องจากว่าวิธีในการชิงแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในงานนี้อาจจะไม่แม่นยำเพียงพอ ในการทดลองเพื่อดูผลของความตึงต่อระยะกระดกนี้ จะทำการทดลอง 2 กรณีเปรียบเทียบคือ กรณีที่ไม่มีชิงแผ่นเมมเบรน (ความตึงเท่ากับ 0) และกรณีที่มีค่าความตึงเท่ากับ 0.1 ซึ่งเท่ากับการทดลองที่ผ่านมา ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.19 พบว่า แอคชัวเอเตอร์ที่มีความตึงเท่ากับ 0 จะให้ระยะกระดกมากกว่า แอคชัวเอเตอร์ที่มีความตึง 0.1 ค่อนข้างมาก โดยที่ความถี่ 2 เฮิรท์จะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกันถึงเกือบ 6 เท่า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพอสรุปเบื้องต้นได้ว่า ความแม่นยำในการชิงเมมเบรนในแต่ละครั้งจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้นได้

สำหรับในประเด็นที่กราฟในรูปที่ 3.17 มีพฤติกรรมแบบ damping สูงนั้น แสดงได้จากการนำกราฟมาพิจารณาเปรียบเทียบกับกราฟ Amplitudes of Forced vibration ตามทฤษฎีที่แสดงในรูปที่ 3.20 พบว่า แอคชัวเอเตอร์ที่ทำการทดสอบทั้งสองกรณี มีพฤติกรรมใกล้เคียงเส้นกราฟ $c/c_c = 1$ ซึ่งค่า c แสดงถึงค่า damping และ c_c คือค่า damping ที่จุดวิกฤต (Critical Damping) ทั้งนี้การที่ระบบแสดงพฤติกรรมที่มีค่า damping สูงในลักษณะนี้ อาจเกิดจากลักษณะรูปร่างของแอคชัวเอเตอร์ที่ทำการทดสอบ โดยวิธีการประกอบแอคชัวเอเตอร์ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.1.2 จะทำให้เกิดโพรงอากาศปิด (Air cavity) ดังรูปที่ 3.21ก ขึ้นระหว่างแผ่นเมมเบรนกับฐานแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้ค่า damping ของระบบสูงสุด ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเพื่อเปรียบเทียบผลระหว่างแอคชัวเอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นโพรงอากาศเปิดและปิด ดังรูปที่ 3.21ข

ผลการทดลองแสดงดังกราฟรูปที่ 3.22 พบว่า ที่ช่วงความถี่ 2 – 8 ที่ขนาดแอกซ์เอเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกันคือ 4 เซนติเมตร แอกซ์เอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นโพรงอากาศเปิดจะให้ระยะกระดกสูงสุดมากกว่าแอกซ์เอเตอร์ที่มีลักษณะเป็นโพรงอากาศปิด โดยที่ความถี่ 2 เฮิรท์ จะมีความแตกต่างกันของระยะกระดกสูงสุดถึงเกือบ 3 เท่า จากผลการทดลองนี้ได้ข้อสรุปว่า โพรงอากาศมีผลต่อระยะกระดกสูงสุดของแอกซ์เอเตอร์ แต่ทั้งนี้การที่แอกซ์เอเตอร์มีลักษณะเป็นโพรงอากาศเปิดก็ยิ่งทำให้ระบบแสดงพฤติกรรมในรูปแบบของ damping ที่สูงเช่นเดิม

3.3.2.3 ผลของความถี่ที่ขั้วต่อความต่างเฟสของสัญญาณไฟฟ้าและการเคลื่อนที่ของแอกซ์เอเตอร์

ผลของความถี่ที่ขั้วต่อความต่างเฟสถูกแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งพบว่า ที่ความถี่ 2-6 เฮิรท์แอกซ์เอเตอร์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนทั้งสองกรณี เมื่อความถี่ที่ขั้วมากขึ้น ค่าความต่างเฟสจะมีความมากขึ้น โดยมีแนวโน้มแบบเชิงเส้นตรง

ในการทดสอบ Dynamic response นอกจากผลการทดสอบหลักที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้น ในงานนี้ได้ทำการทดสอบความทนทาน (Robustness) ของแอกซ์เอเตอร์ โดยการใช้งานแอกซ์เอเตอร์ที่เวลาต่างกันคือ 0, 1 และ 7 ชั่วโมง ทดสอบที่ความถี่เดียวกันคือ 5 เฮิรท์ ขนาดสัญญาณเท่ากับ 0.38 Vp-p และทำการวัดระยะกระดกแบบ Static เพื่อเปรียบเทียบผล หลังจากการใช้งานแอกซ์เอเตอร์เป็นเวลาดังกล่าวแล้ว ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกกับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.24 พบว่า ระยะกระดกที่เกิดขึ้นที่เวลาเริ่มต้นจนผ่านไป 7 ชั่วโมงหรือการใช้งานที่ประมาณ 120,000 รอบ มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยต่างกันเพียงประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่าแอกซ์เอเตอร์มีความทนทานค่อนข้างดี สำหรับอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 33 องศาเซลเซียส เมื่อใช้งานไป 7 ชั่วโมงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 2 องศาเป็น 35 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าไม่สูงนักและมีการถ่ายเทออกจากแอกซ์เอเตอร์อย่างเพียงพอ

3.4 สรุปผล

บทนี้ได้กล่าวถึงการนำแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่มาใช้งานเป็นไมโครแอกซ์เอเตอร์ โดยการสร้างไมโครเมมเบรนแอกซ์เอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า เริ่มจากการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์จากกระบวนการสร้างในบทที่ 2 ให้มีความหนาของฟิล์ม PDMS 300

ไมโครเมตร ภายในมีคอยล์ของทองแดงหนา 40 ไมโครเมตร รูปร่างวงกลมชั้นเดียวฝังอยู่ที่บริเวณ จุดศูนย์กลางของคอยล์มีทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เพื่อให้เป็นจุดวัดระยะ กระดก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่เหล็กคือ 1 เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศตั้งฉากจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณขอบของแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้แรงแม่เหล็กมีค่าสูงตามไปด้วย สำหรับความกว้างของคอยล์เท่ากับ 500 ไมโครเมตร ส่วนขาของคอยล์มีความยาว 4 เซนติเมตร และมีพื้นที่ไว้สำหรับต่อสายไฟขนาด 9 ตาราง มิลลิเมตร การประกอบเป็นเมมเบรนแอคชูเอเตอร์เริ่มจาก การนำแผ่นอะคริลิกใสที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เจาะรูวงกลมที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน แล้วนำมา ประกอบบนล่างของแผ่นเมมเบรนโดยวางให้จุดศูนย์กลางของคอยล์ทองแดงอยู่ตรงกับจุด ศูนย์กลางของรูวงกลม หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานมาติดกับฐานอะคริลิกซึ่งมีแม่เหล็กถาวรวางอยู่ ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างคอยล์กับแม่เหล็กจะถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับขนาดความหนาของแผ่น อะคริลิก คือ 1 มิลลิเมตร สำหรับความตึงควบคุมโดยการซึ่งแผ่นเมมเบรนให้มีค่า pre-strain ที่ นิยามด้วยอัตราส่วนระหว่างระยะที่ยืดออกของแต่ละด้านต่อรัศมีของเมมเบรนซึ่งกำหนดให้คงที่ เท่ากับ 0.1

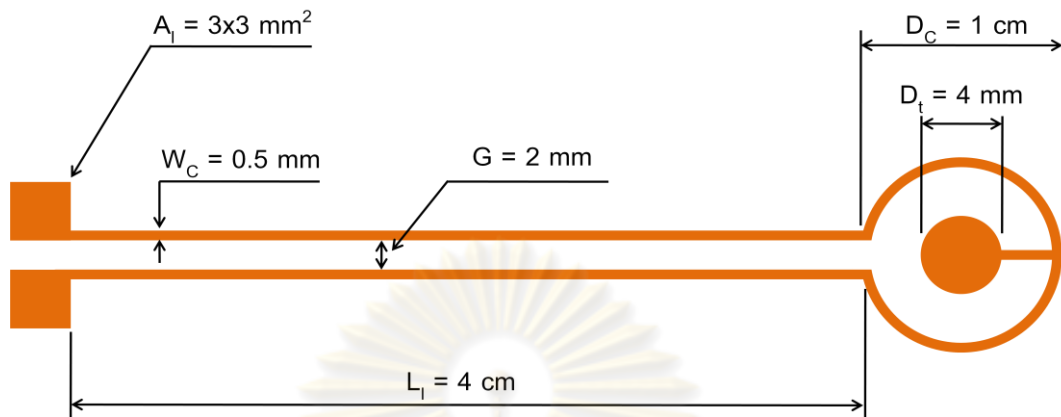
ผลการทดสอบของ Static response โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดกระแสไฟฟ้า ต่างกัน 5 ค่า คือ 1.41, 2.00, 2.45, 2.83 และ 3.16 แอมแปร์ ไปที่แอคชูเอเตอร์ พบว่า เมื่อ กระแสที่ใส่ให้แอคชูเอเตอร์เพิ่มขึ้น ระยะกระดกจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง โดยระยะกระดกของ แอคชูเอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 เซนติเมตรเท่ากับ 25 และ 73 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่พลังงานที่ป้อน 1 วัตต์หรือกระแสที่จ่าย 3.16 แอมแปร์ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่จ่าย เท่ากัน แอคชูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตรจะให้ระยะกระดกสูงกว่า แอคชูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ผลการทดสอบยังพบว่า เมื่อพลังงานที่ ป้อนให้กับแอคชูเอเตอร์มากขึ้น ระยะกระดกจะมีค่าสูงขึ้นเป็นความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ดังนั้น หากต้องการให้ได้ระยะกระดกมาก จะต้องใส่พลังงานให้กับแอคชูเอเตอร์มากขึ้นเช่นกัน

ผลการทดสอบ Dynamic response โดยการป้อนสัญญาณไฟฟ้าในลักษณะ Sinusoidal wave ที่มีความถี่ต่างกันตั้งแต่ 2 - 200 เฮิรท์ และกำหนดพลังงานสูงสุดที่ใส่แก่แอคชูเอเตอร์มี ขนาดเท่ากันคือ 0.36 วัตต์หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายเท่ากับ 1.9 แอมแปร์ พบว่า ที่ความถี่ 2-6 เฮิรท์ ความถี่ที่ตอบสนองของแอคชูเอเตอร์จะเท่ากับความถี่สัญญาณที่ใส่ให้กับแอคชูเอเตอร์

อีกทั้งในช่วงความถี่ 2 – 8 เฮิรท์ซ์ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลากระดกสูงสุดจะมีค่าลดลง ในขณะที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิรท์ซ์ขึ้นไป ระยะเวลากระดกสูงสุดของทั้งสองกรณีมีค่าน้อยมากประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โดยที่ความถี่ 2 เฮิรท์ซ์ แอคชัวเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตรจะให้ระยะเวลากระดกสูงสุดเท่ากับ 15 และ 21 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นความต่างเฟสของสัญญาณก็จะมีค่ามากขึ้นตาม อีกทั้งในการทดสอบยังพบเพิ่มเติมว่า แอคชัวเอเตอร์ที่มีโพรงอากาศปิดอยู่ด้านในจะมีผลทำให้ค่า damping ของระบบมากขึ้น ซึ่งทำให้ระยะเวลากระดกมีค่าน้อยกว่าแอคชัวเอเตอร์ที่เป็นลักษณะโพรงอากาศเปิดเล็กน้อย และเมื่อทำการทดสอบการใช้งานที่ความถี่ 5 เฮิรท์ซ์ ขนาดสัญญาณเท่ากับ 0.38 Vp-p ที่เวลาต่างกัน คือ 0, 1 และ 7 ชั่วโมงพบว่าที่ระยะเวลากระดกมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์



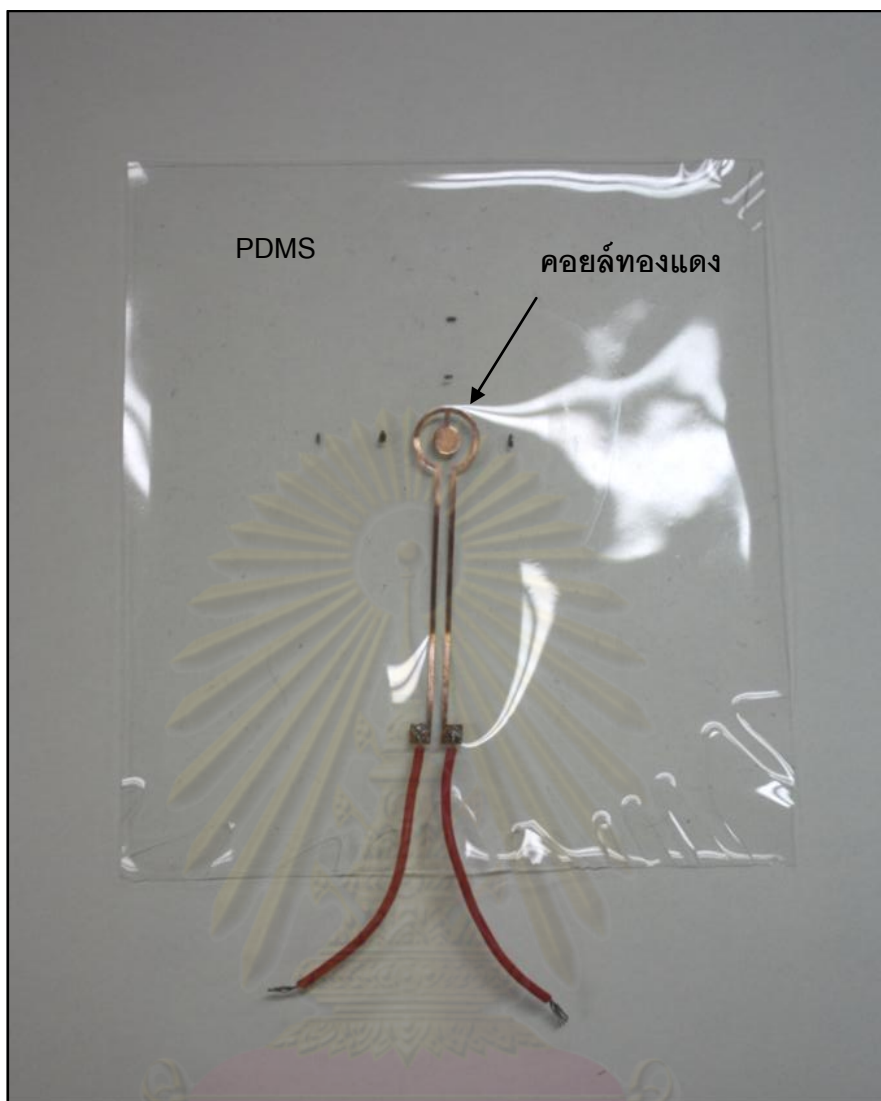
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของคอยล์ทองแดงที่ใช้ทดสอบ

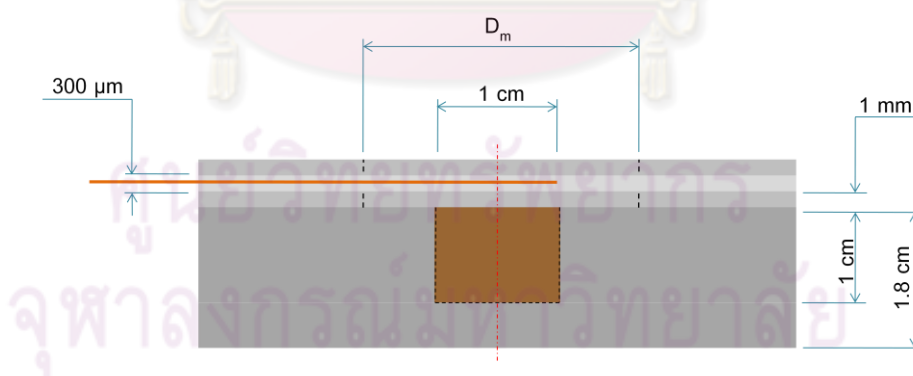
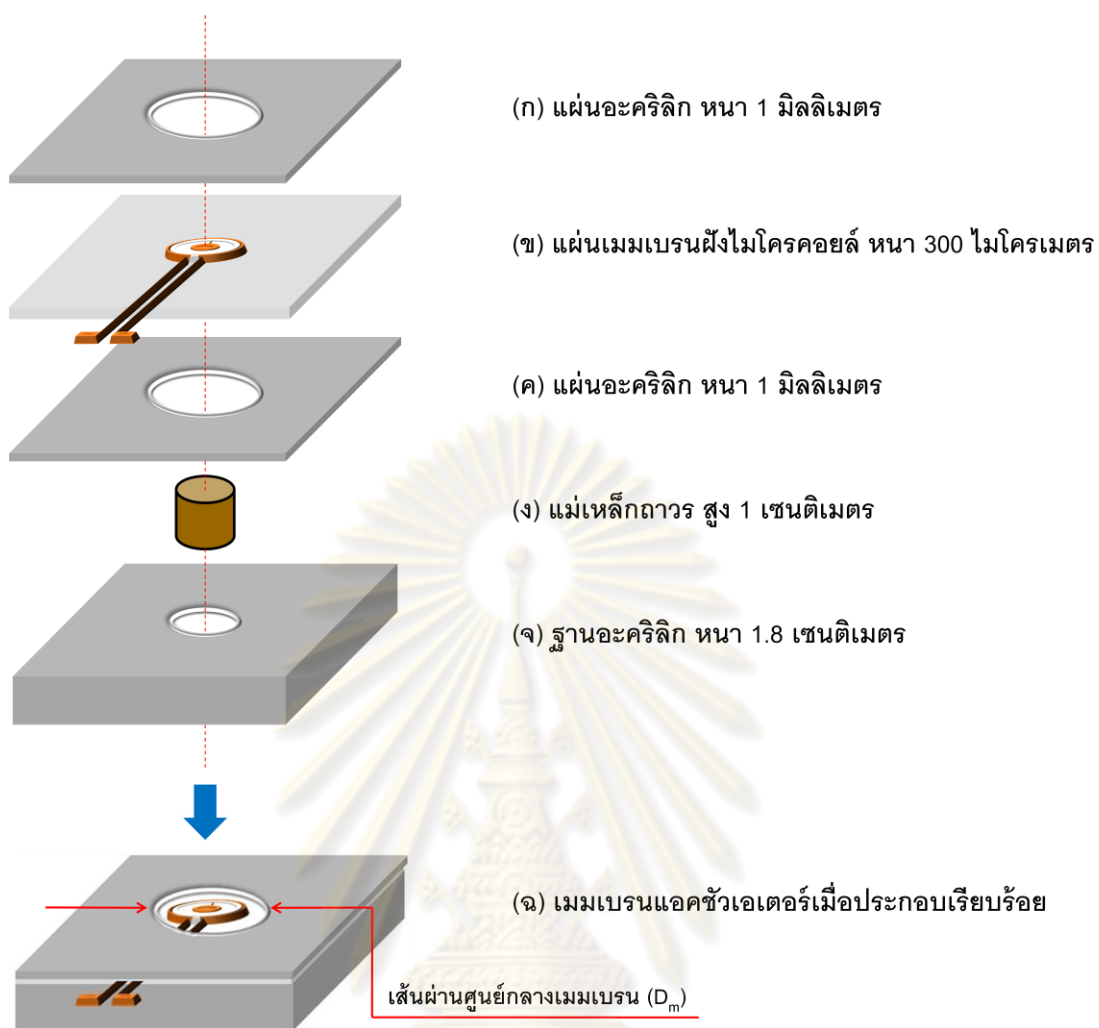


รูปที่ 3.2 เครื่องมือวัด Laser displacement sensor



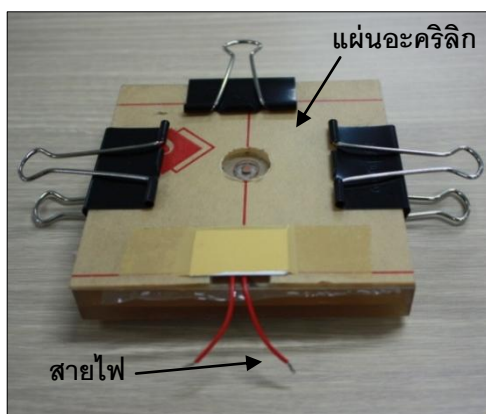
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์ทองแดงที่ใช้ในการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

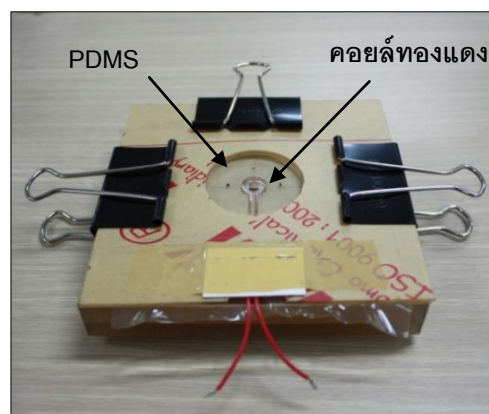


(ซ) รูปแสดงภาพตัดขวางหลังจากประกอบเสร็จ

รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมการประกอบเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์และภาพตัดขวาง

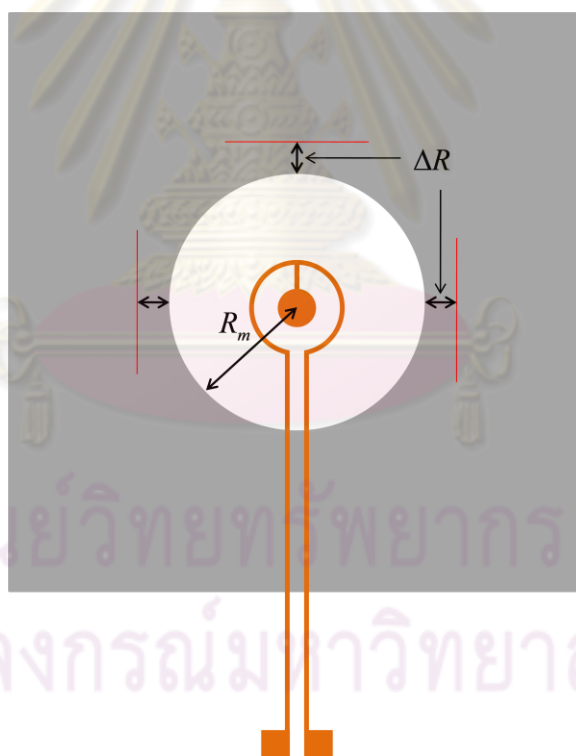


(ก)

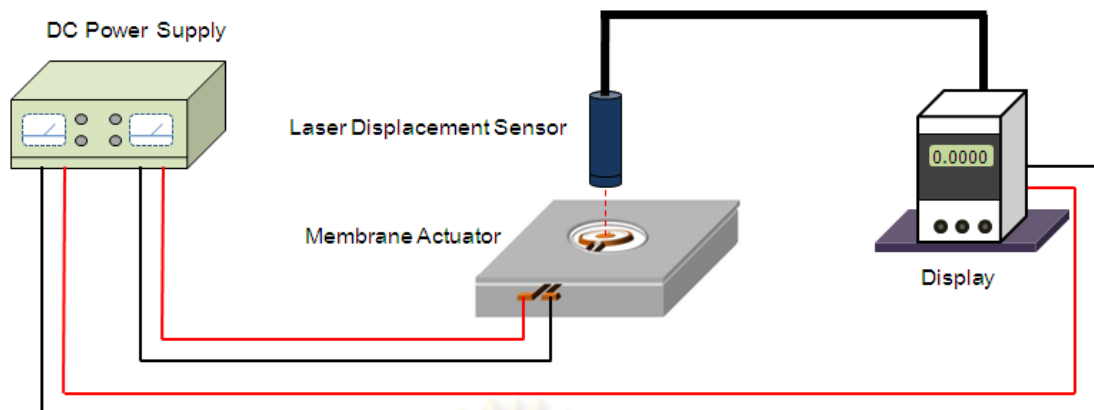


(ข)

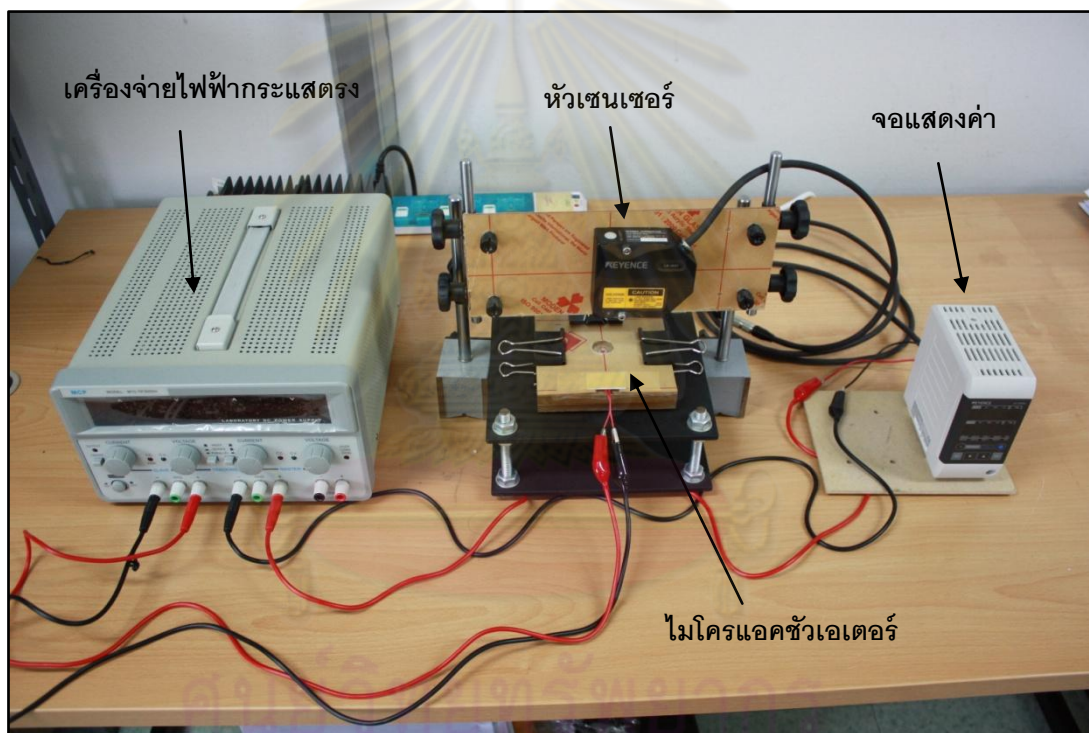
- รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายของเมมเบรนแอคซิวเอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ
- (ก) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนเท่ากับ 2 เซนติเมตร
- (ข) กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรนเท่ากับ 4 เซนติเมตร



- รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมพารามิเตอร์ของการซึ่งแผ่นเมมเบรนในการประกบเข้ากับแผ่นอะคริลิก



(ก)



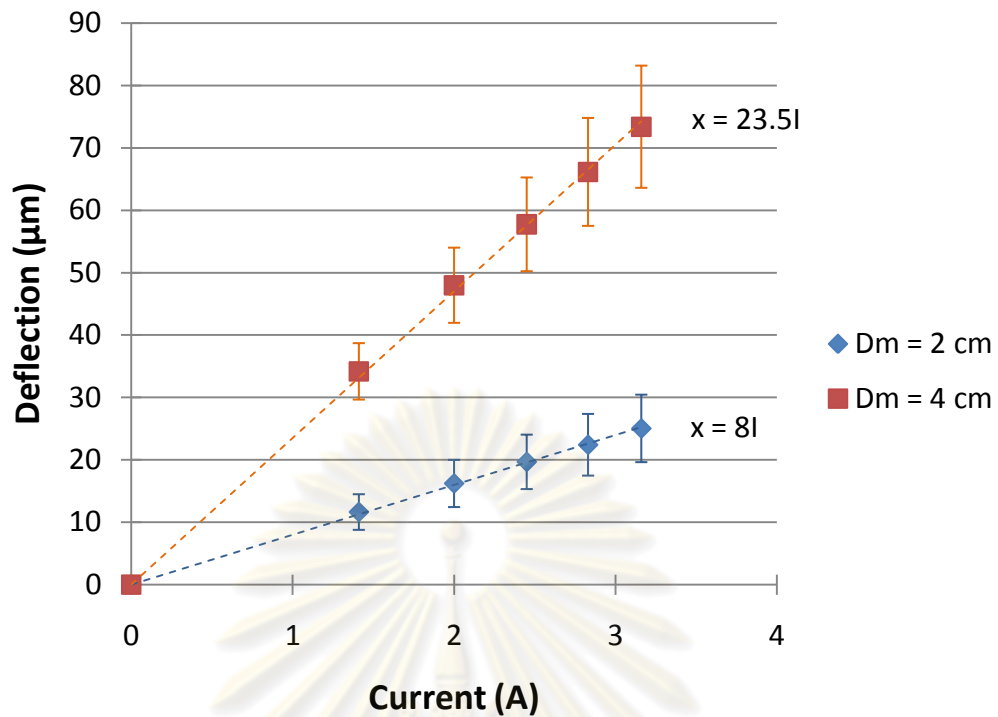
(ข)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

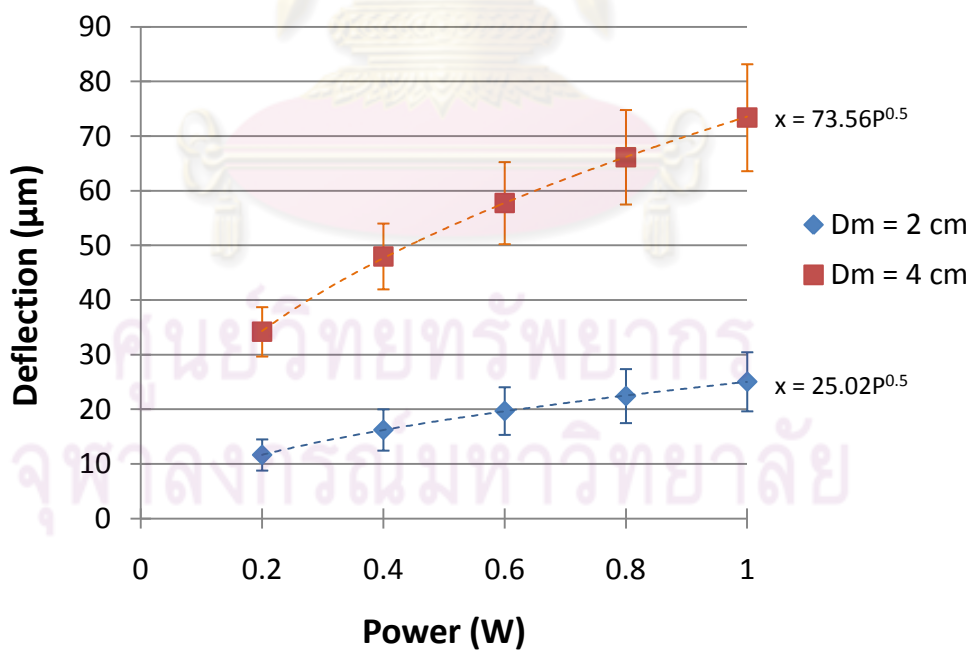
รูปที่ 3.7 การติดตั้งชุดทดสอบเพื่อทดสอบ Static Response

(ก) ไดอะแกรมการติดตั้งชุดทดสอบ

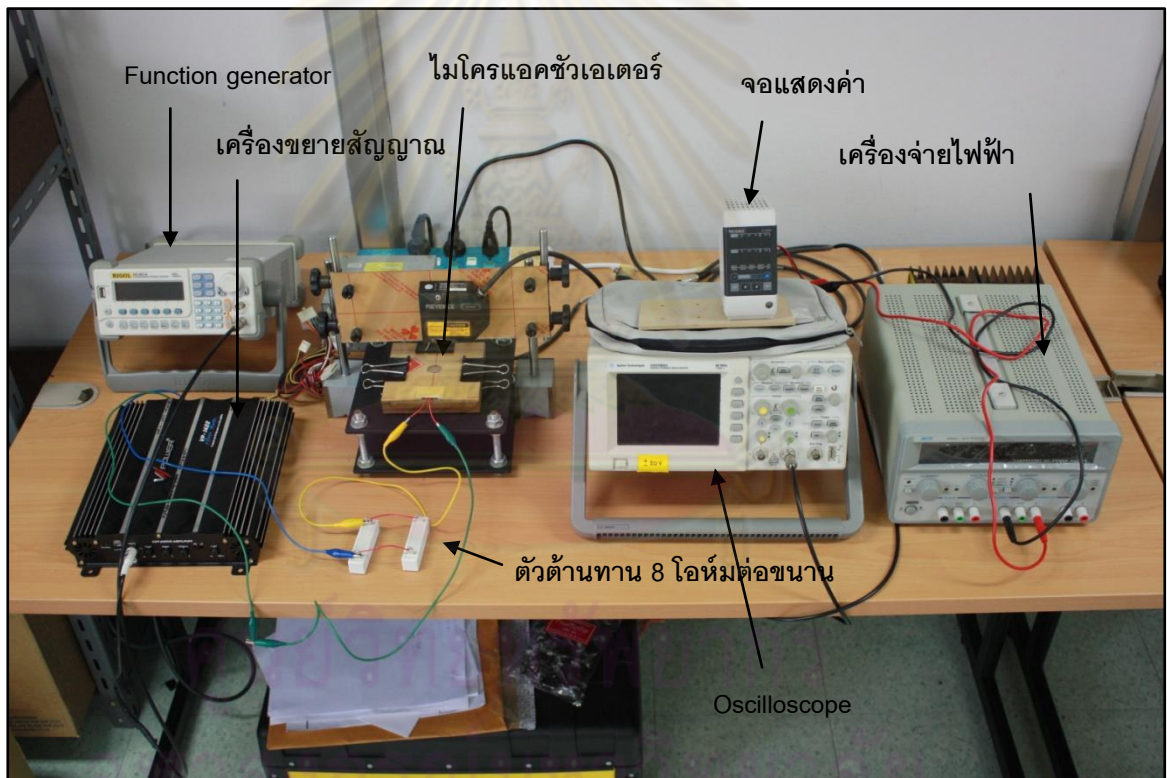
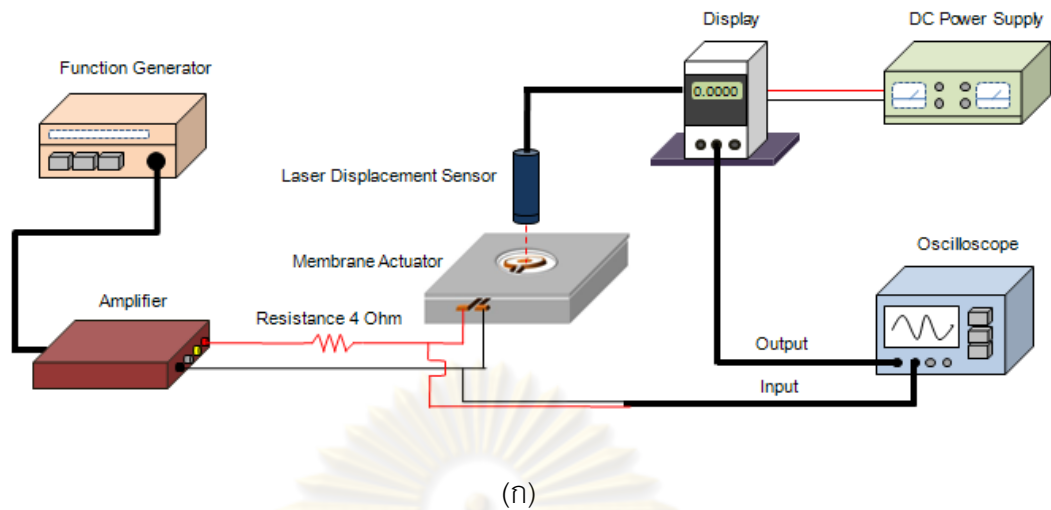
(ข) ภาพถ่ายจริงของชุดทดสอบ



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายต่อระยะกระดก



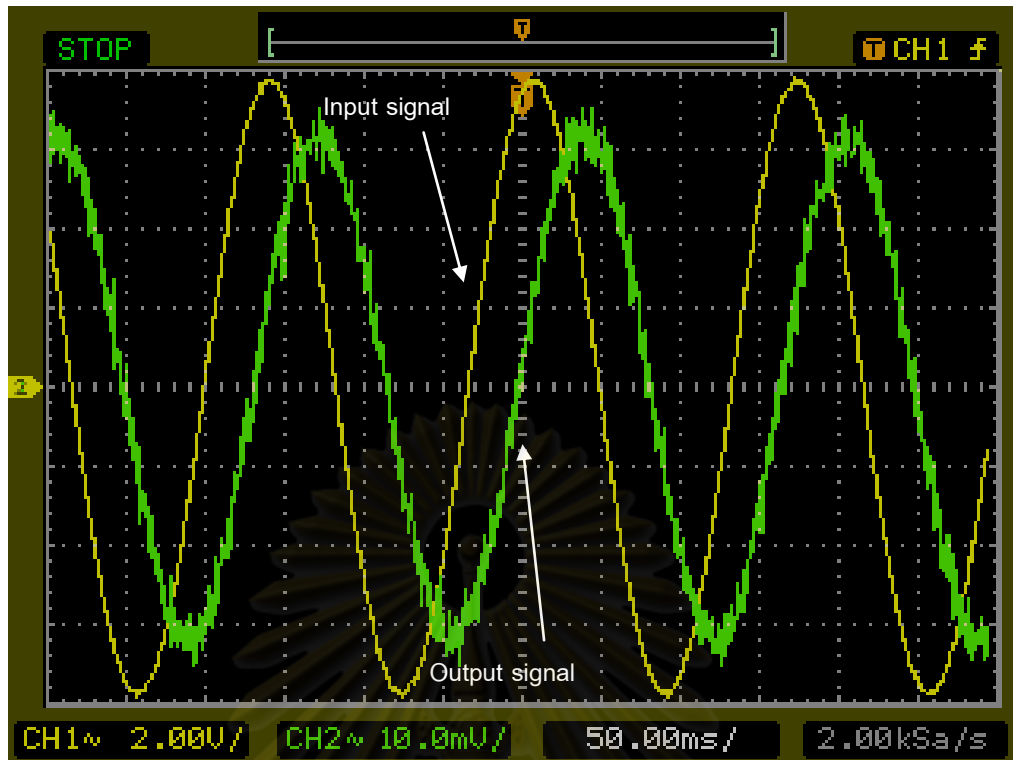
รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ป้อนให้แอกซ์เวเตอร์ต่อระยะกระดก



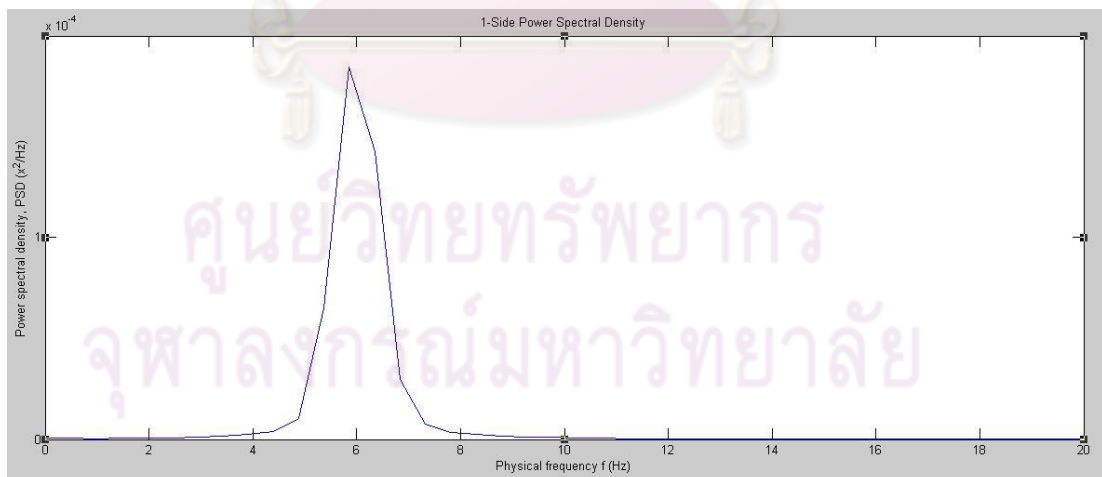
รูปที่ 3.10 การติดตั้งชุดทดสอบเพื่อทดสอบ Dynamic response

(ก) ไดอะแกรมการติดตั้งชุดทดสอบ

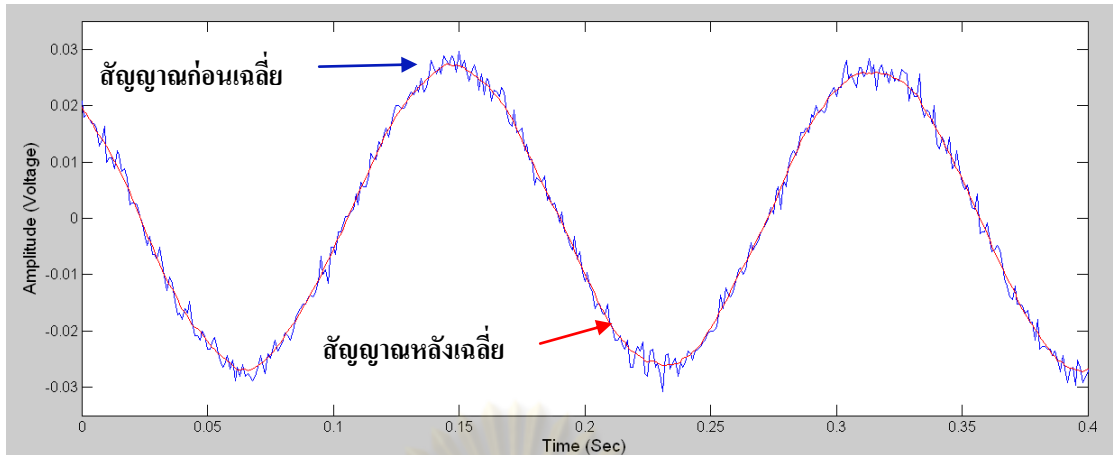
(ข) ภาพถ่ายจริงของชุดทดสอบ



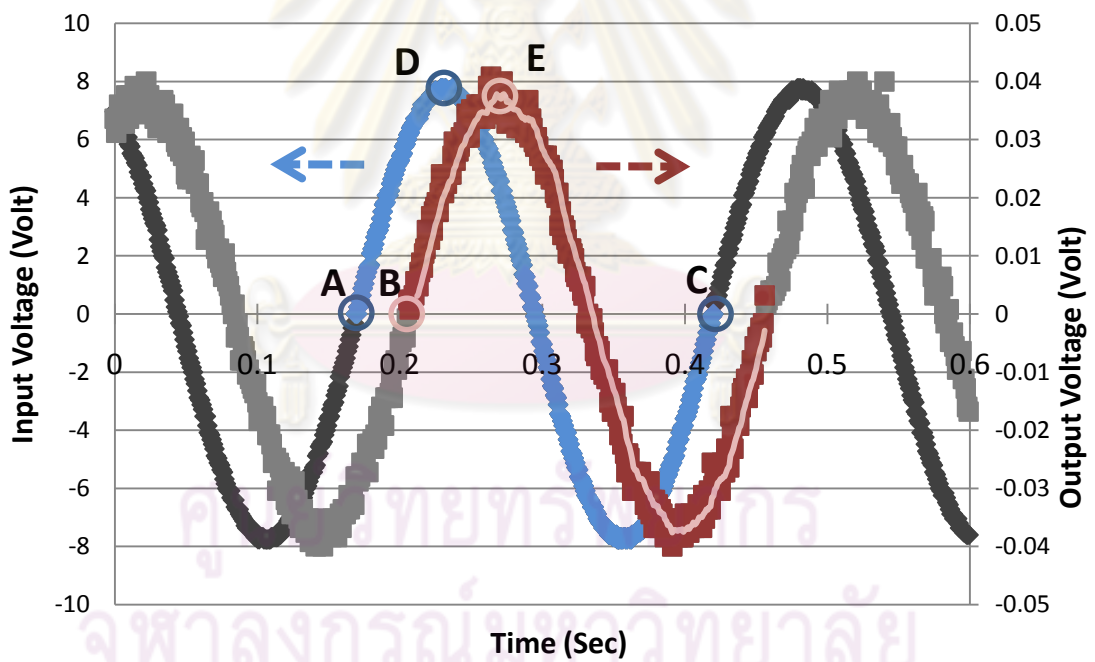
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างสัญญาณขาออกที่แสดงบนออสซิลโลสโคป (กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร ที่ความถี่ 6 เฮิรท์ซ์ และขนาดสัญญาณขาเข้าเป็น 0.38 Vp-p)



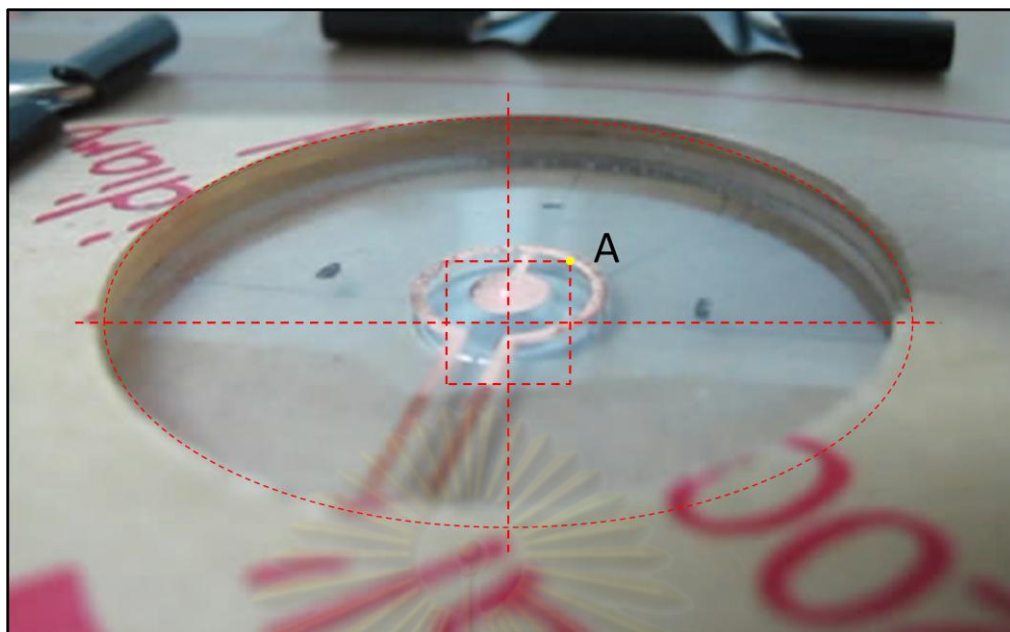
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างกราฟแสดง Power Spectrum Density ณ ตำแหน่งค่าความถี่ขาออก



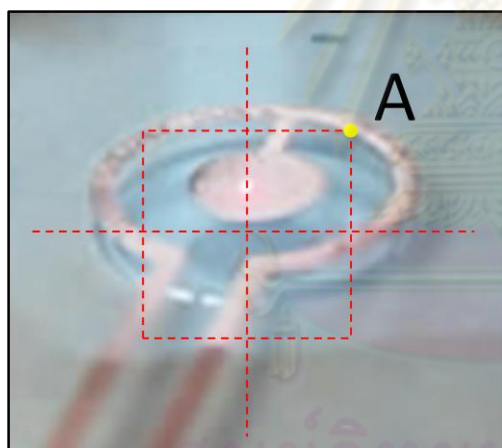
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างกราฟของสัญญาณขาออกที่ผ่านการเฉลี่ยแบบ Moving Average (กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร ที่ความถี่ 6 เฮิรท์ซ์ และขนาดสัญญาณขาเข้าเป็น 0.38 Vp-p)



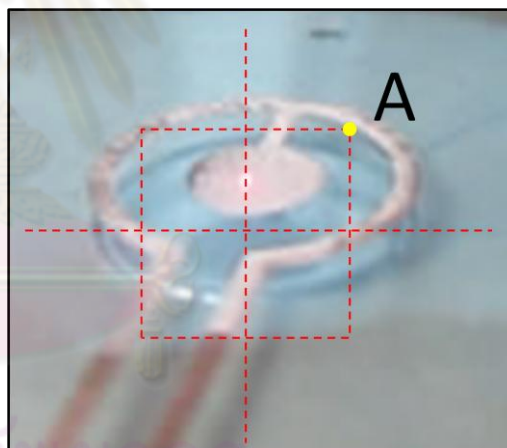
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างกราฟแสดงลักษณะของสัญญาณที่ต่างเฟสกันระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออก (กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร ที่ความถี่ 6 เฮิรท์ซ์)



(ก)



(ข)



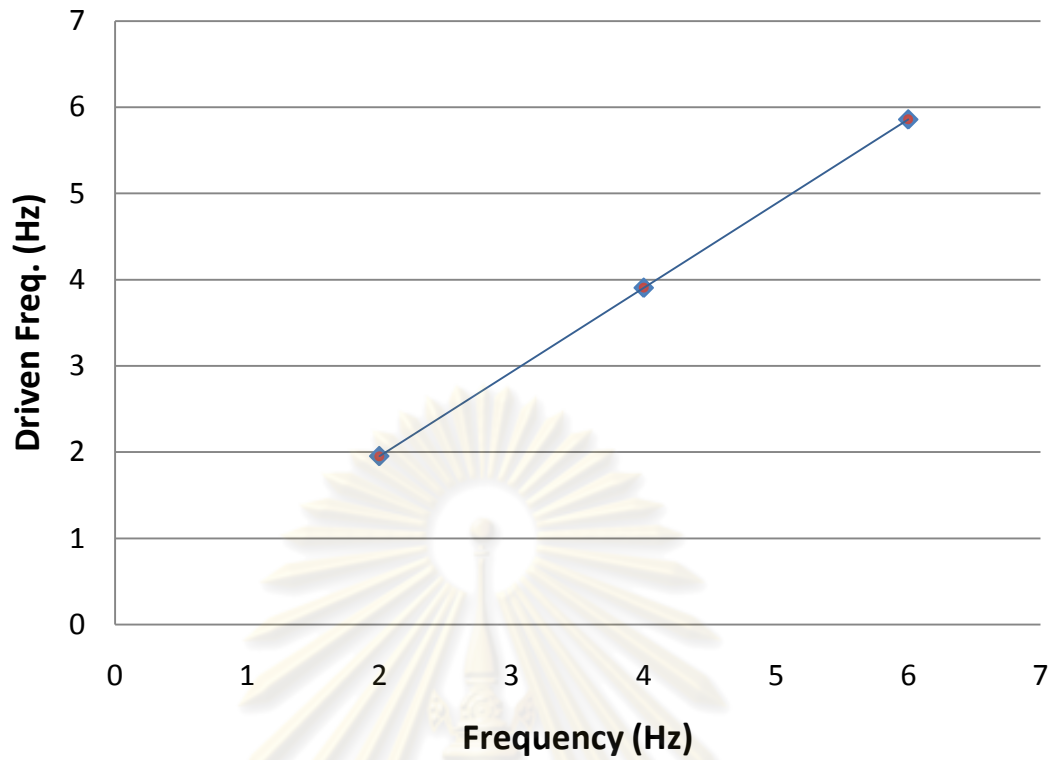
(ค)

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการกระดกของแผ่นเมมเบรนที่เวลาต่างๆ ในการทดสอบ Dynamic response โดยขับที่ความถี่ 2 เฮิรท์ซ ขนาดสัญญาณ 16 Vp-p

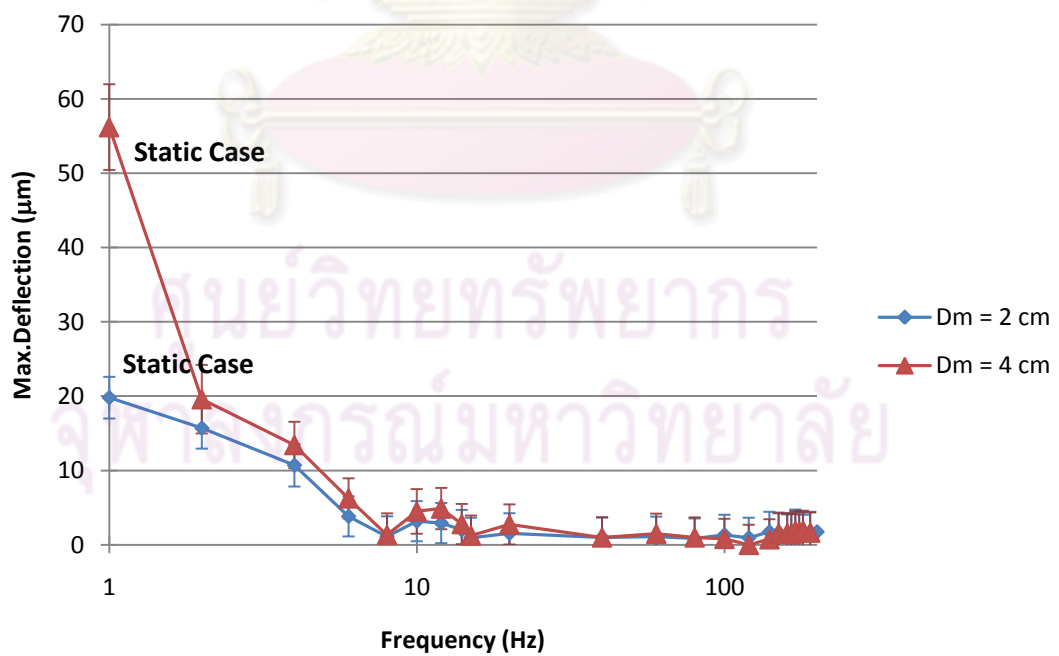
(ก) เฟรมที่ 0 วินาที

(ข) เฟรมที่ 1/10 วินาที

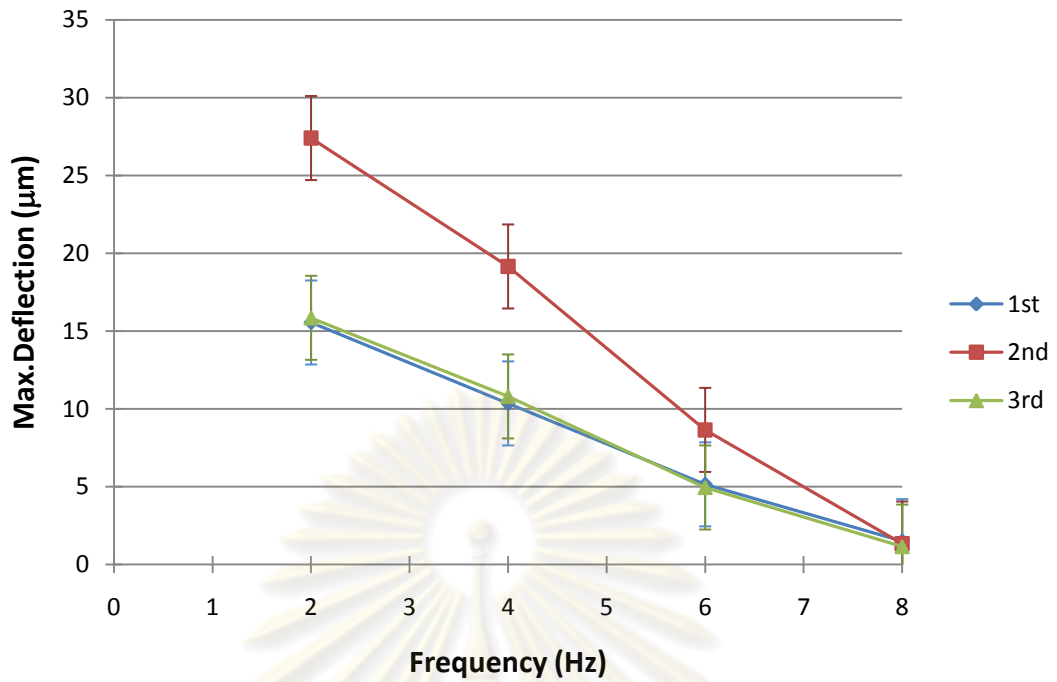
(ค) เฟรมที่ 4/10 วินาที



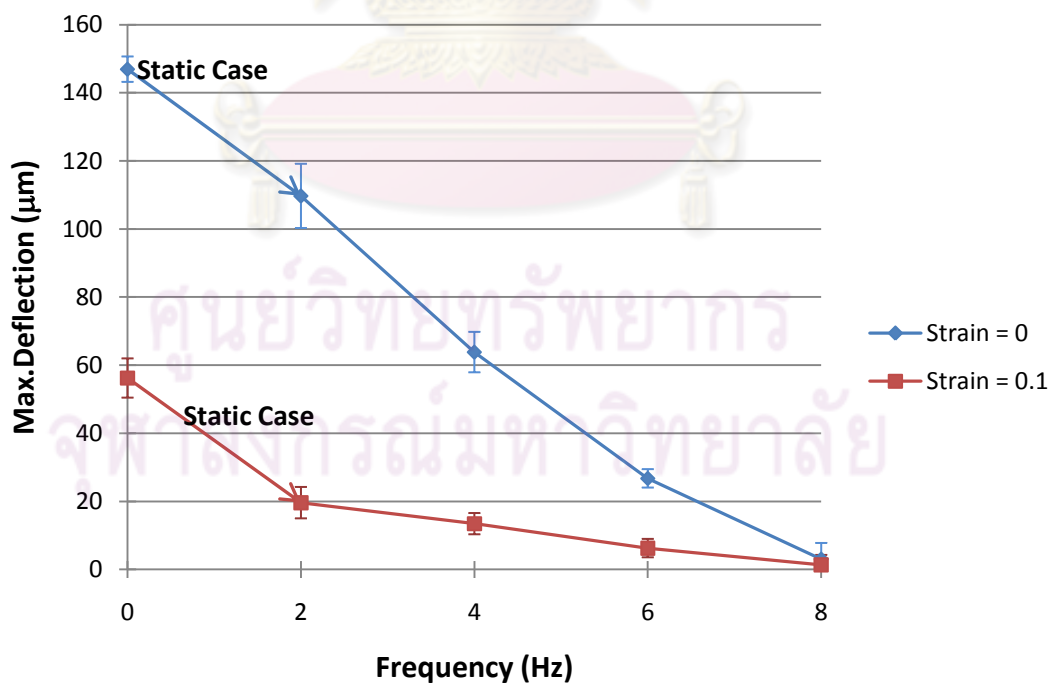
รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ขาเข้าและความถี่ขาออก



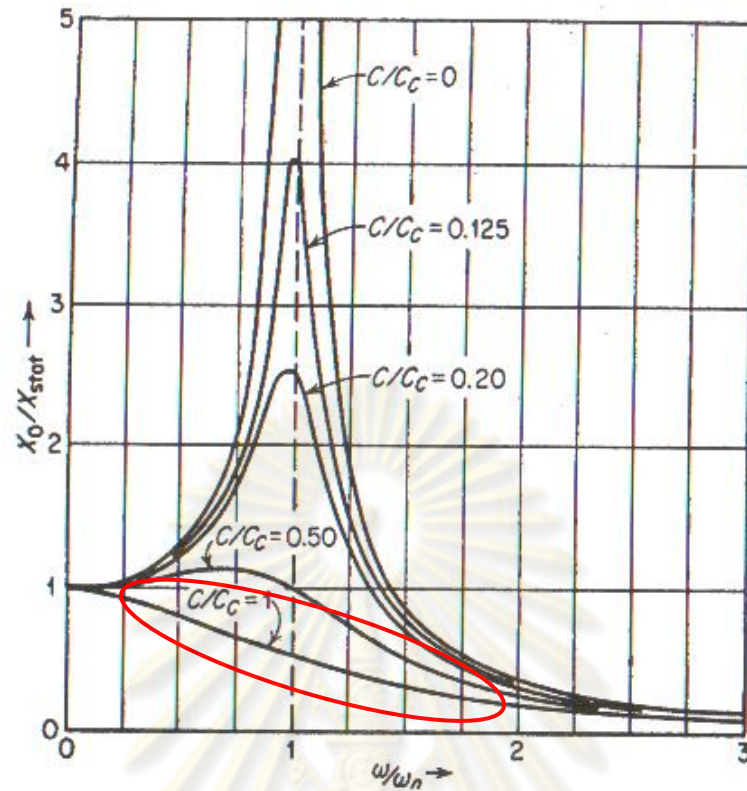
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ขับกับระยะกระดกสูงสุดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซัปกับระยะกระดกสูงสุดในแต่ละครั้งในช่วงความถี่ 2 – 8 เฮิรท์ซ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร

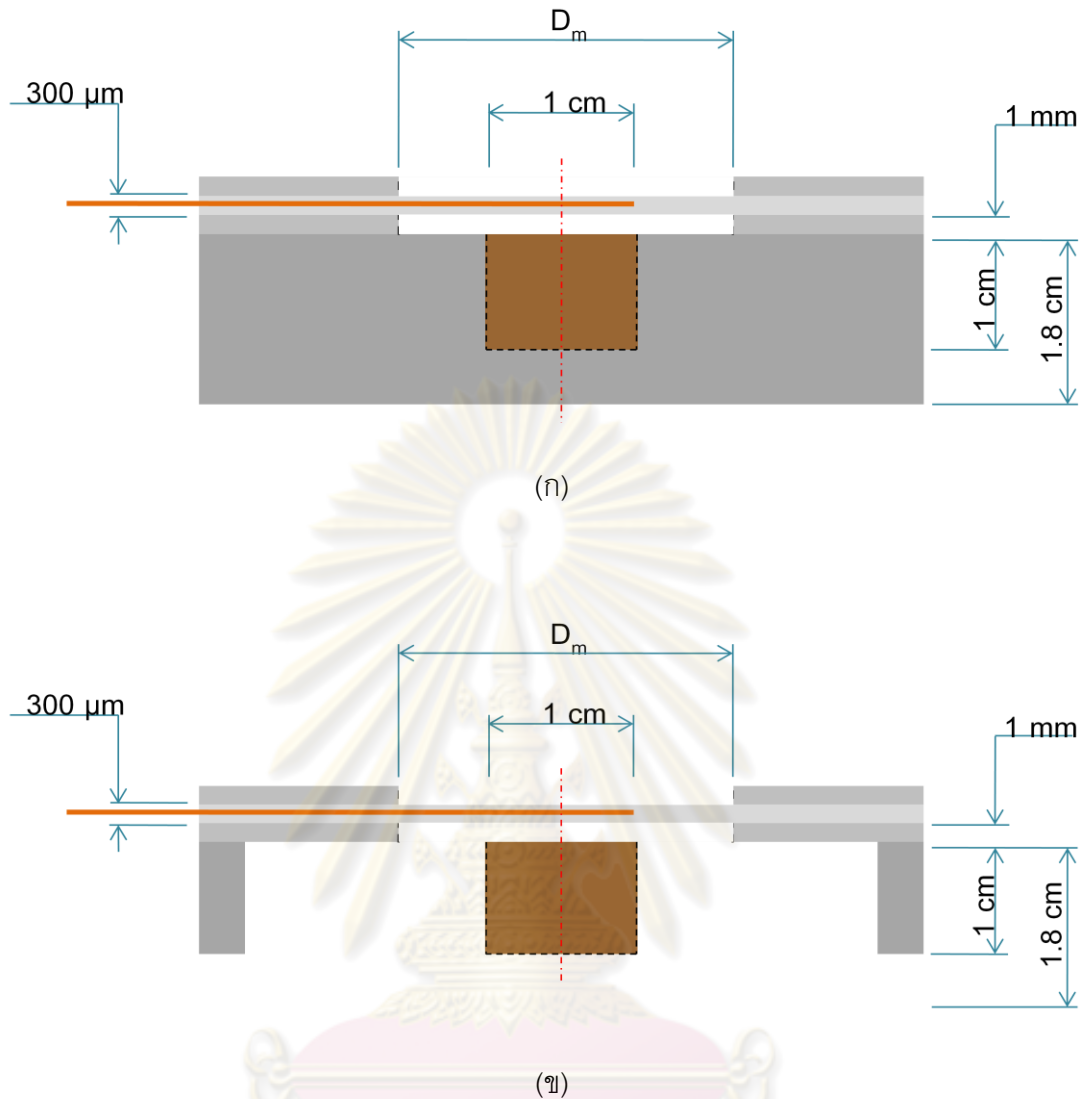


รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซัปกับระยะกระดกสูงสุดที่ความตึงต่างกัน ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงขนาดของ Forced vibration ที่ค่า damping ต่างๆกัน
(Den hartog et al. (1984))

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

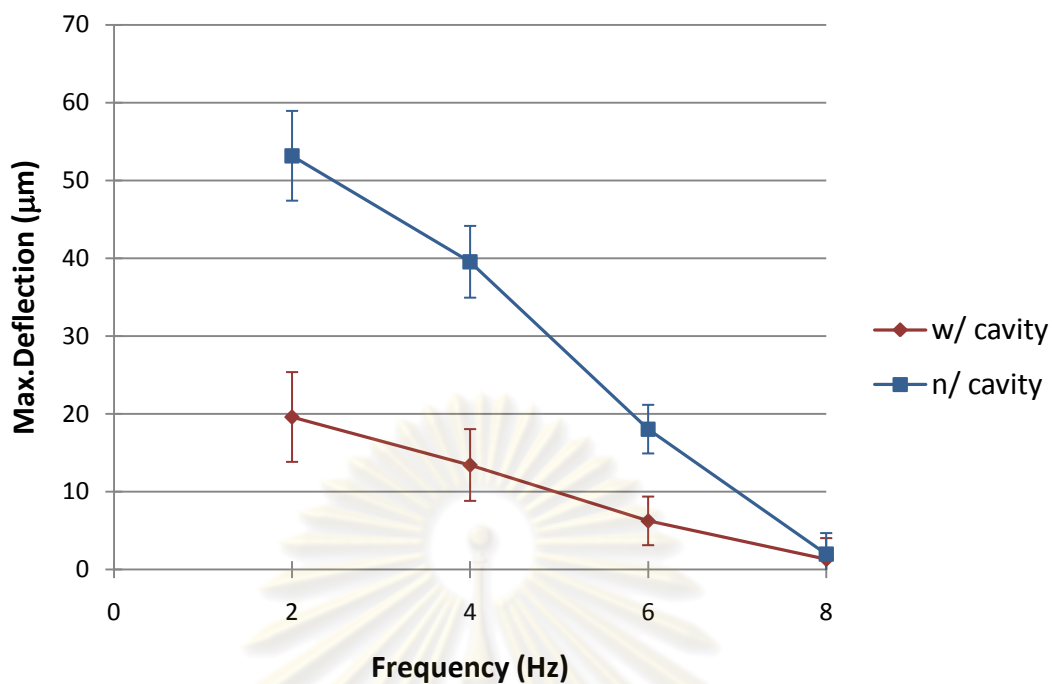


รูปที่ 3.21 ไดอะแกรมแสดงลักษณะแอดซัวเอเตอร์

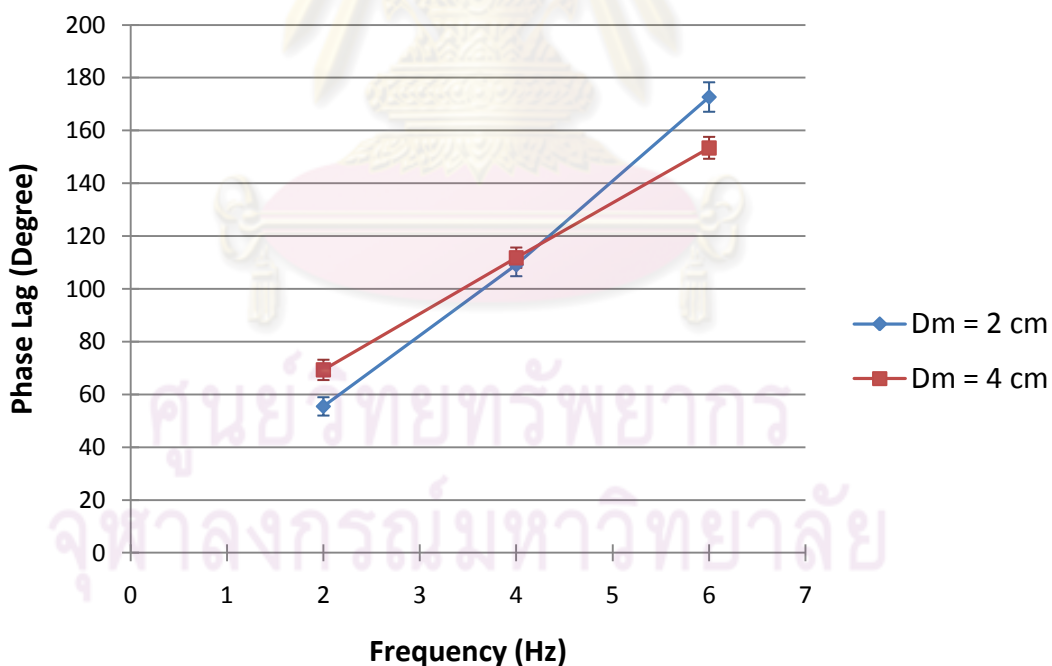
(ก) โพรงอากาศปิด

(ข) โพรงอากาศเปิด

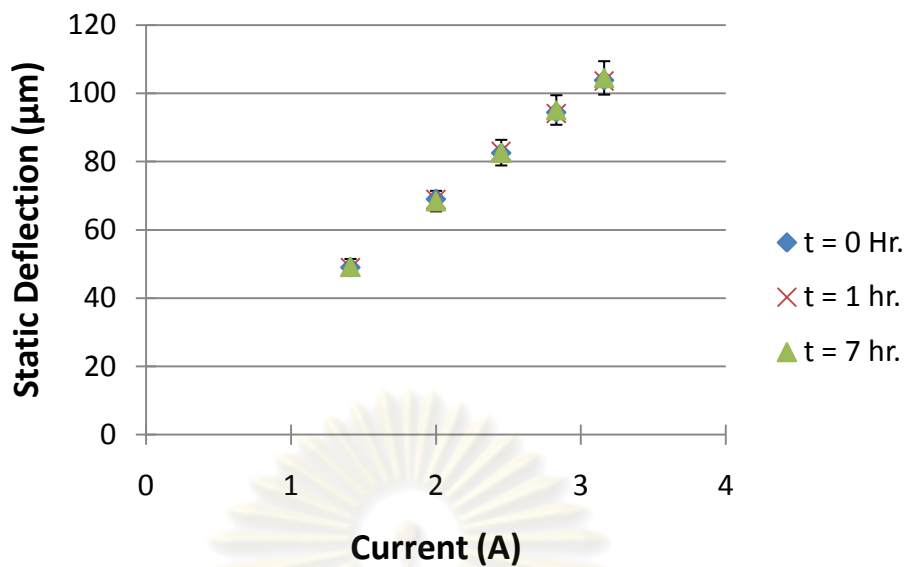
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซึบกับระยะกระดกสูงสุดของแอดซิวเอเตอร์ที่มีโพรงอากาศเปิดและปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตร



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ซึบกับความต่างเฟสที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตร



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายกับระยะกระดกแบบ Static เมื่อใช้งาน แอคชูเอเตอร์ที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้งานที่ความถี่ 5 เฮิรตซ์ ขนาดสัญญาณ 0.38 Vp-p

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

สรุปผลการศึกษา

4.1 ข้อสรุปของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์และนำมาสาธิตการใช้งานเป็นส่วนประกอบในเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการสร้างที่มีขั้นตอนที่ง่ายไม่ซับซ้อน หลีกเลียงกระบวนการกัดจากด้านหลัง (backside etching) ซึ่งจะทำให้สร้างได้อย่างรวดเร็วขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการสร้างสำหรับกระบวนการสร้างที่ได้พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ กระบวนการสร้างคอยล์ทองแดง และกระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบ โดยกระบวนการแรกนั้นเริ่มจากการสร้างแบบหล่อที่มีรูปร่างของคอยล์ตามทีออกมาในขั้นตอนที่เรียกว่า Photolithography ซึ่งเริ่มจากการเคลือบ Negative Photoresist บนแผ่นสแตนเลสที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นำแผ่นแบบมาวางทับด้านบนแล้วทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 20 วินาที หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร เพื่อล้าง Photoresist ในส่วนที่ไม่กระทบแสงออกไป สุดท้ายจึงนำแบบหล่อที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพื่อระเหยน้ำออก ในการพัฒนาพบว่าควรกดทับแผ่นแบบกับโฟโตรีซิสด้วยแรงอย่างน้อย 0.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เพื่อลดช่องว่างระหว่างแบบกับฟิล์มโฟโตรีซิสและลดความผิดพลาดของขนาดของแบบหล่อ หลังจากได้แบบหล่อแล้ว นำแบบหล่อที่ได้ไป Electroplating โดยแช่แบบหล่อในสารละลาย CuSO_4 พารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในขั้นตอนนี้คือ Current density ซึ่งในการศึกษาพบว่า อัตราการปลูกฟิล์ม (Deposition rate) จะเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับ Current density โดยในการศึกษานี้ใช้ Current density เท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีอัตราการปลูกฟิล์มประมาณ 17 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง อีกทั้งยังควรคำนึงความขรุขระของแผ่นสแตนเลสที่ใช้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กระดาษทรายเบอร์ 1500 ในการขัดผิวจะได้ค่าความขรุขระของผิวสแตนเลสเท่ากับ 0.112 ไมโครเมตร ซึ่งการขัดผิวจะทำให้คอยล์ของทองแดงที่มีขนาดน้อยกว่า 32 ตารางมิลลิเมตร หลุดออกมาทุกชิ้น ในขั้นตอนที่สองคือการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบคอยล์ เพื่อที่สร้างแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ภายใน การพัฒนากระบวนการสร้างในขั้นตอนนี้ พบว่าวิธีการเท PDMS นั้นควรเริ่มจากการเท PDMS ลงบนฐานอะคริลิกหรือแผ่นพลาสติกใส สป็นให้ได้

ความหนาตามต้องการ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้แข็งตัว หลังจากนั้นจึงวางคอยล์ทองแดงด้านบนแล้วสปิน PDMS ทับอีกครั้ง สุดท้ายจึงลอกแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์ทองแดงฝังอยู่ออกมาจากฐาน ทั้งนี้ในการเท PDMS ลงบนแผ่นพลาสติกใสหรือแผ่นอะคริลิกจะช่วยทำให้สามารถลอกแผ่นเมมเบรนออกมาได้ง่ายขึ้น สำหรับพารามิเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมความหนาของแผ่นเมมเบรนคือ ความเร็วรอบและเวลาในการสปิน ในการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบใดๆเมื่อใช้เวลาในการสปินมากขึ้นความหนาของ PDMS จะน้อยลง สำหรับเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 60 วินาที ในขณะที่เวลาใดๆ ความเร็วรอบที่สูงกว่าจะทำให้ได้ความหนาของ PDMS น้อยกว่า โดยในการศึกษานี้ใช้ความเร็วรอบที่ 500 rpm ที่เวลา 30 วินาที จะทำให้ได้ความหนาของ PDMS ประมาณ 250 ไมโครเมตร

หลังจากพัฒนากระบวนการสร้างเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังได้แล้ว จึงนำมาประยุกต์ใช้กับเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าและทดสอบสมรรถนะ โดยแผ่นเมมเบรน PDMS ที่ใช้ในการทดสอบมีความหนา 300 ไมโครเมตร ภายในมีคอยล์ทองแดงรูปร่างวงกลมชั้นเดียวความหนา 40 ไมโครเมตรฝังอยู่ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของคอยล์มีทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นจุดวัดระยะกระดก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่เหล็กคือ 1 เซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศตั้งฉากจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณขอบของแม่เหล็กถาวร ซึ่งจะทำให้แรงแม่เหล็กมีค่าสูงตามไปด้วย สำหรับความกว้างของคอยล์เท่ากับ 500 ไมโครเมตร ส่วนขาของคอยล์มีความยาว 4 เซนติเมตร และมีพื้นที่ไว้สำหรับต่อสายไฟขนาด 9 ตารางมิลลิเมตร การประกอบเป็นเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์เริ่มจากการนำแผ่นอะคริลิกใสที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เจาะรูวงกลมที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน แล้วนำมาประกบบนล่างของแผ่นเมมเบรนโดยวางให้จุดศูนย์กลางของคอยล์ทองแดงอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางของรูวงกลม หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานมาติดกับฐานอะคริลิกซึ่งมีแม่เหล็กถาวรวางอยู่ ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างคอยล์กับแม่เหล็กจะถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับขนาดความหนาของแผ่นอะคริลิก คือ 1 มิลลิเมตร สำหรับความตึงควบคุมโดยในการซึ่งแผ่นเมมเบรนให้มีค่า pre-strain ที่นิยามด้วยอัตราส่วนระหว่างระยะที่ยืดออกของแต่ละด้านต่อรัศมีของเมมเบรนซึ่งกำหนดให้คงที่เท่ากับ 0.1

การวัดสมรรถนะของแอคชัวเอเตอร์แบ่งเป็น Static และ Dynamic response โดยผลการทดสอบของ Static response พบว่า เมื่อกระแสที่ใส่ให้แอคชัวเอเตอร์เพิ่มขึ้น ระยะกระดกจะมีค่า

เพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง โดยระยะกระดกของแอกซ์ฮูเอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 เซนติเมตรเท่ากับ 25 และ 73 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่พลังงานที่ป้อน 1 วัตต์หรือกระแสที่จ่าย 3.16 แอมแปร์ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเท่ากัน แอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 4 เซนติเมตรจะให้ระยะกระดกสูงกว่าแอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ผลการทดสอบยังพบว่า เมื่อพลังงานที่ป้อนให้กับแอกซ์ฮูเอเตอร์มากขึ้น ระยะกระดกจะมีค่าสูงขึ้นเป็นความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ดังนั้นหากต้องการให้ได้ระยะกระดกมาก จะต้องใส่พลังงานให้กับแอกซ์ฮูเอเตอร์มากขึ้นเช่นกัน สำหรับผลการทดสอบ Dynamic response โดยการป้อนสัญญาณ Sinusoidal wave ที่มีความถี่ต่างกันตั้งแต่ 2 - 200 เฮิรท์ และกำหนดพลังงานสูงสุดที่ใส่แอกซ์ฮูเอเตอร์มีขนาดเท่ากันคือ 0.36 วัตต์หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายเท่ากับ 1.9 แอมแปร์ พบว่า ที่ความถี่ 2-6 เฮิรท์ ความถี่ที่ตอบสนองของแอกซ์ฮูเอเตอร์จะเท่ากับ ความถี่สัญญาณที่ใส่ให้กับแอกซ์ฮูเอเตอร์ อีกทั้งในช่วงความถี่ 2 – 8 เฮิรท์ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้น ระยะกระดกสูงสุดจะมีค่าลดลง ในขณะที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 เฮิรท์ขึ้นไป ระยะกระดกสูงสุดของทั้งสองกรณีมีค่าน้อยมากประมาณ 1-2 ไมโครเมตร โดยที่ความถี่ 2 เฮิรท์ แอกซ์ฮูเอเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมมเบรน 2 และ 4 เซนติเมตรจะให้ระยะกระดกสูงที่สุดเท่ากับ 15 และ 21 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นความต่างเฟสของสัญญาณก็จะมีค่ามากขึ้นตาม อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบการใช้งานที่ความถี่ 5 เฮิรท์ ขนาดสัญญาณเท่ากับ 0.38 Vp-p ที่เวลาต่างกัน คือ 0, 1 และ 7 ชั่วโมงพบว่าที่ระยะกระดกของแอกซ์ฮูเอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์

4.2 อภิปรายผลการศึกษา

จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังกอยล์ทองแดง จะเห็นได้ว่า ขั้นตอนการสร้างแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักอย่างชัดเจน คือ ขั้นตอนการสร้างคอยล์ทองแดงและการสร้างแผ่นเมมเบรนและการประกบ ในขณะที่งานวิจัยอื่น เช่น Kim et al. (2005) และ Yin et al. (2007) กระบวนการสร้างจะเป็นการสร้างที่ต่อเนื่องกันจนจบกระบวนการผลิต โดยกระบวนการสร้างเริ่มจากฐานซิลิกอนแล้วปลูกฟิล์มของเมมเบรน สร้างลายของคอยล์ ปลูกฟิล์มของคอยล์ แล้วจึงปลูกฟิล์มของเมมเบรนทับอีกครั้ง สุดท้ายจึงกัดซิลิกอนจากด้านล่างเพื่อให้เป็นแผ่นเมมเบรน เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการสร้างที่ได้พัฒนาขึ้นพบว่า กระบวนการที่พัฒนาขึ้นมี

ขั้นตอนที่น้อยกว่าและข้อดีของการแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนอย่างชัดเจนจะช่วยให้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้อย่างอิสระจากกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงลักษณะของแบบของคอปย์โลหะ สามารถที่จะเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนลายบนแผ่นแบบเท่านั้น แล้วจึงทำการ Electroplating โดยยังไม่จำเป็นต้องเริ่มการทำแผ่นเมมเบรนก่อน เป็นต้น แต่ทั้งนี้การแยกขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนเช่นนี้จะเป็นอุปสรรคในเรื่องของการนำคอปย์ทองแดงมาวางไว้บนแผ่นเมมเบรนหากคอปย์ทองแดงมีขนาดเล็กมาก อาจทำให้คอปย์เลื่อนไปจากตำแหน่งที่กำหนดได้ขณะทำการสปินโพลีเมอร์ด้านบน

เมื่อเปรียบเทียบทางด้านวิธีการสร้างพบว่า กระบวนการสร้างที่พัฒนาขึ้นใช้อุปกรณ์ในการสร้างที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาไม่สูงมากนัก เช่น Dry film photoresist, เครื่องฉายแสง (UV light source) ซึ่งสร้างขึ้นเอง, ชุด Electroplating เป็นต้น ในขณะที่งานวิจัยอื่นอาจใช้เครื่องมือที่มีราคาสูง เช่น เครื่อง Sputtering หรือ เครื่อง Evaporation แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคที่พัฒนาขึ้นอาจจะมีความแม่นยำน้อยกว่าและอาจจะสร้างชิ้นงานขนาดเล็กมากไม่ได้ นอกจากนั้นจากกระบวนการสร้างของงานวิจัยอื่นจะเห็นได้ว่า เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนสุดท้ายคือการกัดซิลิกอนจากด้านล่าง จะทำให้ได้แผ่นเมมเบรนฝั่งไมโครคอปย์ที่มีซิลิกอนเป็นฐาน ซึ่งการนำไปติดตั้งใช้งานจะติดตั้งได้เฉพาะบนพื้นผิวที่เป็นแนวราบเท่านั้น ในขณะที่กระบวนการสร้างที่พัฒนาจะสร้างแผ่นเมมเบรนที่เป็นขึ้นออกมาโดยไม่มีฐานติดอยู่ ซึ่งสามารถนำไปติดบนพื้นผิวโค้งได้

ผลการทดสอบสมรรถนะของแผ่นเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์ได้นำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ โดยการนิยามพารามิเตอร์ตัวใหม่ คือ อัตราส่วนระหว่างระยะกระดกต่อผลคูณของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและกระแสไฟฟ้าที่ใส่ เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยต่างๆเกิดความชัดเจนมากขึ้น ซึ่งพบว่าสำหรับแอคชัวเอเตอร์ที่ทดสอบมีค่าอัตราส่วนระหว่างระยะกระดกต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกระแสที่ใส่เท่ากับ 4-6 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตรต่อแอมแปร์ สำหรับในงานของ Kim et al. (2005) พบว่ามีค่า 234.4 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตรต่อแอมแปร์ ในงานของ Yin et al. (2007) มีค่า 157.14 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตรต่อแอมแปร์ และงานของ Jeong et al. (2000) มีค่า 627.2 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตรต่อแอมแปร์

จากผลที่ได้กล่าวไว้จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่างระยะกระดกต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อกระแสที่ใส่ของแอคชัวเอเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแอคชัวเอเตอร์จากงานวิจัยอื่นพบว่ามีค่าน้อยกว่ามาก ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ เช่น จำนวนรอบของคอปย์ซึ่ง

ส่งผลต่อแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแอกซ์เวเตอร์ที่สร้างขึ้นออกแบบให้จำนวนคอยล์ทองแดงมี 1 รอบเท่านั้น ในขณะที่คอยล์ทองแดงในงานวิจัยอื่นมีจำนวนรอบมากกว่า 10 รอบ ความหนาของเมมเบรนซึ่งส่งผลต่อระยะกระดกของเมมเบรน ความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นแนวทางในการเพิ่มระยะกระดกให้มากขึ้นโดยที่กระแสและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าเดิมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มจำนวนรอบของคอยล์ทองแดงให้มากขึ้น การเปลี่ยนชนิดของแม่เหล็ก และทำการลดความหนาของแผ่นเมมเบรนให้น้อยลง เป็นต้น

4.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม

จากตัวอย่างผลการทดสอบทางด้าน Dynamic response ที่ความถี่ 2 เฮิรท์ เมมเบรนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 และ 4 เซนติเมตร จะให้ระยะกระดกสูงสุดเท่ากับ 15 และ 21 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งหากคิดเทียบเป็นปริมาตรของอากาศที่ถูกอัดได้ใน 1 รอบ (ปริมาตรจากจุดที่เมมเบรน อยู่ตำแหน่งต่ำสุดจนถึงจุดที่เมมเบรนอยู่ตำแหน่งสูงสุด) จะได้ประมาณ 1.65 และ 8.75 ไมโครลิตร หรือคิดเป็นอัตราการไหล เท่ากับ 3.3 และ 17.5 ไมโครลิตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งอาจจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นปั๊มขนาดเล็กได้ ทั้งนี้เมื่อนำไปใช้กับของเหลวอย่างเช่น น้ำ อาจทำให้ระยะกระดกลดลงอย่างมากเนื่องจากน้ำมีความหนาแน่นที่มาก แต่สามารถเพิ่มระยะกระดกได้โดยการเพิ่มขนาดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น เพิ่มจำนวนรอบของคอยล์ การเปลี่ยนชนิดของแม่เหล็กให้แรงมากขึ้น เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Al-Halhouli, A.T., Kilani, M.I., and Buttgenbach, S. 2010. Development of a novel electromagnetic pump for biomedical applications. Sens. Actuators A Vol. 162 : pp. 172-176.
- Den Hartog, J.P. 1984. Mechanical vibrations. Dover. New York.
- Doll, A., Wischke, M., Schrag, H.-J., Geipel, A., Goldschmidtboeing, F., and Woias, P. 2007. Characterization of active silicon microvalves with piezoelectric membrane actuators. Microelectronic Engineering Vol. 84 : pp. 1202-1206.
- Filhol, F., Defay, E., Divoux, C., Zinck, C., and Delaye, M. 2005. Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning. Sens. Actuators A Vol. 123-124 : pp. 483-489.
- Hong, G. 2006. Effectiveness of micro synthetic jet actuator enhanced by flow instability in controlling laminar separation caused by adverse pressure gradient. Sens. Actuators A Vol. 132 : pp. 607-615.
- Jeong, H.K., Jeong, O.C., and Yang, S.S. 2000. Fabrication of an electromagnetic actuator with the planar coil. Proceedings of the Digest of SPIE Seventh International Symposium on Smart Structures and Materials Vol. 3990 : pp. 272-280.
- Jeong, O.C., and Konishi, S. 2007. Fabrication and drive test of pneumatic PDMS micro pump. Sens. Actuators A Vol. 135 : pp. 849-856.
- Jeong, O.C., and Yang, S.S. 2000. Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragm. Sens. Actuators A Vol. 83 : pp. 249-255.
- Khoo, M., and Liu, C. 2001. Micro magnetic silicone elastomer membrane actuator. Sens. Actuators A Vol. 89 : pp. 259-266.

- Kim, K.H., Yoon, H.J., Jeong, O.C., and Yang, S.S. 2005. Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator. Sens. Actuators A Vol. 117 : pp. 8-16.
- Kulkarni, S., Koukharenko, E., Torah, R., Tudor, J., Beeby, S., O'Donnell, T., and Roy, S. 2008. Design, fabrication and test of integrated micro-scale vibration-based electromagnetic generator. Sens. Actuators A Vol. 145-146 : pp. 336-342.
- Lee, C., Hong, G., Ha, Q.P., and Mallinson, S.G. 2003. A piezoelectrically actuated micro synthetic jet for active flow control. Sens. Actuators A Vol. 108 : pp. 168-174.
- Leea, C.C., Guoa, Q., Caob, G.Z., and Shena, I.Y. 2008. Effect of electrode size and silicon residue on piezoelectric thin-film membrane actuators. Sens. Actuators A Vol. 147 : pp. 279-285.
- Liu, C., Cui, T., Zhou, Z., Lian, K., and Goettert, J. 2004. Fluid-structure coupling analysis and simulation of a micromachined piezo microjet. Sens. Actuators A Vol. 114 : pp. 460-465.
- Liu, Y., Ciuryla, M., Amitay, M., Kwan, C., Myatt, J.H., Zhang, X., Ren, Z., and Casey, J.P. 2006. Integrated flight control and flow control using synthetic jet arrays. AFRL-VA-WP-TP-2006-344.
- Luo, Z., and Xia, Z. 2005. A novel valve-less synthetic-jet-based micro-pump. Sens. Actuators A Vol. 122 : pp. 131-140.
- Makino, E., Mitsuya, T., and Shibata, T. 2001. Fabrication of TiNi shape memory micropump. Sens. Actuators A Vol. 88 : pp. 256-262.
- Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H. 2008. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations. Sens. Actuators A Vol. 145-146 : pp. 405-413.

- Udomtarak, C., and Charassuriyong, N. 2010. Development of fabrication process of micro electromagnetic membrane actuator. 2141-499 Nano Engineering Project Nano Engineering International School of Engineering Chulalongkorn University.
- Wang, P.H., Dai, X.H., Fang, D.M., and Zhao, X.L. 2007. Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator. Microelectronics Journal Vol. 38 : pp. 1175-1180.
- Wang, P.K.C., Gutierrez, R.C., and Bartman, R.K. 1996. A method for designing electrostatic-actuator electrode pattern in micromachined deformable mirrors. Sens. Actuators A Vol. 55 : pp. 211-217.
- Yin, H.L., Huang, Y.C., Fang, W., and Hsieh, J. 2007. A novel electromagnetic elastomer membrane actuator with a semi-embedded coil. Sens. Actuators A Vol. 139 : pp. 194-202.
- Yokoyama, Y., Takeda, M., Umemoto, T., and Ogushi, T. 2004. Thermal micro pumps for a loop-type micro channel. Sens. Actuators A Vol. 111 : pp. 123-128.
- Yoon, J.S., Choi, J.W., Lee, I.H., and Kim, M.S. 2007. A valveless micropump for bidirectional applications. Sens. Actuators A Vol. 135 : pp. 833-838.
- Zengerle, R., Ulrich, J., Kluge, S., Richter, M., and Richter, A. 1995. A bidirectional silicon micropump. Sens. Actuators A Vol. 50 : pp. 81-86.
- Zhang, T., and Wang, Q.M. 2006. Performance Evaluation of a valveless micropump driven by a ring-type piezoelectric actuator. IEEE transactions on ultrasonics Vol. 53 : pp. 2.
- Zhang, T., Zhang, P., Li, H.W., Wu, Y.H., and Liu Y.S. 2008. Fabrication of micro electromagnetic actuator of high energy density. Mater. Physics Vol. 108 : pp. 325-330.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การออกแบบพารามิเตอร์ของเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงหลักการในการออกแบบและการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์ เช่น รูปร่างและขนาดของคอยล์ ความหนาแผ่นเมมเบรน ขนาดแม่เหล็ก เป็นต้น โดยรายละเอียดมีดังนี้

ก.1 หลักการทำงานของเมมเบรนแอคชัวเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

ก.1.1 ทฤษฎีแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระทำบนประจุ q ก็ต่อเมื่อนำประจุ q ไปวางในสนามแม่เหล็กและประจุนั้นมีการเคลื่อนที่ โดยความสัมพันธ์ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากับขนาดสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุเป็นดังนี้

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} \quad \text{หรือ} \quad d\vec{F} = l d\vec{I} \times \vec{B}$$

โดย \vec{F} คือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีหน่วย นิวตัน

\vec{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีหน่วย เทสลา

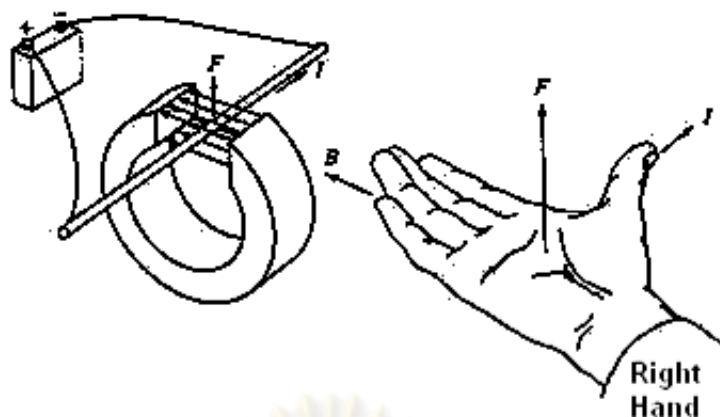
q คือ ค่าประจุไฟฟ้ามีหน่วย คูลอมป์

\vec{V} คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุมีหน่วย เมตรต่อวินาที

l คือ ความยาวของเส้นลวดภายใต้สนามแม่เหล็กมีหน่วย เมตร

\vec{I} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายในเส้นลวดมีหน่วย แอมแปร์

จากสมการและตามกฎมือขวา พบว่า หากมีขดลวดนำไฟฟ้าอยู่ในสนามแม่เหล็กและมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีแรงกระทำเกิดขึ้นโดย ทิศทางของแรงที่กระทำจะมีทิศตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ไดอะแกรมแสดงกฎมือขวาเพื่อหาทิศทางของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

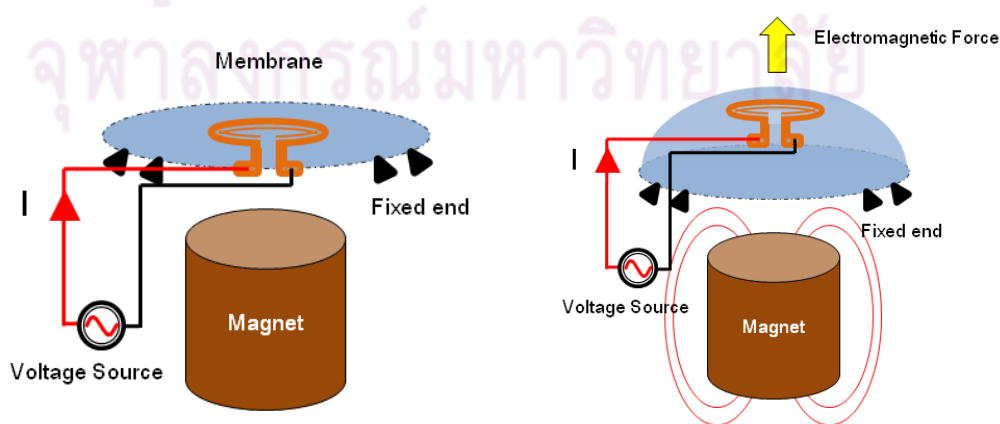
(Ref. http://smart-koala.com/writing/science/physics/s020_the_ectromagnetic_field.php)

ก.1.2 การทำงานของเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ภายใต้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า

เมมเบรนแอกซ์เวเตอร์ภายใต้หลักการนี้จะมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของเมมเบรนที่มีคอยล์ฝังอยู่ภายในเพื่อให้นำกระแสไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวรเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก โดยเมมเบรนจะถูกวางอยู่เหนือแท่งแม่เหล็กทำให้ออยล์ของโลหะอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่คอยล์จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นบนคอยล์ ทำให้เมมเบรนกระดกได้และทิศทางของการกระดกนี้จะขึ้นกับทิศทางของแรงหรือทิศทางกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ ก.2 โดยที่แรงที่กระทำต่อคอยล์วงกลมในทิศทางตั้งฉากมีค่าดังสมการนี้

$$F = I \times 2\pi r \times B_t$$

โดย B_t คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับขดลวดมีหน่วย เทสลา
 r คือ รัศมีของคอยล์โลหะมีหน่วย เมตร



รูปที่ ก.2 ไดอะแกรมแสดงหลักการของเมมเบรนแอกซ์เวเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

ก.2 เงื่อนไขเพื่อการออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ

การออกแบบพารามิเตอร์ของเมมเบรนฝึ่งไมโครคอยล์จะขึ้นกับงานทางวิศวกรรมที่นำไปใช้ โดยในการศึกษานี้จะนำไปใช้สำหรับไมโครปั๊มซึ่งมีพารามิเตอร์ทั้งทางด้าน Static และ dynamic responses ที่ต้องพิจารณา สำหรับ Static response นั้นมีพารามิเตอร์ที่สนใจคือ ผลของพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบต่อระยะกระดกที่เกิดขึ้น สำหรับ Dynamic Response สนใจศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ขับต่อระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้น และหาความถี่ธรรมชาติของแผ่นเมมเบรนฝึ่งไมโครคอยล์ที่ได้สร้างขึ้น จากการศึกษาทั้งสองส่วนการออกแบบแผ่นเมมเบรนที่สามารถกระดกได้มากที่สุดเท่าที่ทำได้ จะทำให้สามารถวัดระยะกระดกได้ง่ายขึ้น โดยตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดระยะกระดกสูงคือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าและพารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของแผ่นเมมเบรนฝึ่งไมโครคอยล์ ซึ่งตัวแปรแรกนั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับตัวแปรหลังเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเมมเบรน ความหนาและความกว้างของคอยล์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนและคอยล์

ก.3 การศึกษาและออกแบบตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระยะกระดก

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้ว จุดมุ่งหมายของการออกแบบตัวแปรต่างๆ เพื่อให้แผ่นเมมเบรนนั้นสามารถกระดกให้ได้มากที่สุด ซึ่งมีผลให้การวัดสัญญาณที่ใช้ทดสอบ Static และ Dynamic response นั้นวัดค่าได้แม่นยำมากขึ้น โดยในเบื้องต้นกำหนดให้แม่เหล็กถาวรที่ใช้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ซึ่งหากเลือกขนาดแม่เหล็กอื่นๆก็ทำได้โดยขนาดแม่เหล็กที่มีนั้นมีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 8, 10 จนถึง 50 มิลลิเมตร

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของระบบ และแสดงวิธีการกำหนดขนาดของตัวแปรต่างๆ

ก.3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของระบบในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ตัวแปรในส่วนของเมมเบรนฝึ่งไมโครคอยล์ ตัวแปรของแม่เหล็กถาวร และตัวแปรของส่วนอื่นๆ โดยในแต่ละส่วนมีตัวแปรต่างๆดังนี้

ก.3.1.1 ตัวแปรในส่วนของเมมเบรนฝังไมโครคอยล์

ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ ความหนาของแผ่นเมมเบรน (T_m) เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน (D_m) เส้นผ่านศูนย์กลางคอยล์โลหะ (D_c) ความกว้างคอยล์ (W_c) รูปร่างของคอยล์ (Sh) วัสดุที่ใช้เป็นคอยล์โลหะ (t_c) และวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน (t_m)

ก.3.1.2 ตัวแปรในส่วนของแม่เหล็กถาวร

ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ ชนิดของแม่เหล็ก (t_{pm}) เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็ก (D_{pm}) ความเข้มแม่เหล็ก (B) และความสูงแม่เหล็ก (h_{pm})

ก.3.1.3 ตัวแปรในระบบรวม

ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ ระยะกระดก (x) ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับแผ่นเมมเบรน (H) และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์โลหะ (I)

ก.3.2 การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุม

พารามิเตอร์ที่ควบคุมให้คงที่สำหรับในการออกแบบเมมเบรนแอคชูเอเตอร์ในการศึกษานี้มีดังนี้

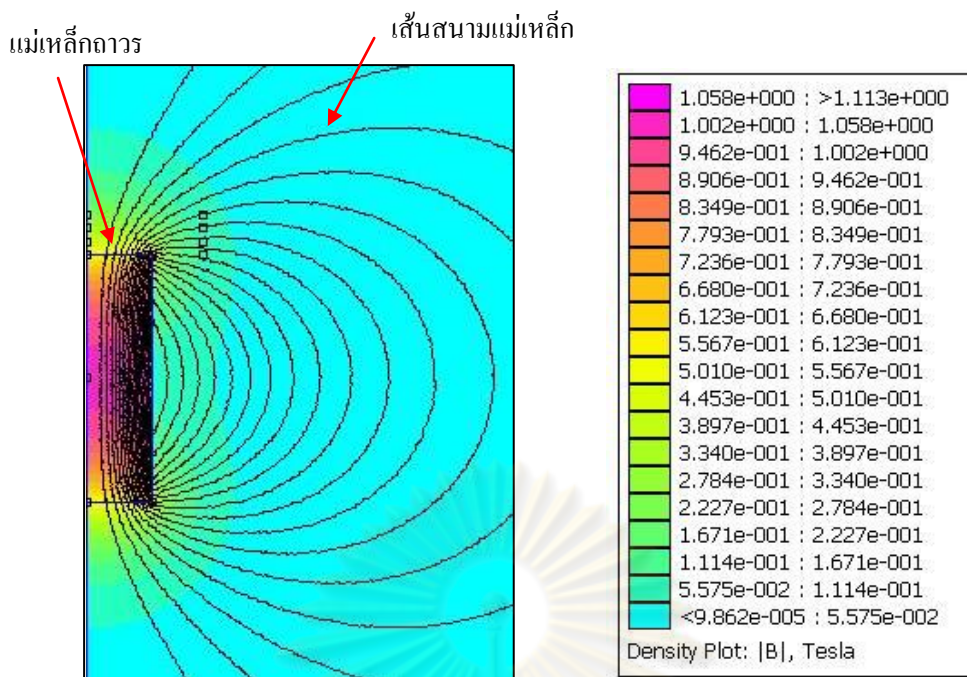
1. ความกว้างคอยล์โลหะ (W_c) เท่ากับ 500 ไมโครเมตร
2. รูปร่างของคอยล์โลหะ (sh) ใช้เป็นลักษณะของคอยล์วงกลมชั้นเดียว โดยมีแกนยื่นมาตรงกลางถึงจุดศูนย์กลางของคอยล์ เพื่อใช้เป็นส่วนสะท้อนเลเซอร์สำหรับการวัดระยะกระดก โดยกำหนดให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดตรงกลางเท่ากับ 4 มิลลิเมตร และขนาดของพื้นที่ที่ใช้เชื่อมสายไฟเท่ากับ 3x3 ตารางมิลลิเมตร
3. วัสดุที่ใช้เป็นคอยล์โลหะ (t_c) คือทองแดง
4. วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นเมมเบรน (t_m) คือ PDMS
5. ชนิดของแม่เหล็ก (t_{pm}) คือ Neodymium (NdFeB)
6. เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็ก (D_{pm}) เท่ากับ 1 เซนติเมตร
7. ความสูงแม่เหล็ก (h_{pm}) เท่ากับ 1 เซนติเมตร

ก.3.3 การออกแบบเพื่อให้ได้ระยะกระดกสูงสุด

พฤติกรรมการกระดกของแผ่นเมมเบรนสามารถจำลองได้ด้วยแบบจำลองพื้นฐาน $F \propto kx$ นั่นคือระยะกระดกจะแปรผันตรงกับแรงและแปรผกผันกับค่า k ของเมมเบรน สำหรับแอกซ์วอเตอร์ในงานวิจัยนี้ แรงที่ทำให้เกิดระยะกระดกคือ แรงแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่กล่าวในหัวข้อที่ ก.1 ดังนั้นหากต้องการให้ระยะกระดกมากจึงต้องออกแบบให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้ามากด้วยเช่นกัน

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับตัวแปร 3 ตัวคือ กระแสที่จ่ายให้คอยล์ รัศมีของคอยล์ และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับคอยล์ ในการศึกษาลักษณะการกระจายสนามแม่เหล็กได้ใช้โปรแกรม FEMM 4.2 เพื่อจำลองความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่างๆ (Field of Magnetic flux density : B) ของแม่เหล็กถาวร รูปที่ ก.3 แสดงตัวอย่างของความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่คำนวณได้จากโปรแกรม ในการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์ใช้แม่เหล็กชนิด NdFeB 40 MGOe เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร สูง 8.5 มิลลิเมตร เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก (R) กับค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งห่างจากผิวบนแม่เหล็ก (H) ต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ ก.4ก-ง โดยรูปที่ ก.5ก แสดงความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งผิวด้านบนของแท่งแม่เหล็กพอดี รูปที่ ก.5ข แสดงความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งห่างจากปลายแม่เหล็กเป็น 0.1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็ก โดยรูปที่ ก.5ค และ ก.5ง แสดงค่าที่ระยะ 0.2 และ 0.3 เท่าตามลำดับ จากรูปพบว่าความหนาแน่นฟลักซ์ในทิศทางแนวระดับซึ่งตั้งฉากกับคอยล์มีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งขอบของแม่เหล็กพอดี และที่ระยะห่างออกจากแม่เหล็กออกไป ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่ขอบก็จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ โดยที่ตำแหน่งห่างจากผิวบนของแม่เหล็กมากขึ้น ค่าความหนาแน่น ฟลักซ์ในทิศทางแนวระดับจะมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

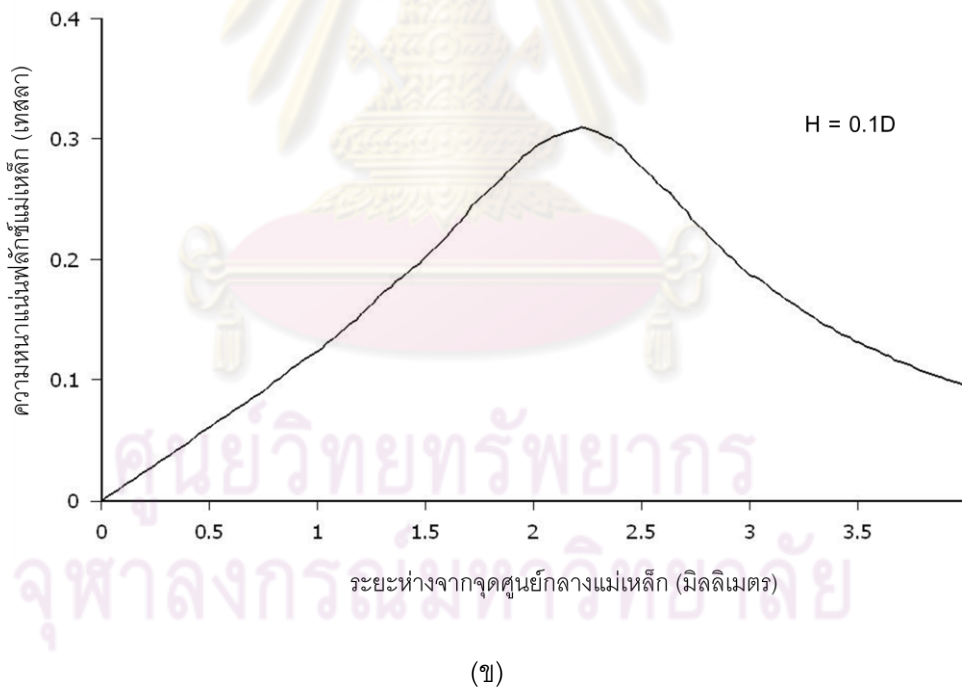
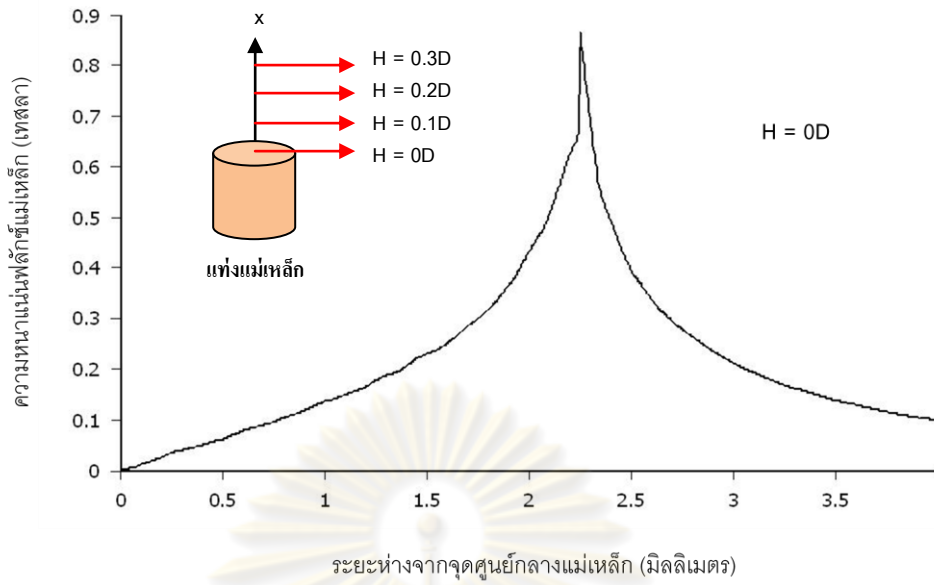


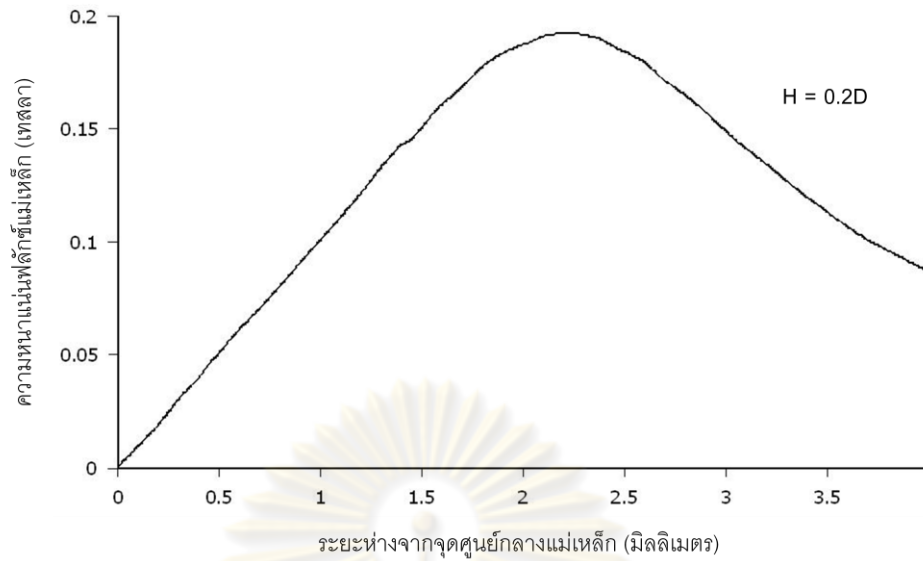
รูปที่ ก.3 ตัวอย่างการจำลองความหนาแน่นฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการจำลองเพื่อศึกษาฟลักซ์แม่เหล็ก ทำให้เกิดแนวคิดในการกำหนดพารามิเตอร์
ดังนี้

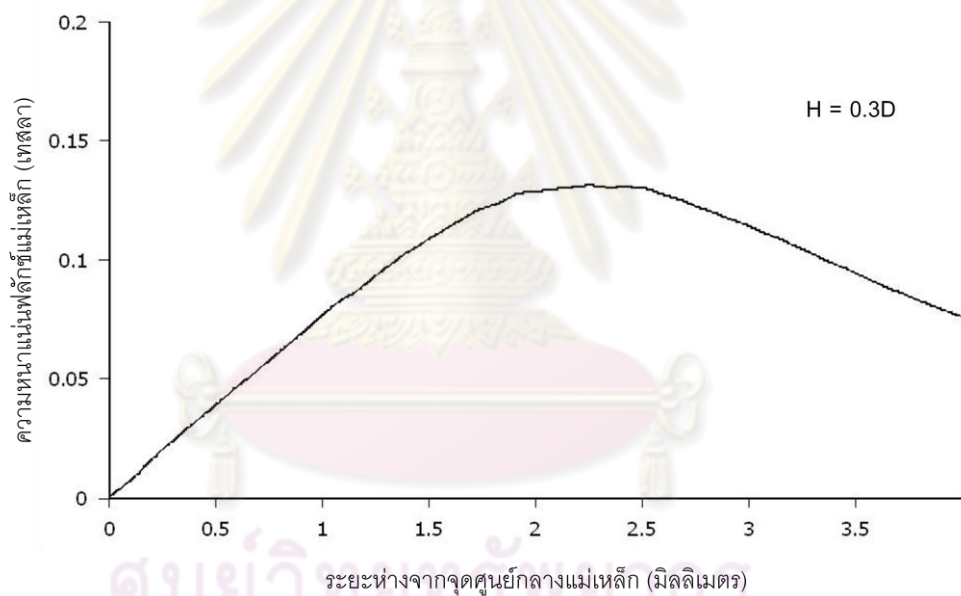
1. กำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของคอยล์โลหะ (D_c) เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็ก เพื่อให้มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวระดับมากที่สุด ซึ่งในการทดลองจริงใช้ขนาดของแท่งแม่เหล็กเป็น 1 เซนติเมตร ดังนั้นจึงกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของคอยล์โลหะเท่ากับ 1 เซนติเมตรด้วย

2. กำหนดให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับแผ่นเมมเบรนมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้มีค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนวระดับมากที่สุด โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแม่เหล็ก ดังนั้นระยะห่าง (H) ในการทดลองจริงมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร





(ค)



(ง)

รูปที่ ก.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ตำแหน่งห่างจากผิวบนแม่เหล็กต่างๆ

(ก) ตำแหน่งบนผิวแม่เหล็กด้านบน

(ข) ตำแหน่งห่างจากผิวบนแม่เหล็ก 0.1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

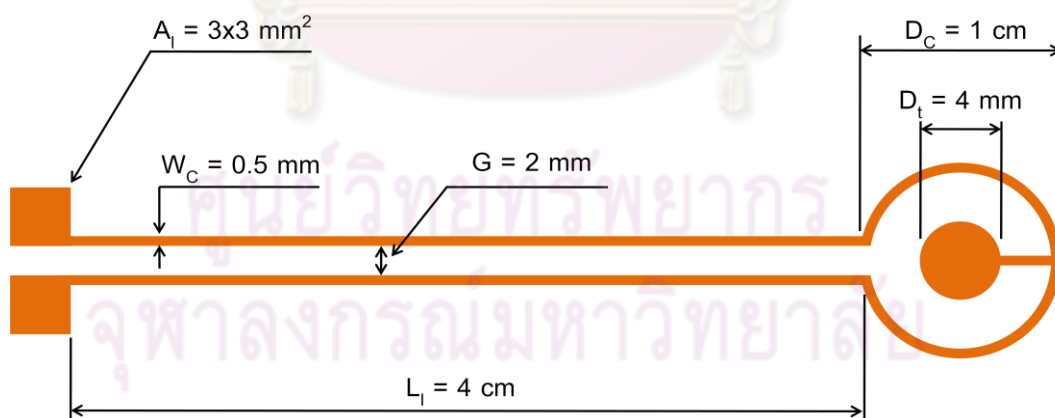
(ค) ตำแหน่งห่างจากผิวบนแม่เหล็ก 0.2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

(ง) ตำแหน่งห่างจากผิวบนแม่เหล็ก 0.3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

สำหรับค่า k นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเมมเบรนและคอยล์ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ความหนาของแผ่นเมมเบรน (T_m) และความหนาของคอยล์ทองแดง (T_c) ให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่การสร้างจะทำได้ โดยจากการทดลองหลายครั้งพบว่า ขนาดทั้งสองจะมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะสร้างได้เท่ากับ 300 และ 40 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ก.4 สรุป

การสร้างไมโครเมมเบรนแอกชูเอเตอร์เพื่อใช้ในการทดสอบ Static และ Dynamic response ในส่วนของเมมเบรนฝั่งไมโครคอยล์นั้นกำหนดความหนาของ PDMS เมมเบรนเท่ากับ 300 ไมโครเมตร ใช้คอยล์ทองแดงมีลักษณะเป็นคอยล์วงกลมรอบเดียว ความกว้างของคอยล์ (W_c) เท่ากับ 500 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคอยล์ (D_c) เท่ากับ 1 เซนติเมตร ความหนาของคอยล์ (T_c) เท่ากับ 40 ไมโครเมตร โดยที่มีส่วนของทองแดงยื่นมาบริเวณจุดศูนย์กลางของคอยล์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ ก.5 สำหรับส่วนของแม่เหล็กถาวรใช้แม่เหล็กชนิด Neodymium (NdFeB) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร โดยในการทดสอบให้วางจุดกึ่งกลางของคอยล์ทองแดงที่ฝังในแผ่นเมมเบรนอยู่เหนือจุดกึ่งกลางของแม่เหล็กเท่ากับ 1 มิลลิเมตรพอดี



รูปที่ ก.5 ไดอะแกรมของคอยล์ทองแดงที่ใช้ทดสอบ

ภาคผนวก ข

การใช้เครื่องรีดฟิล์มไวแสง

ในการขั้นตอนการสร้างแบบหล่อของคอยล์ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Photolithography ซึ่งเป็นเทคนิคการเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นโฟโตเรซิส เมื่อกระทบแสง เพื่อให้สามารถสร้างแบบที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โฟโตเรซิสชนิด Negative photoresist ที่ชื่อว่า Dryflim photoresist ของบริษัทวาร์ฟ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (Warf corporation co.,ltd.) ดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ภาพถ่ายแสดงแผ่น Dryfilm Photoresist

สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบหล่อนั้นจำเป็นต้องมีการรีดฟิล์มของแผ่นโฟโตเรซิสเพื่อให้ติดแน่นกับฐานสแตนเลส สำหรับเครื่องรีดฟิล์มที่นำมาใช้งานในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า เครื่องรีดฟิล์มไวแสง รุ่น LAM-150 ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ของบริษัท วาร์ฟ คอร์ปอเรชั่น จำกัด เช่นกัน โดยในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบ วิธีการใช้งาน เทคนิคที่จำเป็น รวมถึงข้อควรระวังในการใช้งานเครื่องรีดฟิล์มไวแสงนี้



รูปที่ ข.2 เครื่องรีดฟิล์มไวแสง รุ่น LAM-150

ข.1 ส่วนประกอบของเครื่องรีดฟิล์มไวแสง

เครื่องรีดฟิล์มไวแสงนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ ข.3 คือ ส่วนของตัวเครื่องที่มีลูกกลิ้งสำหรับรีดฟิล์ม และส่วนของแผงควบคุม โดยในส่วนของแผงควบคุม ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ข.4 ดังนี้



รูปที่ ข.3 ส่วนประกอบของเครื่องรีดฟิล์มไวแสง

1. **ปุ่มปรับควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control dial)** ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของขดลวดความร้อน โดยสามารถปรับได้ด้วยการหมุนปุ่มปรับควบคุมอุณหภูมิไประหว่าง 0-160 องศาเซลเซียส
2. **สวิตช์ปิดเปิด (Power switch)** ใช้สำหรับการปิดเปิดการทำงานของเครื่อง เมื่อหลอดไฟสีแดง "POWER" ติดสว่าง แสดงว่าเครื่องกำลังทำงานอยู่
3. **หลอดไฟแสดงสถานะพร้อมทำงาน (Ready lamp)** หลอดไฟนี้จะแสดงสถานะของการทำงานของขดลวดความร้อน โดยหากไฟ "สว่าง" แสดงว่าอุณหภูมิของขดลวดความร้อนสูงกว่าที่ตั้งไว้ หากไฟ "ดับ" แสดงว่าอุณหภูมิของขดลวดความร้อนต่ำกว่าที่ตั้งไว้ และหากว่าไฟ "กะพริบ" แสดงว่าอุณหภูมิตรงตามที่กำหนด
4. **สวิตช์ปิดเปิดมอเตอร์ (Motor switch)** ใช้สำหรับเปิดหรือปิดการทำงานของมอเตอร์ชั่วคราว เมื่อสวิตช์อยู่ในสภาวะเปิด หลอดไฟ "MOTOR" จะติดสว่างโดยอัตโนมัติและมอเตอร์จะเริ่มทำงาน



รูปที่ ข.4 รายละเอียดบนแผงควบคุม

ข.2 ขั้นตอนการรีดฟิล์มโฟโตเรซิสเทคนิคและข้อควรระวังในการใช้งาน

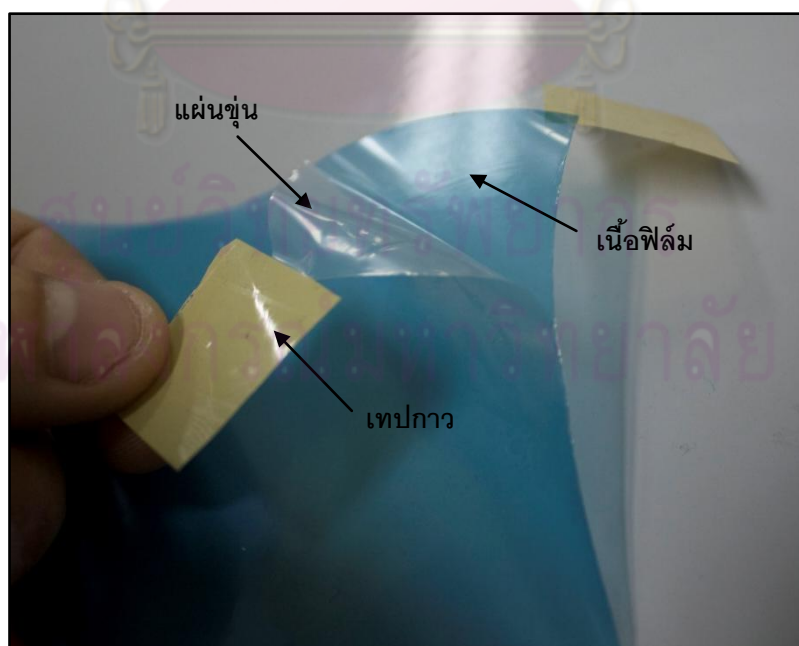
ขั้นตอนในการรีดฟิล์มโฟโตเรซิสมีรายละเอียดดังนี้

1. เปิดสวิตช์เครื่องรีดฟิล์มและมอเตอร์ แล้วปรับอุณหภูมิไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส
2. รอจนกระทั่งหลอดไฟสีเหลืองตรงปุ่ม “READY” เริ่มกะพริบ แสดงว่าอุณหภูมิได้เพิ่มถึง 90 องศาเซลเซียสแล้ว
3. เตรียมแผ่น Dryfilm Photoresist ด้วยการตัดแผ่น Dryfilm ให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นสแตนเลสเล็กน้อย

ข้อควรสังเกต : แผ่น Dryfilm Photoresist จะประกอบด้วยฟิล์ม 3 ชั้นด้วยกัน โดยชั้นกลางจะเป็นส่วนของเนื้อฟิล์มโฟโตเรซิส สำหรับชั้นที่ปิดทับอยู่จะเป็นส่วนที่ป้องกันเนื้อฟิล์มจากสิ่งสกปรกภายนอก โดยด้านหนึ่งจะลักษณะของแผ่นใส อีกด้านหนึ่งจะเป็นแผ่นขุ่น

4. ลอกแผ่นขุ่นของ Dryfilm ออกมาประมาณหนึ่งในสามของแผ่น

เทคนิค : การลอกแผ่นขุ่นออกมาให้ใช้เทปกาวติดที่มุมด้านใดด้านหนึ่งของด้านแผ่นใส และแผ่นขุ่น หลังจากนั้นจึงดึงเทปกาวออกจากกัน ซึ่งแผ่นขุ่นจะหลุดติดออกมากับเทปกาว ดังแสดงในรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 เทคนิคการลอกแผ่นขุ่นของ Dryfilm Photoresist

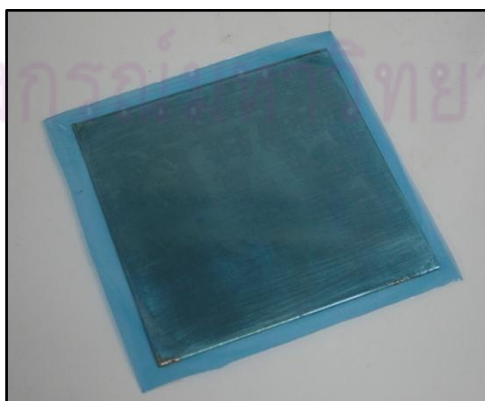
5. คิวแผ่น Dryflim โดยให้ส่วนที่เป็นเนื้อฟิล์มติดกับแผ่นสแตนเลส ดังรูปที่ ข.6 แล้วจึงนำเข้าเครื่องรีดฟิล์ม เครื่องจะเริ่มดึงแผ่นสแตนเลสเข้าไปพร้อมกับฟิล์ม ให้ทำการจับแผ่นชั้นของ Dryflim ไว้ให้ค่อยๆ ลอกออกจากแผ่น Dryflim จนเครื่องดึงแผ่นสแตนเลสเข้าไปจนหมด



รูปที่ ข.6 การนำแผ่น Dryflim ที่ติดกับแผ่นสแตนเลสเข้าเครื่องรีด

ข้อควรระวัง : ในการนำแผ่นสแตนเลสเข้าเครื่องรีด ต้องคอยดันในส่วนของปลายแผ่นสแตนเลสให้เข้าไปในเครื่อง เพื่อไม่ให้แผ่นสแตนเลสติดค้างอยู่ในเครื่องรีดนานจนเกินไป จนทำให้แผ่น Dryflim ละลายได้

6. นำแผ่นสแตนเลสที่มีแผ่น Dryflim ติดอยู่แล้วเข้าเครื่องรีดซ้ำทั้งหมด 4 รอบ เพื่อให้แผ่น Dryflim ติดแน่นกับแผ่นสแตนเลส ดังรูปที่ ข.7 หลังจากนั้นจึงทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำชิ้นงานเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

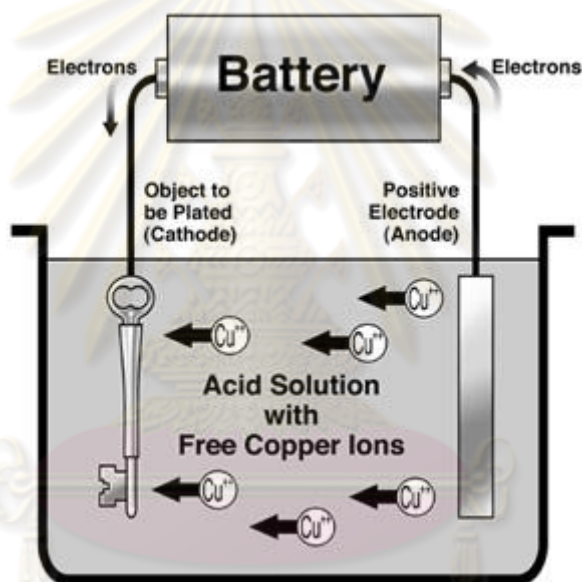


รูปที่ ข.7 แผ่น Dryflim ที่ติดบนแผ่นสแตนเลสหลังเข้าเครื่องรีด

ภาคผนวก ค

การใช้ชุดเคลื่อนที่หลักการไฟฟ้าเคมี

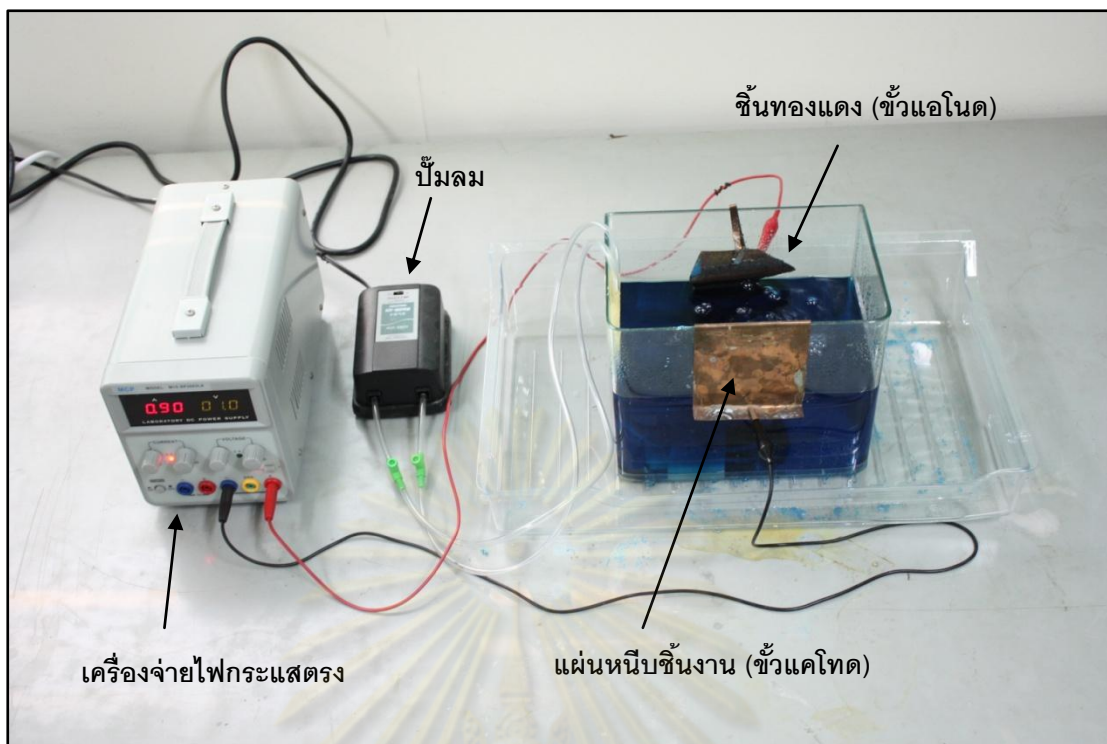
ในการปลูกคอยล์ทองแดงขึ้นบนแบบหล่อ ใช้วิธีการไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า Electroplating ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบโลหะจากอิเล็กโทรดหนึ่งลงบนขั้วอิเล็กโทรดอีกฝั่งหนึ่งที่จมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ในรูปที่ ค.1 แสดงไดอะแกรมการปลูกฟิล์มโลหะด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมีซึ่งอิเล็กตรอนจะวิ่งจากขั้วแอโนดที่เป็นชั้นโลหะผ่านสายไฟไปยังขั้วแคโทดที่เป็นชิ้นงานที่ต้องการปลูกโลหะ ทำให้ไอออนบวกจากขั้วแอโนดวิ่งผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาเกาะยังชิ้นงานที่ขั้วแคโทดได้



รูปที่ ค.1 ไดอะแกรมการปลูกฟิล์มโลหะด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมี

(Ref. <http://www.glenair.com/qwikconnect/vol7num4/coverstory.htm>)

การทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นทองแดงเป็นขั้วแอโนด ชิ้นงานแบบหล่อบนแผ่นสแตนเลสเป็นขั้วแคโทด และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สั่งซื้อจากบริษัท สมไทยพาณิชย์ (2506) จำกัด (SOMTHAI PANICH (1963) Company Limited) โดยชุดกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้แสดงดังรูปที่ ค.2 สำหรับในภาคผนวกนี้จะแสดงถึงขั้นตอนการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี เทคนิคที่จำเป็นและข้อควรระวังในการใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ ค.2 ชุดทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีและเทคนิคที่จำเป็น

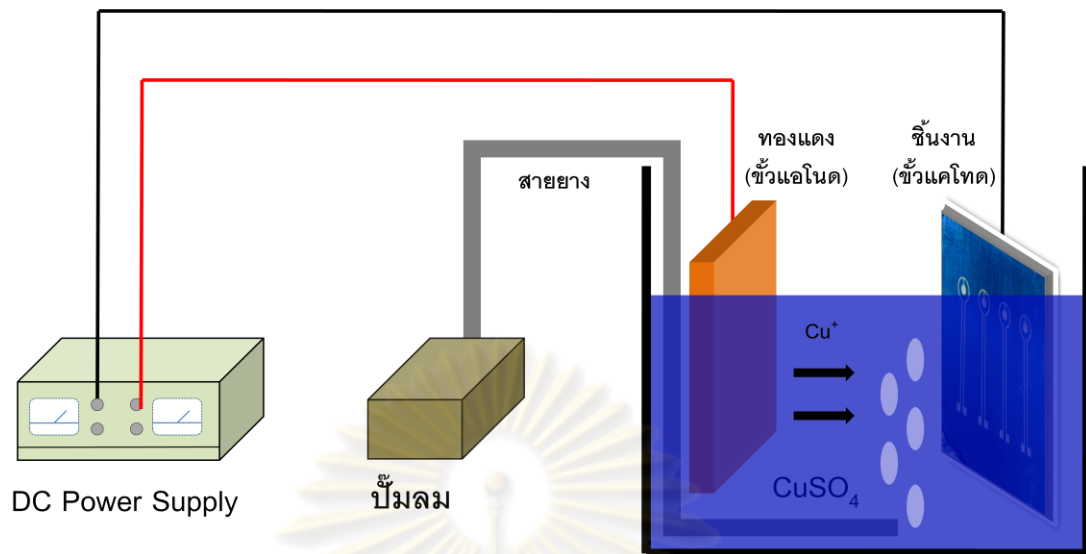
1. ติดตั้งชุดทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีตามไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ ค.3
2. จุ่มชิ้นทองแดงฝั่งด้านแอโนด และชิ้นงานที่ต้องการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีฝั่งด้านแคโทดลงในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

เทคนิค : การจุ่มชิ้นงานฝั่งด้านแคโทด ควรหนีบชิ้นงานเข้ากับแผ่นทองแดงก่อนเพื่อใช้เป็นส่วนเชื่อมสายไฟ โดยทำให้แผ่นทองแดงแนบติดตลอดความยาวด้านหนึ่งของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ ค.4 เพื่อให้กระแสไฟฟ้าวิ่งกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวยาว

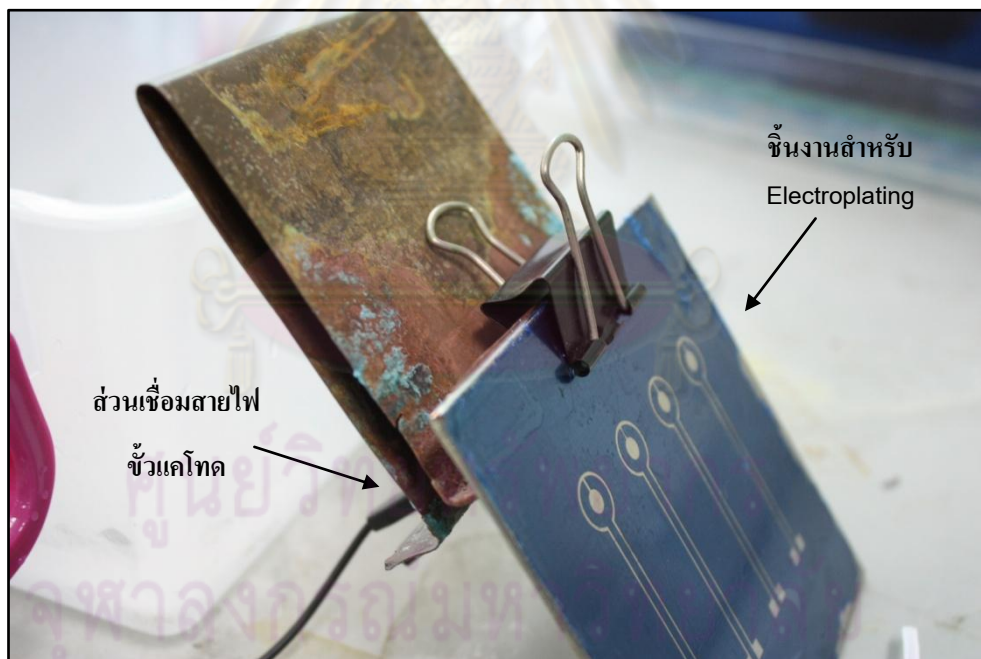
3. ต่อดึงสายไฟขั้วบวกเข้ากับชิ้นทองแดง และขั้วลบเข้ากับชิ้นงาน แล้วจึงเปิดปั๊มลม

เทคนิค : ปั๊มลมจะทำหน้าที่เป่าอากาศเข้าสู่สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เพื่อควนสารละลายให้เกิดความปั่นป่วน ทำให้การปลูกทองแดงลงบนพื้นผิวของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอและทั่วถึงมากขึ้น

4. เปิดเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายกระแสเข้าสู่วงจร ทองแดงจะเริ่มเคลือบบนแผ่นสแตนเลสจนกระทั่งได้ความหนาตามต้องการจึงปิดเครื่อง



รูปที่ ค.3 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งชุด Electroplating



รูปที่ ค.4 การหนีบชิ้นงานเข้ากับแผ่นทองแดงฝั่งขั้วแคโทด

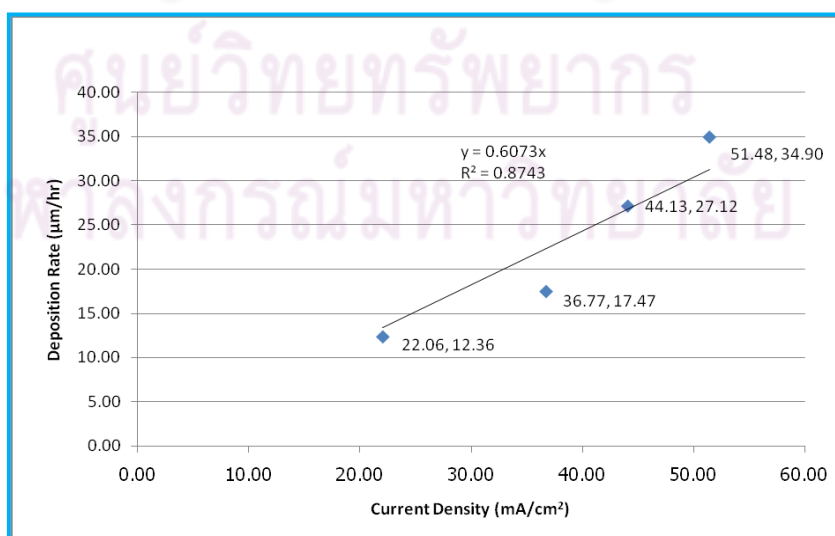
ภาคผนวก ง

การทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีด้วยโลหะนิกเกิล

ในช่วงเริ่มต้นของการศึกษาและพัฒนากระบวนการสร้างในขั้นตอนการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีได้ลองศึกษากับโลหะนิกเกิลก่อน โดยใช้แผนแบบเดียวกับการทดลองของคอลลีทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งได้ข้อสรุปต่างๆดังรายละเอียดต่อไปนี้

ง.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ต่ออัตราการปลูกฟิล์มนิกเกิล

ในการทดลองการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีเคลือบฟิล์มนิกเกิลได้เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ (Current density) ทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 22.06, 36.77, 44.13 และ 51.48 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แล้วจึงนำคอลลีที่ได้จากการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาวัดหาค่าเฉลี่ยความหนาที่เกิดขึ้น ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่กับอัตราการปลูกฟิล์มนิกเกิล (Deposition Rate) ของการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีนิกเกิล ดังรูปที่ ง.1 พบว่า เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่มากขึ้นอัตราการปลูกฟิล์มนิกเกิลก็มากขึ้นตามเช่นกัน โดยมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) เท่ากับ 0.87 ในการทดลองนี้ยังพบว่า หากค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่มีค่ามากกว่า 66.18 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (0.9 แอมแปร์ สำหรับแบบที่ทำการทดลอง) ลักษณะของคอลลีที่เกิดขึ้นหลังการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะโค้งงอเสียรูปไป



รูปที่ ง.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่กับอัตราการปลูกฟิล์มนิกเกิล

ง.2 รูปร่างของคอยล์นิกเกิลหลังการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี

หลังทำการวัดความหนาของคอยล์นิกเกิลพบว่า หากการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีเคลือบฟิล์มให้ความหนาของคอยล์นิกเกิลหนากว่าประมาณ 35 ไมครอน ลักษณะของคอยล์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างคล้ายดอกเห็ด ดังแสดงในรูปที่ ง.2 กล่าวคือ เมื่อดำเนินการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีให้ความหนาของคอยล์นิกเกิลหนาเกินกว่าความหนาของโพลีไทรซีส (โพลีไทรซีสหนาประมาณ 35 ไมครอน) นิกเกิลจะถูกปลุกยื่นออกไปนอกแบบหล่อและโตขึ้นเรื่อยๆคล้ายดอกเห็ด



รูปที่ ง.2 ตัวอย่างคอยล์นิกเกิลที่ถูกการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีที่มีลักษณะเป็นดอกเห็ด

ง.3 การลอกออกของคอยล์นิกเกิล

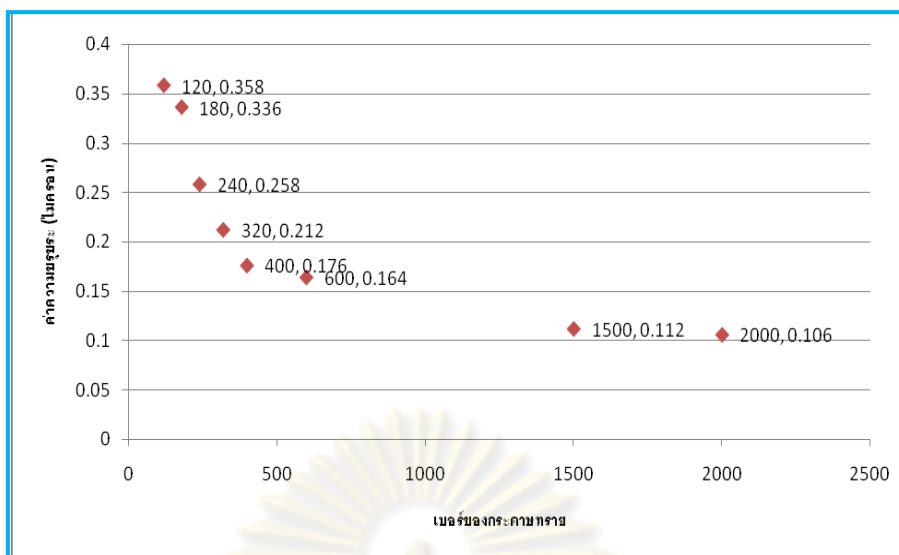
ภายหลังจากการปลูกคอยล์นิกเกิล คอยล์จะยังคงติดอยู่บนผิวของแผ่นสแตนเลส ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการได้คอยล์โลหะที่หลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นจึงศึกษาหาวิธีการที่จะทำให้คอยล์นิกเกิลสามารถหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้โดยที่ยังคงรูปร่างที่สมบูรณ์ไว้ และไม่ต้องออกแรงในการขูดหรือกัดคอยล์ออกจากแผ่นสแตนเลสเพราะอาจจะทำให้คอยล์เสียรูปได้

การยึดติดกันระหว่างคอยล์นิกเกิลกับแผ่นสแตนเลสเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากพื้นผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง ซึ่งหากสามารถลดแรงนี้ลงได้จนถึงจุดหนึ่ง คาดว่าคอยล์ของนิกเกิลจะสามารถหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้เอง โดยในการทดลองพบว่าการแช่โพแทสเซียมไดโคร

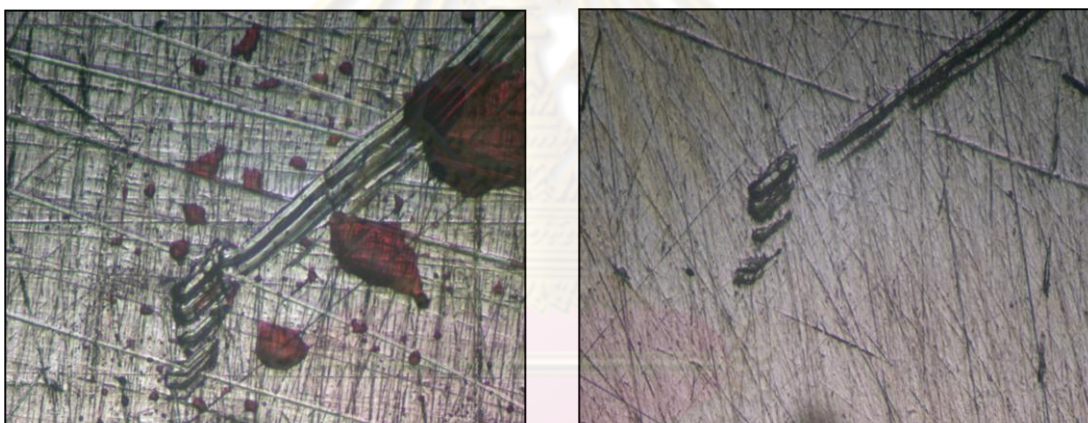
เมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นการช่วยให้การหลุดออกของคอยล์นิกเกิลง่ายขึ้น ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่โพแทสเซียมไดโครเมตไปสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆระหว่างชั้นของสแตนเลสกับนิกเกิล เป็นการช่วยลดพื้นที่การยึดเกาะระหว่างสแตนเลสกับนิกเกิลให้ลดน้อยลง ในการแช่ชิ้นงานในโพแทสเซียมไดโครเมตควรแช่อย่างน้อย 1 นาที หลังจากปลู้นิกเกิลได้ความหนาที่ต้องการแล้ว นิกเกิลจะยังไม่หลุดออกมา เนื่องจากมีฟิล์มโพไตริซีสช่วยยึดอยู่ แต่เมื่อล้างโพไตริซีสออกด้วยสารละลาย NaOH คอยล์นิกเกิลก็จะหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสได้เอง

Udomtarak and Charassuriyong (2010) ได้นำเสนอแนวคิดอีกแนวคิดหนึ่งในการลดแรงยึดเหนี่ยวคือ การขัดผิวของแผ่นสแตนเลสให้เรียบมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการลดพื้นที่ที่เป็นหลุมและบ่อทำให้ความขรุขระลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สัมผัสระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลสลดลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุทั้งสองก็ควรที่จะลดลงด้วยเช่นกัน

ในการทดลองเพื่อพิสูจน์แนวคิดนี้ได้ทำการขัดผิวของสแตนเลสด้วยกระดาษทรายเบอร์ที่ต่างกันออกไป หลังจากนั้นจึงทำการวัดค่าความขรุขระ (Roughness) ของผิว ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเบอร์ของกระดาษทรายที่ขัดกับค่าความขรุขระของแผ่นสแตนเลส ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่ายิ่งใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียดมากขึ้น ค่าความขรุขระของผิวสแตนเลสจะลดลง รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างของพื้นผิวชิ้นงานก่อนและหลังขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1500 จะเห็นถึงความแตกต่างของพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด หลังจากขัดผิวสแตนเลสและวัดความขรุขระแล้วจึงนำชิ้นงานไปทำ Photolithography และ Electroplating ภายใต้สภาวะค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 18.38 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ซึ่งได้ความหนาของคอยล์นิกเกิลประมาณ 100 ไมครอน



รูปที่ ๓.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระดาศทรายเบอร์ต่างๆกับค่าความขรุขระ
(Udomtarak and Charassuriyong, 2010)



(ก)

(ข)

รูปที่ ๓.4 ตัวอย่างของพื้นผิวชิ้นงานที่ตัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 1500

(Udomtarak and Charassuriyong, 2010)

(ก) ก่อนตัด

(ข) หลังตัด

ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการกระบวนไฟฟ้าเคมีชิ้นงานที่ตัดด้วยกระดาศทรายเบอร์ 2000, 1500, 600, และ 320 ตามลำดับ ภายหลังจากการล้างไฟได้รีไซเคิลออกด้วยสารละลาย NaOH พบว่าชิ้นงานที่ทำกระบวนไฟฟ้าเคมีด้วยกระดาศทรายเบอร์ 2000 และ 1500 คอยล์ของนิกเกิลหลุด

ออกมาจากแผ่นสแตนเลสอย่างสมบูรณ์ทุกชิ้น ในขณะที่ชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 320 ยังคงมีคอยล์ของนิกเกิลบางชิ้นติดอยู่บนสแตนเลส รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายของคอยล์นิกเกิลที่ยังคงติดอยู่บนสแตนเลสของชิ้นงานที่ใช้กระดาษทรายเบอร์ 320 ซึ่งจะเห็นว่าคอยล์ที่มีพื้นที่บริเวณขามาก (พื้นที่ขนาด 12, 16, 20 และ 32 ตารางมิลลิเมตร) ยังคงยึดติดอยู่กับแผ่นสแตนเลสอยู่ โดยพื้นที่ที่ติดอยู่คิดเป็น 57.75 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่นิกเกิลทั้งหมด

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าความเรียบของพื้นผิวสแตนเลสทำให้ความขรุขระของผิวสแตนเลสลดลง ส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลสลดน้อยลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจึงลดลงด้วย ช่วยให้คอยล์นิกเกิลหลุดลอกออกมาจากแผ่นสแตนเลสหลังจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีได้ โดยหากใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 1500 ขึ้นไปจะทำให้คอยล์นิกเกิลที่มีขนาดพื้นที่น้อยกว่า 32 ตารางมิลลิเมตร หลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้อย่างสมบูรณ์ทุกชิ้น



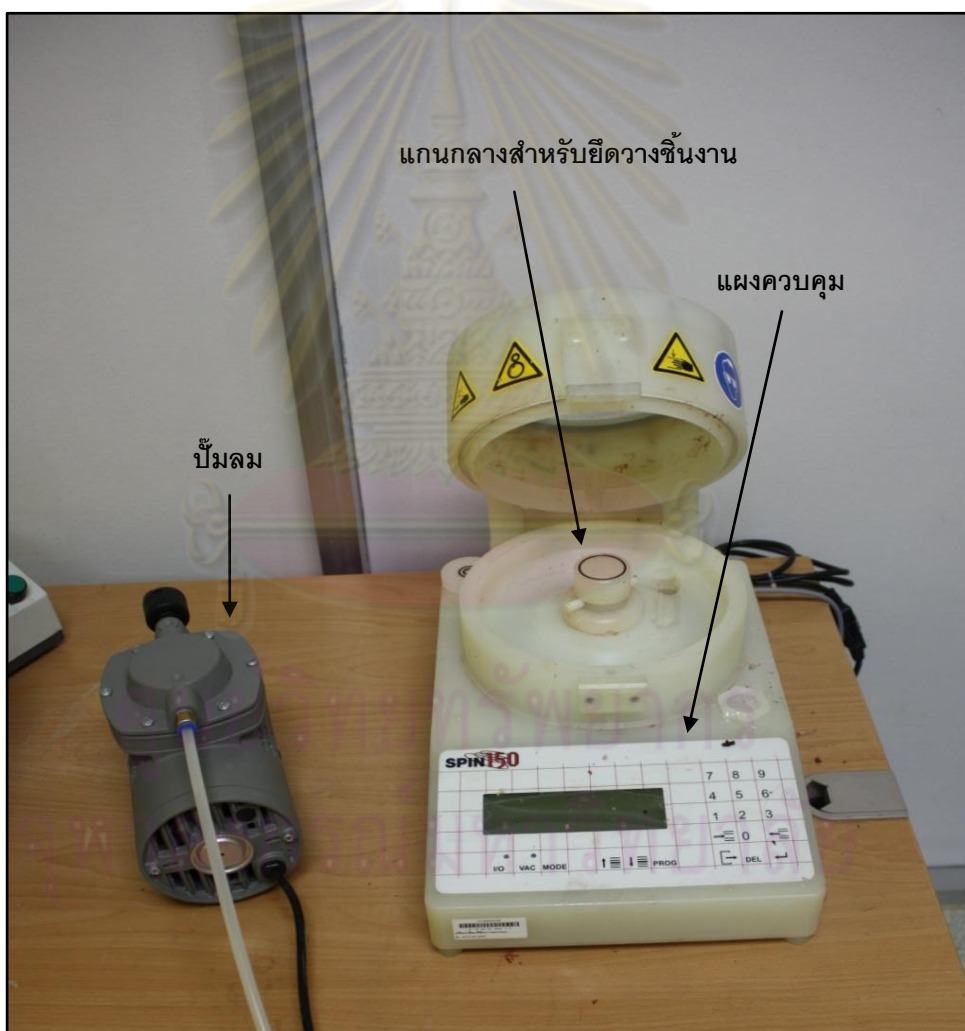
รูปที่ 5.5 ชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 ซึ่งยังคงมีคอยล์นิกเกิลติดอยู่

(Udomtarak and Charassuriyong, 2010)

ภาคผนวก จ

การใช้เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบหมุน

เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบหมุน (Spin coater) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในขั้นตอนการสร้างแผ่นเมมเบรน เพื่อกำหนดความหนาของแผ่นเมมเบรน และทำให้ PDMS กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องสปินเนอร์ รุ่น spin 150-NPP รหัส SIN J.024.820 ซึ่งนอกจากเครื่องสปินเนอร์ แล้วอุปกรณ์ที่ติดตั้งมาพร้อมกันคือ ปั๊มลม (vacuum pump) ที่ต่อเข้ากับท้ายเครื่อง สำหรับดูดให้ชิ้นงานติดอยู่กับแกนของเครื่องสปินเนอร์ ดังแสดงในรูปที่ จ.1

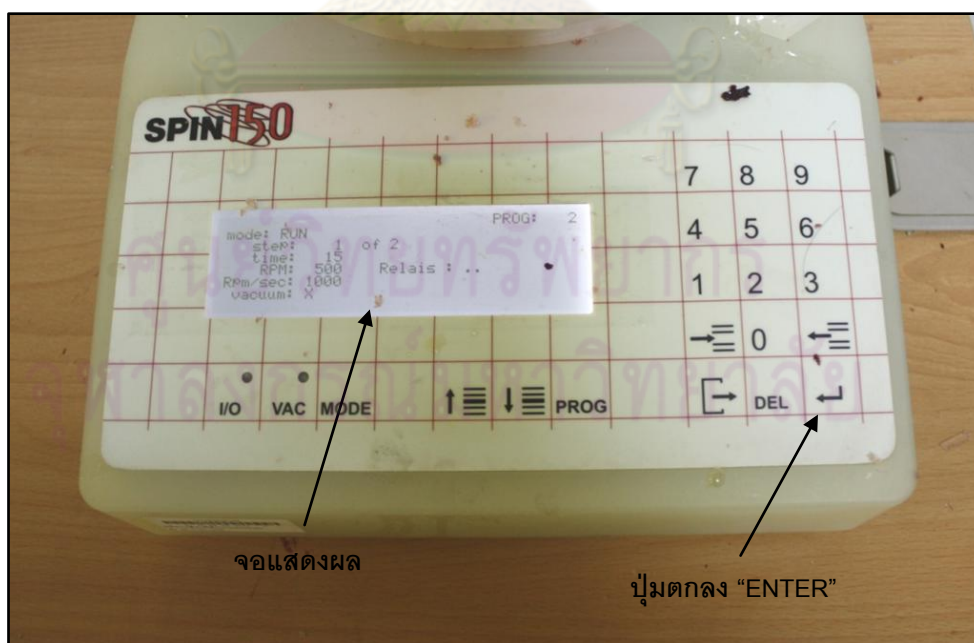


รูปที่ จ.1 เครื่องสปิน รุ่น spin 150-NPP พร้อมปั๊มลม

จ.1 การตั้งโปรแกรมการทำงานให้กับเครื่องสปินเนอร์

ในการใช้งานเครื่องสปินเนอร์จำเป็นต้องมีการตั้งโปรแกรมไว้ก่อน เพื่อกำหนดเงื่อนไขและพารามิเตอร์ของการใช้งาน เช่น การกำหนดค่าอัตราการสปิน (Spin rate) การกำหนดเวลาในการสปิน การกำหนดให้เครื่องทำการ vacuum เป็นต้น แผงควบคุมที่ใช้ในการตั้งโปรแกรม แสดงในรูปที่ จ.2 โดยมีขั้นตอนในการตั้งโปรแกรมดังนี้

1. หลังจากเปิดเครื่องโดยปุ่มเปิดจะอยู่ด้านหลังของตัวเครื่อง ขั้นตอนแรกเริ่มจากเลือกโปรแกรมที่จะต้องการตั้ง โดยกดที่ปุ่ม “PROG” กดตัวเลข แล้วจึงกดปุ่มตกลง (ENTER)
2. กำหนดเงื่อนไขและรายละเอียดของโปรแกรมที่เลือก โดยกดที่ปุ่ม “MODE” เลื่อนลูกศรลงเพื่อกำหนดรายละเอียดต่างๆ เช่น อัตราการสปิน (RPM) เวลาที่ใช้ (TIME) เป็นต้น กดปุ่ม “VAC” เพื่อเลือกให้เครื่องใช้ปั๊มในการดูดชิ้นงาน
3. หลังจากกำหนดรายละเอียดเรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม “MODE” เพื่อกลับไปหน้าใช้งาน
4. การใช้งานโปรแกรมที่ตั้งขึ้นให้กดปุ่ม “PROG” แล้วเลือกโปรแกรม สุดท้ายจึงกดปุ่ม “I/O” เพื่อใช้งาน



รูปที่ จ.2 แผงควบคุมของเครื่องสปิน

จ.2 การใช้งานเครื่องสปินเนอร์

1. เปิดให้ปั๊มลม (vacuum pump) ทำงาน
2. เลือกโปรแกรมที่ต้องการใช้งาน โดยการกดปุ่ม “PROG” แล้วเลือกตัวเลข
3. วางฐานของชิ้นงานที่ต้องการจะสปินลงบนแกนกลางของเครื่อง
4. กดปุ่ม “VAC” เพื่อให้ชิ้นงานยึดติดอยู่กับแกนกลาง

ข้อควรระวัง : ในกร vacuum ชิ้นงาน จะมีคำว่า “missing vac” แสดงขึ้นที่จอแสดงผล หากชิ้นงานไม่ถูกยึดเข้ากับแกนกลางแล้ว วิธีแก้ไขให้ใช้วิธีการกดชิ้นงานเข้ากับแกนกลางเพื่อให้รูรั่วของอากาศระหว่างชิ้นงานกับยางรองหายไป หากไม่ได้ผลอาจเกิดจากยางรองของแกนกลางเสื่อมสภาพ ต้องทำการเปลี่ยนยางรองใหม่

5. เท PDMS หรือสารที่จะสปินลงบนกึ่งกลางของชิ้นงาน
6. ปิดฝาเครื่องแล้วกดปุ่ม “I/O” เพื่อเริ่มการสปิน
7. หลังสปินเรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม “VAC” อีกครั้ง เพื่อปล่อยชิ้นงานออกจากแกนและทำความสะอาดแกนสปินของเครื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

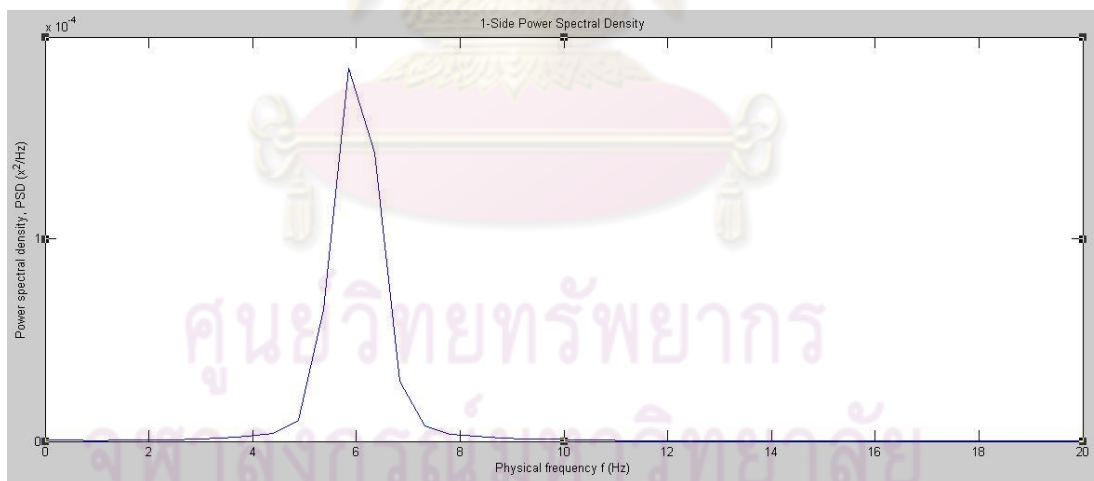
ภาคผนวก จ

รายละเอียดของชุดคำสั่งโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

ลักษณะของข้อมูลที่บันทึกออกมาจากเครื่องออสซิลโลสโคปจะเป็นไฟล์ข้อมูล .csv ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 3 คอลัมน์ คือ เวลา สัญญาณขาเข้าของความต่างศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ และสัญญาณขาออกแสดงระยะกระดกของเมมเบรน โดยแสดงเป็นสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องวัดมีหน่วยเป็นโวลต์ ในกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณจะนำไฟล์ข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูล 3 คอลัมน์นี้เข้าโปรแกรม Matlab เพื่อหาค่าต่างๆ ดังนี้

จ.1 ชุดคำสั่งโปรแกรมการหาความถี่ขาออกของสัญญาณ

ชุดคำสั่งในการหาความถี่ขาออกของสัญญาณประกอบด้วยชุดคำสั่ง 2 ชุด โดยชุดแรกเป็นชุดคำสั่งสำหรับการหากราฟของ Power Spectrum Density ที่เขียนขึ้นโดย รศ.ดร.อศิ บุญจิตราดุลย์ จะได้กราฟลักษณะดังรูปที่ จ.1 เมื่อได้ข้อมูลจากกราฟแล้วจะนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่ชุดคำสั่งที่ 2 คือ การหาความถี่ที่ตำแหน่งที่มีค่า Power Spectrum Density สูงที่สุด



รูปที่ จ.1 ตัวอย่างกราฟแสดง Power Spectrum Density ของการเคลื่อนที่ของเมมเบรน

จ.1.1 ชุดคำสั่ง Power Spectrum Density

```
function [tx,txF,F1,F2,h,y] = FFTandPSDSpectrum_Structure(x,fs,varargin)
```

```

[WindowName,SpectrumEstimator] =
Get_DefaultsAndInputs_FFTandPSDSpectrum_Structure(varargin{:});

if (size(x,1)==1),    x=x';    end

    N = max(size(x));

    ts = 1/fs;

    t = 0:1:(N-1);    t = t';

    t = t*ts;

    tx(:,1) = t;    tx(:,2) = x;

    figure;    plot(t,x);

NF = 2^nextpow2(N);
Fz = zeros(NF-N,1);
tF = (0:1:(NF-1))*ts;    tF = tF';
xF = [x;Fz];
txF = [tF xF];
N1Side = NF/2+1;
N2Side = NF;
f1Side = (0:1:(NF/2))*(fs/NF);    f1Side = f1Side';
f2Side = -(NF/2):1:(NF/2-1))*(fs/NF);    f2Side = f2Side';

X2Side = fft(x,NF);
X1Side = X2Side(1:1:N1Side,:)*2;
X1SidePhysical = X2Side(1:1:N1Side,:)*(2/N);
    for k=1:(NF/2)
        m = k+NF/2;
        TEMPX2Side(m,1) = X2Side(k,1);
    end
    for k=(NF/2+1):NF
        m = k-NF/2;
        TEMPX2Side(m,1) = X2Side(k,1);

```

```

end

clear X2Side;

X2Side = TEMPX2Side;

X2SidePhysical = X2Side*(1/N);

Xm1SidePhysical = abs(X1SidePhysical);

Xp1SidePhysical = phase(X1SidePhysical)*180/pi;

Xm2SidePhysical = abs(X2SidePhysical);

Xp2SidePhysical = phase(X2SidePhysical)*180/pi;

figure; plot(f1Side,Xm1SidePhysical);
title('1-Side FFT of x(t), X(f):Amplitude');
xlabel('Physical frequency f (Hz)');
ylabel('Physical amplitude of X(f) in unit of [x]');

figure; plot(f1Side,Xp1SidePhysical);
title('1-Side FFT of x(t), X(f):Phase');
xlabel('Physical frequency f (Hz)');
ylabel('Phase of X(f) (deg)');

figure; plot(f2Side,Xm2SidePhysical);
title('2-Side FFT of x(t), X(f):Amplitude');
xlabel('Physical frequency f (Hz)');
ylabel('Physical amplitude of X(f) in unit of [x]');

figure; plot(f2Side,Xp2SidePhysical);
title('2-Side FFT of x(t), X(f):Phase');
xlabel('Physical frequency f (Hz)');
ylabel('Phase of X(f) (deg)');

F1(:,1) = f1Side;    F1(:,2) = Xm1SidePhysical;    F1(:,3) = Xp1SidePhysical;
F1(:,4) = X1SidePhysical;

F2(:,1) = f2Side;    F2(:,2) = Xm2SidePhysical;    F2(:,3) = Xp2SidePhysical;
F2(:,4) = X2SidePhysical;

```

```

s = strcat('h=', 'spectrum.', SpectrumEstimator, ';');
eval(s);          % h = spectrum.SpectrumEstimator
h.WindowName = WindowName;
y = psd(h,xF,'FS',fs);
figure;   plot(y.Frequencies,y.Data);
          title('1-Side Power Spectral Density');
          xlabel('Physical frequency f (Hz)');
          ylabel('Power spectral density, PSD (x^2/Hz)');
figure;   plot(y.Frequencies,10*log10(y.Data));
          title('1-Side Power Spectral Density');
          xlabel('Physical frequency f (Hz)');
          ylabel('Power spectral density, PSD (dB/Hz)');
function [WindowName,SpectrumEstimator] =
Get_DefaultsAndInputs_FFTandPSDSpectrum_Structure(varargin)
    WindowName = 'Hamming';
    SpectrumEstimator = 'periodogram';
    niv = nargin;
    for i=0:niv,
        if (i==1),   WindowName = varargin{1};           end
        if (i==2),   SpectrumEstimator = varargin{2};   end
        if (i>2),   error('The optional input arguments must be WindowName and
SpectrumEstimator only. Not more.');
```

end

จ.1.2 ชุดคำสั่งหาตำแหน่งที่จุดสูงสุด

```

function [fmax] = PNNfindPeak(data,fs)
t=data(:,1);
x=data(:,3);
```



```
[tx,txF,F1,F2,h,y] = FFTandPSDSpectrum_Structure(x,fs);
```

```
[fmax,Xmax] = findpeak(y.Frequencies,y.Data);
```

จ.2 ชุดคำสั่งโปรแกรมการหาระยะกระดกสูงสุด

การหาระยะกระดกสูงสุดจะนำข้อมูลดิบมาทำการเฉลี่ยโดยใช้วิธี Moving Average ก่อน เพื่อให้สัญญาณราบเรียบมากยิ่งขึ้น โดยลักษณะของชุดคำสั่งนอกจากต้องใส่ข้อมูลดิบแล้วยังต้องใส่ค่า "r" ซึ่งเป็นการบอกว่าการเฉลี่ยทั้งหมดกี่ค่า หลังจากนั้นโปรแกรมจะคำนวณผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าสัมบูรณ์ของจุดต่ำสุดกับจุดสูงสุด "Amp" โดยชุดคำสั่งมีรายละเอียดดังนี้

```
function [Amp,y] = PNNmovAvg(data,r)
```

```
t=data(:,1);
```

```
x=data(:,3);
```

```
N = max(size(x));
```

```
for i = 1+r:N-r;
```

```
    m = x(i-r:i+r);
```

```
    y(i,1) = mean(m);
```

```
end
```

```
z=zeros(r,1);
```

```
y=[y;
```

```
z];
```

```
plot(t,x,'b',t,y,'r')
```

```
PMax=max(y);
```

```
PMin=min(y);
```

```
Amp = (PMax-PMin)/2;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภากร นนทิวฒน์วณิช เกิดเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2529 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนดรุณศึกษา อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในปีการศึกษา 2540 ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอัสสัมชัญธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2546 และวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย