

# การพัฒนาอเตอร้จลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

นายพิทยา ดีกล้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2552

**DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC  
MICROMOTORS**

**Pittaya Deekla**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2009**

## การพัฒนามอเตอร์อุตสาหกรรมไฟฟ้าสถิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(รศ. ดร. กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

---

(อ. ดร. นิमित ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(รศ. ดร. ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)

กรรมการ

---

(ผศ. ดร. บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

---

(ดร. ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์)

กรรมการ

---

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปีจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

---

(รศ. น.อ. ดร. วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พิทยา ดิกกล้า : การพัฒนามอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต (DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC MICROMOTORS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง, 169 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนากระบวนการสร้าง มอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต โครงสร้างของมอเตอร์ที่จะทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า คือ มอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือเกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ อันเนื่องมาจากการป้อนแรงดันที่สเตเตอร์ แล้วทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตเป็นลักษณะเช่นเดียวกับหลักการของแผ่นคู่ขนาน กระบวนการที่ใช้สร้างมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตคือ กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์ ด้วยทำการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เพื่อสร้างโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์จากนั้นทำการเคลือบโลหะนำไฟฟ้าลงบนชิ้นส่วนทั้งสองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าโดยที่โรเตอร์ทำการเคลือบโลหะทั่วทั้งโครงสร้าง ส่วนสเตเตอร์ทำการเคลือบโลหะเพียงด้านเดียวจากนั้นนำมายึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วยสารไวแสงชนิดบวก AZ1512 เพื่อให้ได้โครงสร้างที่วางอยู่บนฐานรองที่นำไฟฟ้าโดยมีสารไวแสงสารไวแสงชนิดบวก AZ1512 เป็นฉนวนกั้นระหว่างสเตเตอร์กับแผ่นวงจรพิมพ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์เท่ากับ  $882\ \mu\text{m}$  มีความหนา  $300\ \mu\text{m}$  จำนวนโรเตอร์ต่อสเตเตอร์เป็น 8 ต่อ 12 ขั้ว แรงดันขับเคลื่อน  $600\ \text{V}$  โดยงานวิจัยขั้นต้นนี้จะเน้นการพัฒนากระบวนการและการแก้ปัญหาให้มอเตอร์จุลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้จริงก่อนแล้วจึงทำการปรับปรุงกระบวนการสร้างและคุณลักษณะของการทำงานให้ดียิ่งขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_



PITTAYA DEEKLA : DEVELOPMENT OF ELECTROSTATIC  
MICROMOTORS. THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D.,  
169 PP.

#### MEMS/MICROMOTOR/LIGA

This research aims to develop and fabricate a micromotor. Micromotor is a type of variable capacitance micromotor and comprises 2 parts, stator and rotor. Movement of rotor relies on the applying voltage between the stator and rotor. Using electrostatic force driving them, the stator and rotor similarly work in the principle of parallel plate. In fabrication, micromotor uses UV and x-ray lithography technique in patterning process. X-ray irradiation exposes on negative photoresist (SU-8) for patterning construction of the stator and rotor coated by metallic membrane as electrically conductive base plate. The rotor is coated all dimensions but the stator is coated just one side and it is stuck on print circuit board (PCB) by using AZ 1512 positive photoresist as adhesive layer. AZ 1512 acts as insulator separating the stator and PCB. The rotor has a diameter of 882  $\mu\text{m}$  and thickness of 300  $\mu\text{m}$ . The ratio of stator and rotor is 8:12. The driving voltage of 600 V is applied. Overall, this project is to develop the process and find out resolution of micromotor to be able to rotate first and then try new method of fabrication including improve more performance of micromotor.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

Co-advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในระหว่างการดำเนินการวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ดร.ประพงษ์ คล้ายสุวรรณย์ นักวิจัยสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้แนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการ

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัยและให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณบิดาร มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใ ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่ง

พิทยา ดิกล้ำ

## สารบัญ

### หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	5
2.1 ระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม.....	5
2.2 มอเตอร์อุตสาหกรรมแบบไฟฟ้าสถิต.....	5
<b>3 กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม</b> .....	13
3.1 กระบวนการลิโธกราฟี.....	13
3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	17
3.2.1 การเตรียมสารละลายนิเกิลสำหรับการชุบด้วยไฟฟ้า.....	19
3.2.2 การเตรียมสารละลายเงินสำหรับการชุบด้วยไฟฟ้า.....	19
3.3 กระบวนการเคลือบโลหะ.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์.....	23
3.4.1 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์ จุดภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....	23
3.4.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์ จุดภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....	28
3.4.3 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์ จุดภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....	31
3.5 สรุป.....	35
<b>4 การออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....</b>	<b>36</b>
4.1 การออกแบบโครงสร้างมอเตอร์จุดภาค.....	38
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความจุไฟฟ้าและแรงบิด.....	40
4.3 ระบบพลวัตของมอเตอร์.....	49
4.4 การหาผลเฉลยของสมการพลวัต.....	53
4.4.1 การสร้างการหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วยวิธีการ คำนวณเชิงวิเคราะห์.....	53
4.4.2 การหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	56
4.4.3 การหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วย SCICOS.....	60
4.5 ผลการจำลองการตอบสนองของระบบ.....	61
4.6 สรุป.....	68
<b>5 กระบวนการพัฒนามอเตอร์จุดภาคแบบไฟฟ้าสถิต.....</b>	<b>69</b>
5.1 การสร้างมอเตอร์จุดภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....	69
5.2 การสร้างมอเตอร์จุดภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....	81
5.2.1 การสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....	82
5.2.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....	86
5.3 การสร้างมอเตอร์จุดภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....	92
5.3.1 การสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....	92

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

5.3.2	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะ นำไฟฟ้าบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	95
5.3.2.1	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติด ด้วยกาวอีพอกซี.....	96
5.3.2.2	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะอลูมิเนียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติด ด้วยกาวอีพอกซี.....	102
5.3.3	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำ ไฟฟ้าสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วย AZ1512.....	105
5.3.3.1	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติด ด้วยสารไวแสง AZ1512.....	105
5.3.3.2	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบน แผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	111
5.3.4	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำ ไฟฟ้าหนึ่งชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วย AZ1512.....	117
5.3.4.1	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะยึดกับพอลิอิมิด์ด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่น วงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	117
5.3.4.2	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่น วงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	122

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.4.3	การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอิมพอกซ์ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์.....	125
5.4	สรุป.....	132
6	การทดสอบและผลการทดสอบ.....	133
6.1	วงจรควบคุม.....	133
6.2	การเชื่อมสายของชิ้นงาน.....	138
6.3	การทดสอบการเคลื่อนที่.....	141
6.4	แนวทางการควบคุมมอเตอร์จุลภาคให้หมุนต่อเนื่อง.....	145
6.5	สรุป.....	147
7	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	148
7.1	สรุปงานวิจัย.....	148
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	150
7.3	การประยุกต์ใช้งานในอนาคต.....	151
	รายงานอ้างอิง.....	152
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์.....	154
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุมมอเตอร์.....	159
	ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	163
	ประวัติผู้เขียน.....	169

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิตและแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
3.1 ตัวอย่างสารละลายสำหรับชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	18
4.1 สัญลักษณ์ของมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต.....	39
4.2 ขนาดพารามิเตอร์มอเตอร์จูลภาคของ Emdemmano และงานวิจัย.....	66
5.1 ขนาดพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ออกแบบและได้จากการวัด.....	130
6.1 ผลการทดสอบแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของแหล่งจ่ายแรงดันสูง.....	136

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างอย่างง่ายของมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต.....2
2.1	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Tai (1989).....7
2.2	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Mehregany (1992).....7
2.3	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Yasseen (1999).....8
2.4	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Li (1999).....9
2.5	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Endomano (2003).....10
2.6	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคของ Vinhais (2006).....11
3.1	เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการกระบวนการลิโธกราฟี.....14
3.2	การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมุนเคลือบ.....15
3.3	ขั้นตอนการหล่อสารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์จากผงแห้ง.....16
3.4	ชั้นของสารไวแสงหลักจากการหล่อผงแห้ง.....17
3.5	การชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....18
3.6	เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ.....20
3.7	เครื่องเคลือบโลหะแบบการสปัตเตอร์.....22
3.8	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาค ด้วยโครงสร้างโลหะ.....24
3.9	แผ่นพอลิอิมิดเคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์.....25
3.10	ลวดลายหลังฉายแสงสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้าง มอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....26
3.11	หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าสำหรับสร้าง มอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....27
3.12	หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าสำหรับสร้าง มอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....27



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สมบูรณ์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....28
3.14	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่เกิดความเสียหายสำหรับการสร้าง มอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....29
3.15	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของโรเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์สำหรับการสร้าง มอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....29
3.16	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์สำหรับการสร้าง มอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....30
3.17	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน.....31
3.18	กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 32
3.19	หน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสเตเตอร์และโรเตอร์สำหรับการสร้าง มอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 33
3.20	หลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและล้างสารไวแสงสำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 33
3.21	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์รูปสำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 34
3.22	หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของโรเตอร์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....35
4.1	ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต.....36
4.2	ส่วนประกอบของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตแบบไฟฟ้าสถิต.....37
4.3	ขนาดแรงดันพียงหลายสำหรับตัวนำที่วางห่างกันในอากาศในระยะต่าง ๆ.....38
4.4	ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์จุลภาคที่ออกแบบ.....39
4.5	พื้นที่สำหรับพิจารณาสนามไฟฟ้าแบบแผ่น.....42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.6	ภาคตัดขวางของตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน.....	42
4.7	แผ่นคู่ขนานสำหรับพิจารณาแรงไฟฟ้าสถิต.....	43
4.8	ตัวนำรูปทรงกระบอกสำหรับพิจารณาแรงไฟฟ้าสถิต.....	45
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับมุมเหลื่อมซ้อน.....	48
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมเหลื่อมซ้อน.....	49
4.11	แสดงพารามิเตอร์สำหรับระบบพลวัต.....	50
4.12	โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคสำหรับหาโมเมนต์ความเฉื่อย.....	51
4.13	ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์.....	57
4.14	ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข.....	58
4.15	กราฟเปรียบเทียบความเร็วและความคลาดเคลื่อนกับเวลาของ วิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์และการคำนวณเชิงตัวเลข.....	59
4.16	การจำลองระบบพลวัตด้วย SCICOS.....	60
4.17	ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยโปรแกรม SCICOS.....	61
4.18	การตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันได.....	62
4.19	ผลการตอบสนองของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุต.....	62
4.20	ผลการตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์.....	65
4.21	ผลการตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของโรเตอร์.....	66
4.22	การตอบสนองต่อแรงดันอินพุตของ Emdemmano และงานวิจัย.....	67
4.23	เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วต่อแรงดันอินพุตของ Emdemmano และงานวิจัย.....	68
5.1	หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....	70
5.2	หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาค ด้วยโครงสร้างโลหะที่ผ่านการกลบลดตาย.....	72
5.3	หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....	72
5.4	กระบวนการสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ.....	73
5.5	ลวดลายของชั้นกราวด์ของมอเตอร์จูลภาคโครงสร้างโลหะ.....	76

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6	แมริงหลังชูนิกเกิลของมอเตอร์จุลภาคโครงสร้างโลหะ..... 77
5.7	แกนโรเตอร์หลังการฉายแสงและการชูนิกเกิลของมอเตอร์จุลภาค โครงสร้างโลหะ..... 78
5.8	ลวดลายหลังฉายแสงสำหรับสร้างวัสดุชั่วคราวของโครงสร้างโลหะ..... 78
5.9	ลวดลายหลังชุบทองแดงเป็นวัสดุชั่วคราวของโครงสร้างโลหะ..... 79
5.10	โครงสร้างของมอเตอร์หลังฉายแสงและชูนิกเกิล..... 80
5.11	หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 82
5.12	กระบวนการสร้างโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 83
5.13	หลังฉายรังสีเอ็กซ์และล้างสารไวแสงของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะ แบบแยกส่วน..... 84
5.14	หลังชุบโลหะนิกเกิลของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 85
5.15	หลังสกัดสารไวแสงออกของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 85
5.16	หลังสกัดโลหะไทเทเนียมและทองแดงของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะ แบบแยกส่วน..... 86
5.17	กระบวนการสร้างสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 86
5.18	กราวด์หลังชูนิกเกิลของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 89
5.19	หลังชูนิกเกิลและจัดเรียงของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 90
5.20	หลังสกัดสารไวแสงของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน ด้วยการพลาสมา..... 90
5.21	หลังสกัดโลหะทองแดงสำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน..... 91
5.22	กระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 92
5.23	โรเตอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 94
5.24	ก่อนและหลังขัดกราไฟต์ของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบโลหะนำไฟฟ้า..... 94

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.25 เคลือบโลหะครั้งที่สองบนโรเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....	95
5.26 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	96
5.27 ลวดลายสเตเตอร์ก่อนและหลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	98
5.28 หลังเคลือบโครเมียมบนสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	98
5.29 ประกอบชิ้นงานบนกระจกด้วย SU-8 โดยใช้อุปกรณ์ทับชิ้นงานสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	99
5.30 ชิ้นงานหลังขั้วคราไฟต์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	99
5.31 การประกอบชิ้นงานบนกระจกด้วยการหล่อ SU-8 สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	100
5.32 หลังประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์ของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	101
5.33 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	102
5.34 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	104
5.35 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	105
5.36 หลังยึดชิ้นงานบนกาวสองหน้าและกระจกสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	108
5.37 หลังขั้วคราไฟต์และเคลือบโครเมียมบนสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	109

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 ประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะ สองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	110
5.39 การประกอบชิ้นงานบนกระจกด้วยการหล่อ SU-8 สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบ โลหะ โครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี.....	110
5.40 หลังพลาสมาสกัดสารไวแสงออกจากสเตเตอร์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบ โลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	111
5.41 การสร้างสเตเตอร์ด้วย โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นยึดกับกระจก ด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	112
5.42 หลังยึดชิ้นงานด้วยอีพอกซีสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้น ยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วย สารไวแสง AZ1512.....	114
5.43 หลังเคลือบ โลหะสองชั้นสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นยึดกับ กระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	115
5.44 หลังประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์ สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	114
5.45 หลังล้างสารไวแสงสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะสองชั้นยึดกับ กระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วย สารไวแสง AZ1512.....	116
5.46 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะ สองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วย สารไวแสง AZ1512.....	116
5.47 การสร้างสเตเตอร์ด้วย โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบ โลหะยึดกับพอลิอิมิดด้วย อีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	117

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.48 หลังติดตั้งงานบนพอลิอีไมด์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอีไมด์ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	120
5.49 หลังขัดกราไฟต์ออกสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอีไมด์ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	120
5.50 ก่อนและหลังล้างสารไวแสงสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอีไมด์ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	121
5.51 หลังการพลาสมาสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอีไมด์ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	122
5.52 หลังยึดชิ้นงานบนแผ่นใสสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	123
5.53 หลังขัดกราไฟต์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	124
5.54 หลังยึดชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	124
5.55 หลังล้างสารไวแสงสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512.....	125
5.56 หลังขัดกราไฟต์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์.....	126
5.57 ประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยกาวอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์.....	127

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.58 หลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใส ด้วยกาวอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์.....	129
5.59 การสวมสเตเตอร์กับโรเตอร์สำหรับการสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้าง พอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า.....	129
5.60 ขนาดของมอเตอร์จูลภาคโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าที่สร้างเสร็จ.....	130
5.61 ผลการจำลองการตอบสนองของมอเตอร์จากโครงสร้างจริง กับโครงสร้างที่ออกแบบ.....	131
5.62 เปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของมอเตอร์ระหว่างโครงสร้าง นิกเกิลกับ SU-8.....	131
6.1 การเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้น.....	134
6.2 ชุดขับมอเตอร์จูลภาคในงานวิจัย.....	135
6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของชุดขับ.....	136
6.4 สัญญาณแรงดันที่ได้จากชุดขับมอเตอร์.....	138
6.5 การเชื่อมต่อสายมอเตอร์จูลภาค.....	139
6.6 การเชื่อมต่อสายมอเตอร์เข้ากับชุดขับแรงดันสูง.....	140
6.7 กราฟและสเตเตอร์ก่อนและหลังป้อนแรงดัน 600 V ความถี่ 2 Hz.....	141
6.8 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อทำการป้อนแรงดัน 600 V ความถี่ 2 Hz.....	143
6.9 ความเสียหายต่อมอเตอร์จูลภาคหลังทำการป้อนแรงดัน 900 V ความถี่ 2 Hz.....	144
6.10 ตัวอย่างการป้อนสัญญาณอินพุตเพื่อให้มอเตอร์จูลภาคเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง.....	146
7.1 แนวทางการติดตั้งตัวตรวจวัดความเร็วสำหรับควบคุมแบบป้อนกลับ.....	150
7.2 แนวทางการประยุกต์การใช้งานมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต.....	151

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) คือ เครื่องกลหรืออุปกรณ์ขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuits : IC) ระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย ส่วนของระบบจักรกลเพื่อขับเคลื่อนการทำงานและส่วนของระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน มีขนาดตั้งแต่ 1-1000  $\mu\text{m}$  ได้แก่ ตัวขับเคลื่อนจุลภาคเช่น มอเตอร์ วาล์ว ปั๊ม สวิตช์ เกียร์ ตัวตรวจรู้จุลภาค เช่น ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ วัดแสง วัดความชื้น ความเร่ง ซึ่งมีทั้งส่วนจักรกลและส่วนของไฟฟ้าจะทำงานร่วมกันรวมเรียกว่าเป็นกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (Microfabrication) สามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ได้แก่ เครื่องมือวัด เครื่องมือควบคุม เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เริ่มเข้ามามีบทบาทที่สำคัญทั้งทางด้านงานวิจัย และอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายทั้งในเรื่อง ระบบควบคุม ชีวเวชศาสตร์ (Biomedical science) การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ดุลมนิรักษของรถยนต์ และระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการดำรงความเป็นอยู่ของมนุษย์ในโลกปัจจุบัน เนื่องจากระบบมีขนาดเล็กส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่ลดลง ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง รวมถึงองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่สามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านี้มีเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มการใช้ประโยชน์มากขึ้นเช่นกัน

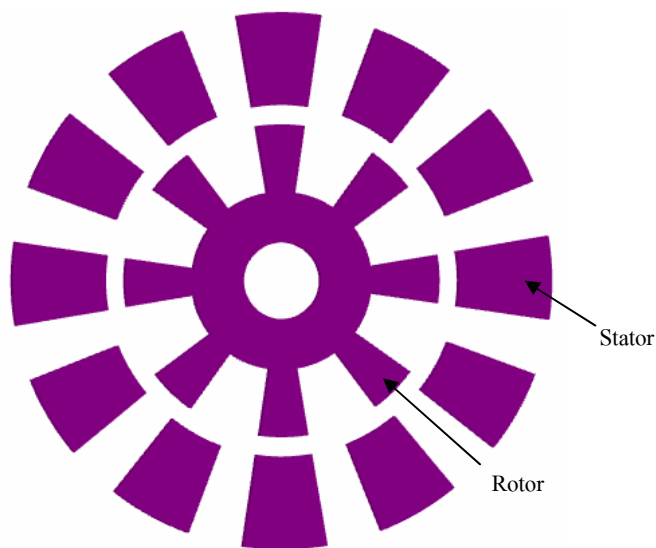
องค์ประกอบของระบบกลไฟฟ้าจุลภาคแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ตัวตรวจรู้จุลภาคหรือเรียกว่าเซนเซอร์คือ อุปกรณ์ที่รับรู้ปริมาณทางกายภาพ เช่น อุณหภูมิ ความดัน แรง แสง เสียง ฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นต้น แล้วเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพนั้นเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้แก่ กระแส แรงดัน หรือแม้แต่ความถี่ ส่วนตัวขับเคลื่อนจุลภาค คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลเพื่อใช้ขับเคลื่อนทางกายภาพ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนากระบวนการสร้าง การผลิตมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนหนึ่งในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยเทคโนโลยีการผลิตโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง โดยใช้รังสีเอ็กซ์ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์และใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตสามารถแบ่งหลายชนิด ได้แก่ Wobble micromotor,



Induction micromotor, Variable capacitance micromotor (VCM), Ultrasonic micromotor, Linear stepper micromotor เป็นต้น

โครงสร้างของมอเตอร์ที่จะทำการพัฒนาและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ เป็นชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า หรือ Variable capacitance micromotors (VCM) มีจำนวนขั้วสเตเตอร์ ต่อโรเตอร์เท่ากับ 12 ต่อ 8 สามารถแสดงโครงสร้างอย่างง่ายของมอเตอร์ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างพื้นฐานสำคัญสองส่วนคือ โรเตอร์กับสเตเตอร์ ดังรูปที่ 1.1 เป็นลักษณะของมอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือเกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ง่ายต่อการป้อนแรงดันที่ขั้วอิเล็กโทรด และเมื่อต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนตำแหน่ง ทำได้โดยการป้อนแรงดันสูงเข้าที่ขั้วสเตเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ส่วนโรเตอร์นั้นสามารถเคลื่อนที่ได้และต่อลงกราวด์ จากโครงสร้างของมอเตอร์เป็นแบบ 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสจะประกอบด้วยขั้วสเตเตอร์ จำนวน 4 ขั้ว สัญญาณในการป้อนจะเป็นลักษณะพัลส์แรงดันสูงคล้ายกับการขับสเต็ปมอเตอร์ เมื่อเกิดแรงดันระหว่างขั้วทั้งสอง จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์แล้วส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกันเป็นลักษณะเช่นเดียวกับแผ่นคู่ขนานทำให้โรเตอร์ เคลื่อนที่เป็นวงกลมไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะหยุดทำการป้อนแรงดัน การสร้างมอเตอร์ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการพัฒนาเทคนิค การแก้ปัญหา และกระบวนการสร้าง ให้เป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปพัฒนาต่อยอด เป็นเทคโนโลยีที่หลากหลายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อใช้งานได้จริง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างอย่างง่ายของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- ศึกษา ออกแบบและขับเคลื่อนมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต
- ทดสอบการทำงานของมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต
- พัฒนาองค์ความรู้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างจูลภาคที่เกี่ยวข้อง

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- สร้างมอเตอร์โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์
- สร้างมอเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อทำการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้า

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- ทำการออกแบบโครงสร้างรูปร่าง 2 มิติ
- สร้างมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์และรังสีอัลตราไวโอเล็ต

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ดำรวจและศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- ศึกษากระบวนการผลิตโครงสร้างระบบกลไฟฟ้าจูลภาค
- ออกแบบมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต
- สร้างมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิตและวงจรควบคุม
- พัฒนา ปรับปรุงกระบวนการสร้างและการผลิตมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต
- วิเคราะห์ สรุปผลและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการสร้างและทดสอบการทำงาน

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้กระบวนการสร้างและเทคนิคการผลิตมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต
- สามารถนำไปประยุกต์เกี่ยวกับกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในด้านต่าง ๆ
- เข้าใจถึงหลักการทำงานและการควบคุมมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำได้กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอน การดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิตในระบบกลไฟฟ้าจูลภาค บทที่ 3 กระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจูลภาค ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเช่น กระบวนการลิโทกราฟี กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กระบวนการเตรียมสารไวแสง และการสร้างหน้ากักกันรังสีเอ็กซ์ บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บทที่ 5 การสร้างและพัฒนากระบวนการผลิตมอเตอร์จูลภาค แบบไฟฟ้าสถิต บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบ บทที่ 7 เป็นบทสรุปงานวิจัยและ ข้อเสนอแนะและการประยุกต์ใช้งาน

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) เริ่มได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เป็นศาสตร์ที่รวบรวมเอาความรู้และวิชาการหลากหลายสาขาทั้งด้านไฟฟ้า เครื่องกล วัสดุศาสตร์ ชีววิทยา เคมี ฟิสิกส์ รวมทั้งด้านระบบการวัดและระบบควบคุม ผสมเข้าด้วยกันอย่างลงตัว เพื่อสร้างหรือผลิตอุปกรณ์ขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรถึงมิลลิเมตรที่มีความสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านอุตสาหกรรม ยานยนต์ การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุม ระบบการสื่อสาร ดังตัวอย่างเช่น ตัวตรวจรู้ความชื้น ตัวตรวจรู้ความดัน ตัวตรวจรู้ความเร่งสำหรับรถลมนิรภัยและระบบความปลอดภัย อุปกรณ์วัดความโน้มเอียงสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น อุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาส่วนใหญ่แล้ว เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นและสำคัญต่อชีวิตประจำวันทั้งสิ้น

การสร้างหรือผลิตอุปกรณ์ทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นใช้เทคนิคการสร้างพื้นฐานจากการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit : IC) จึงทำให้ได้ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็ก ส่วนระบบการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ นั้นจะใช้เทคนิคการสร้างที่ได้แก่ การกลึง การหล่อ การเจาะ การฉีดยา การรีด หรือการอัด เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน เทคนิคหรือวิธีการดังกล่าวไม่สามารถสร้างโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลงได้ เพราะมีขีดจำกัดทางด้านรูปร่างและสิ่งนี้เองที่เป็นข้อได้เปรียบของระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นงานขนาดเล็กและซับซ้อนได้มากกว่า ทำให้ลดต้นทุนการผลิต รวมถึงความสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น

#### 2.2 มอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

มอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต คือมอเตอร์ที่อาศัยการขับเคลื่อนด้วยแรงไฟฟ้าสถิต เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้ามกัน ได้จากการป้อนแรงดันเข้าระหว่างขั้วตัวนำในที่นี้คือ โรเตอร์และสเตเตอร์ โดยที่โรเตอร์จะได้รับแรงดันไฟฟ้าลบส่วนสเตเตอร์จะได้รับแรงดันไฟฟ้าบวก โครงสร้างของมอเตอร์ที่จะทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าคือ มอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า เมื่อมีการเคลื่อนที่ของโรเตอร์อันเนื่องมาจาก

การป้อนแรงดันที่สเตเตอร์ แล้วเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์และเกิดแรงไฟฟ้าสถิต บริเวณดังกล่าวดึงดูดให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่

โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์จุลภาคมีทั้งมอเตอร์แบบสนามไฟฟ้าหรือ Electrostatic และ สนามแม่เหล็ก หรือ Electromagnetic ได้แก่ Wobble micromotor, Induction micromotor, Variable capacitance micromotor (VCM), Ultrasonic micromotor, Linear stepper micromotor เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทล้วนมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน (Iruday, et al., 2005) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

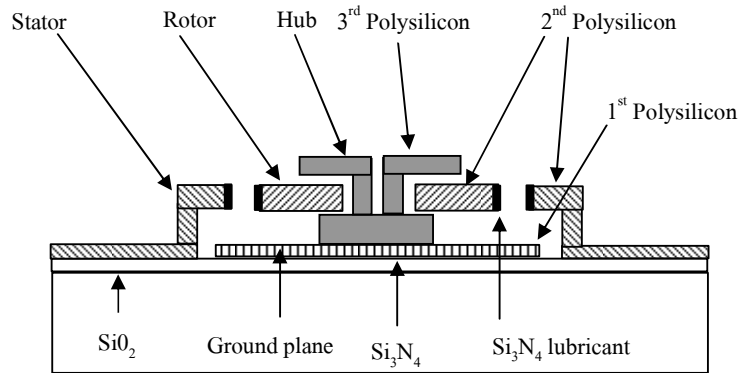
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตและแม่เหล็กไฟฟ้า

มอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต	มอเตอร์จุลภาคแบบแม่เหล็กไฟฟ้า
แรงดันขับเคลื่อนสูงในย่านสิบถึงร้อยโวลต์	แรงดันขับเคลื่อนต่ำในย่านสิบโวลต์
กระแสขับเคลื่อนต่ำในย่าน ไมโครแอมแปร์ถึง มิลลิแอมแปร์	กระแสขับเคลื่อนสูงระดับมิลลิแอมแปร์
ขนาดโครงสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์มีขนาดเล็กในย่านร้อยไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร	ขนาดโครงสร้างโรเตอร์มีขนาดใหญ่ในย่าน มิลลิเมตรเนื่องจากต้องมีพื้นที่รองรับขดลวด และแม่เหล็ก
ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์มีขนาดเล็กโดยทั่วไปจะเป็นอากาศหรือฉนวน	ระยะห่างค่อนข้างใหญ่ขึ้นอยู่กับตัวสร้าง สนามแม่เหล็ก
แรงบิดต่ำอยู่ในย่าน nN-m	แรงบิดสูงกว่าแบบไฟฟ้าสถิตมาก

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตในงานวิจัยหลายชิ้นดังนี้ Fan (1988) ได้ทำการออกแบบและทำการสร้างมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตด้วยกระบวนการสร้างวงจรรวม ใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) เป็นโครงสร้างของมอเตอร์ด้วยการกัด (Etching) เพื่อสร้างชิ้นส่วนได้แก่แกนกลาง โรเตอร์ และสเตเตอร์ ใช้กระจกฟอสฟอซิลิเกต (Phosphosilicate glass : PSG) เป็นวัสดุชั่วคราว มี 2 ชุดการทดลองคือ ชุดแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ 60  $\mu\text{m}$  ระยะห่างของโรเตอร์กับสเตเตอร์ 4  $\mu\text{m}$  โครงสร้างที่มีขั้วสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เป็น 12 ต่อ 8 และ ชุดที่สองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ 120  $\mu\text{m}$  ระยะห่างของโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 2  $\mu\text{m}$  มีโครงสร้างแบบขั้วสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เท่ากับ 24 ต่อ 8 มีความหนา 1-1.5  $\mu\text{m}$  ใช้แรงดันเพื่อขับเคลื่อน 200-350 V และหมุนด้วยความเร็ว 12-500 rpm

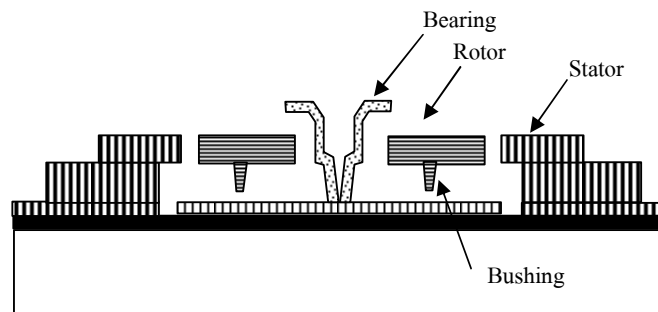
Tai (1989) ทำการทดสอบหาแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อจาก Fan (1988) ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยเดียวกัน ได้ศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานระหว่างโรเตอร์กับกราวด์

พร้อมกับหาความถี่ธรรมชาติของการหมุน จนพบว่าแรงดันที่สามารถขับเคลื่อนน้อยที่สุดที่ทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้มีค่าอยู่ในย่าน 60-100 V ด้วยความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 1200 rpm



รูปที่ 2.1 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Tai (1989)

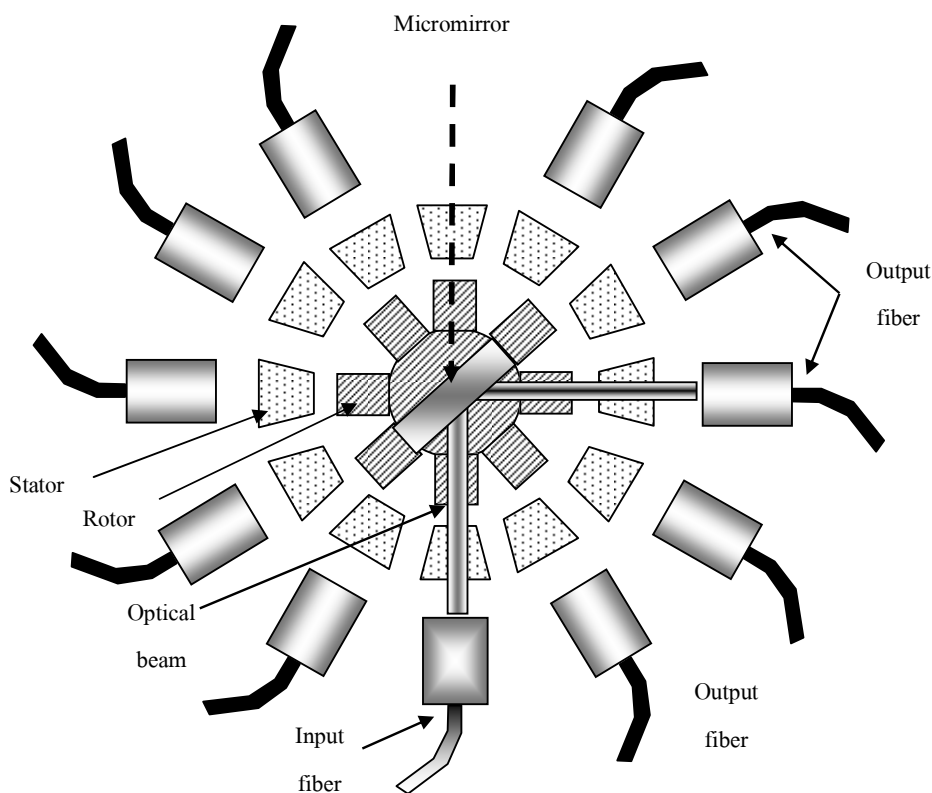
Mehregany (1992) ได้นำเสนอการสร้าง ออกแบบ ควบคุมและการทดสอบมอเตอร์ชนิด Variable capacitance micromotor แบบ Salient pole และแบบ Wobble โดยใช้วิธีการปลูกฟิล์มบางของโพลีซิลิคอนเพื่อสร้างโครงสร้าง ด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า LPCD (Low pressure chemical vapor deposition) สกัดเป็นโครงสร้างที่มีขั้วสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เป็น 12 ต่อ 8 เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ 120  $\mu\text{m}$  ระยะห่างของโรเตอร์กับสเตเตอร์ 1.5  $\mu\text{m}$  ที่ความหนา 2.5  $\mu\text{m}$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 140-360 rpm แรงดันขับเคลื่อน 150 V แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Mehregany (1992)

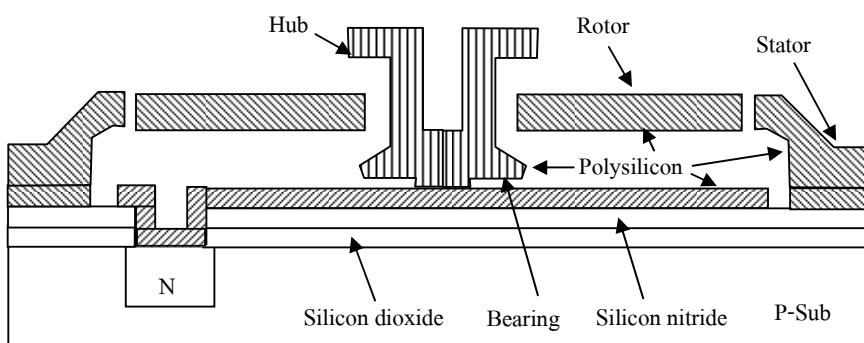
Johansson (1994) ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดโครงสร้างที่เหมาะสมของมอเตอร์จุลภาคแบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าโดยศึกษาจากเอาต์พุตของแรงบิดที่มากที่สุด ด้วยการคำนวณหาแรงไฟฟ้าสถิตซึ่งใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของโครงสร้างมอเตอร์ที่มีจำนวนโรเตอร์ต่อสเตเตอร์เท่ากับ 6 ต่อ 8 และ 6 ต่อ 4 ตามลำดับ

Yasseen (1999) นำเสนอการสร้างมอเตอร์แบบไฟฟ้าสถิตเพื่อเป็นสวิตช์แสงด้วยกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High-aspect-ratio micromachining) โดยใช้กระบวนการ DRIE (Deep reactive ion etching) สร้างโรเตอร์และกระจกจุลภาค (Micromirror) ซึ่งโครงสร้างเป็นซิลิคอน ส่วนการสร้างสเตเตอร์ใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งวัสดุเป็นนิกเกิลมีความหนาเท่ากับ  $200\ \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์เท่ากับ  $995\ \mu\text{m}$  ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ  $17\ \mu\text{m}$  เพื่อรองรับกระจก ใช้เป็นสวิตช์ทางแสง ขนาดความกว้างเท่ากับ  $900\ \mu\text{m}$  ความยาวยาว  $500\ \mu\text{m}$  และความสูง  $200\ \mu\text{m}$  แรงดันขับเคลื่อนประมาณ  $50\ \text{V}$  ด้วยความเร็ว  $300\ \text{rpm}$  แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.3

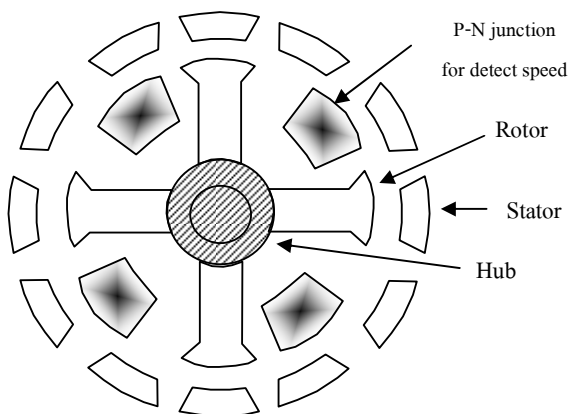


รูปที่ 2.3 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Yasseen (1999)

Li (1999) ผลิตมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต มีจำนวนขั้วโรเตอร์ต่อสเตเตอร์เท่ากับ 4 ต่อ 12 แบริงลักษณะโค้งเพื่อลดแรงเสียดทานกับผิวโรเตอร์สามารถวัดความเร็วรอบและควบคุมความเร็วได้โดยทำการฝังรอยต่อ P-N ที่ฐานรอง แล้วส่องแสงให้กับไบพัตตรอยต่อดังกล่าว เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่จะทำให้เกิดการเปิดกับปิด แสงบริเวณร่องรอยต่อดังกล่าวทำให้สามารถวัดความเร็วได้ลักษณะคล้ายกับโฟโตไดโอดที่ทำงานเป็นสวิทช์เมื่อมีแสงตกกระทบ บนฐานรองที่เป็นซิลิคอน ลักษณะความโค้งของแบริงทำได้โดยการกัดกระจกฟอสโฟซิลิเกตกับวัสดุผสมซิลิคอนออกไซด์เพื่อทำเป็นวัสดุชั่วคราว โครงสร้างของมอเตอร์จุลภาคดังรูปที่ 2.4 มีความสูงจากพื้นของโรเตอร์เท่ากับ  $2.3 \mu\text{m}$  ความหนาโรเตอร์เท่ากับ  $2 \mu\text{m}$  ระยะห่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ  $2 \mu\text{m}$  และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $100 \mu\text{m}$



(ก) ภาพตัดขวาง



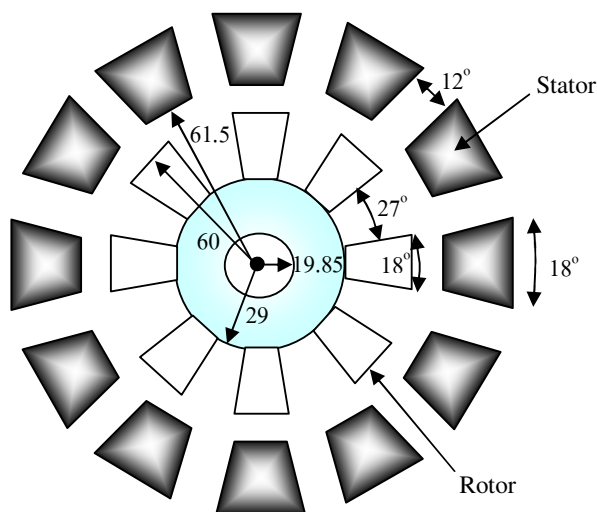
(ข) ภาพด้านบน

รูปที่ 2.4 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Li (1999)



Takimotor (1999) สร้างตัวขับเคลื่อนเร้าจุลภาคโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High aspect ratio) จำนวน 2 ชนิด คือ ตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวีกับมอเตอร์จุลภาคแบบ wobble motor โดยการฉายแสงผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์มีวัสดุเคลือบเป็นทองคำความหนา 7  $\mu\text{m}$  สารไวแสงที่ใช้เป็นชนิดบวก PMMA (Polymethyl-methacrylate) แล้วเติมโลหะนิกเกิลเพื่อขึ้นรูปโครงสร้าง โดยขนาดของตัวขับเคลื่อนซี่หวี มีความสูง 100  $\mu\text{m}$  ระยะห่างระหว่างซี่เป็น 5  $\mu\text{m}$  สัดส่วนสูงเท่ากับ 20 ส่วนมอเตอร์นั้นความหนาอยู่ที่ 100  $\mu\text{m}$  ระยะห่างของโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 2  $\mu\text{m}$  สัดส่วนสูงเท่ากับ 50 เมื่อใช้แรงดันขับเคลื่อน 100V จะคำนวณแรงบิดสำหรับตัวขับเคลื่อนซี่หวีและมอเตอร์ได้ 113.3 nN-m และ 31.9 nN-m ตามลำดับ

Endomano (2003) วิเคราะห์ระบบจำลองของมอเตอร์ ศึกษาพฤติกรรมของแรงบิดและการเคลื่อนที่ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบโดยนำเสนอการออกแบบโครงสร้างตลอดจนวงจรควบคุม และกระบวนการสร้างโดยใช้โพลีซิลิคอนเป็นวัสดุ มีจำนวนขั้วสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เท่ากับ 12 ต่อ 8 ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 1.5  $\mu\text{m}$  ความหนาประมาณ 2  $\mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 120  $\mu\text{m}$  แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน 300 V แสดงโครงสร้าง ได้ดังรูปที่ 2.5

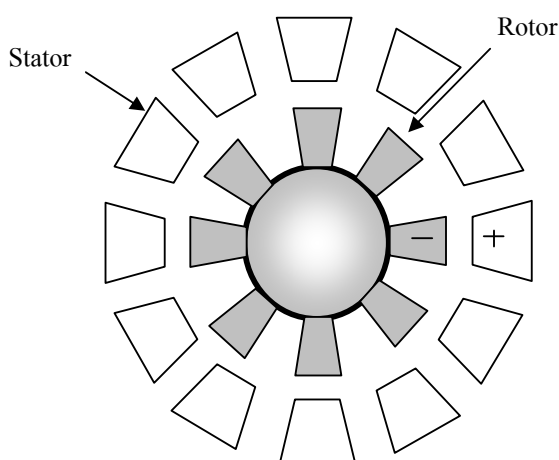


รูปที่ 2.5 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Endomano (2003)

Krishnamurthy (2005) ศึกษาจำลองผลการแปลงผันพลังงานของมอเตอร์แบบ Variable capacitance micromotors จำนวนสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เท่ากับ 8 ต่อ 6 โดยวิเคราะห์ขนาดของความจุไฟฟ้า ขนาดแรงดันไฟฟ้าสลับบริเวณช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ซึ่งใช้แรงดันขับเคลื่อน

ประมาณ 200 V ทำการทดสอบจำลองผลด้วยระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ตั้งแต่ 5-20  $\mu\text{m}$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ได้ความเร็วสูงสุด 50,000 rpm

Vinhais (2006) เสนอการออกแบบและสร้างมอเตอร์โดยใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับสารไวแสงชนิดลบ SU-8 และขึ้นรูปด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างสเตเตอร์กับแกนกลางและโรเตอร์แบบแยกส่วนจากนั้นจึงนำมาประกอบกันภายหลังโดยได้ความหนาของโครงสร้างประมาณ 100  $\mu\text{m}$  เมื่อเสร็จสมบูรณ์และจะนำมาประกอบกันเป็นมอเตอร์จะได้โครงสร้างดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างมอเตอร์จุลภาคของ Vinhais (2006)

จากงานวิจัยที่ได้ทำการสำรวจพบว่ากระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต มีรูปแบบการสร้างหลากหลายได้แก่ สร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรองเป็นโครงสร้างลงไปหรือเรียกว่า Bulk micromachining และสร้างชิ้นงานด้วยงานสร้างลวดลายบนพื้นผิวของฐานรองหรือ Surface micromachining ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การสร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุประเภทซิลิคอนต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือราคาสูง แต่ความแม่นยำในการสร้าง การควบคุมอัตราการเกิดหรือการสกัดค่อนข้างแม่นยำ ส่วนอีกวิธีคือสร้างชิ้นงานบนพื้นผิว วัสดุและอุปกรณ์ราคาไม่แพงมาก

สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนากระบวนการสร้าง มอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ซึ่งเทคนิคแบบการสร้างลวดลายบนพื้นผิวของฐานรอง เนื่องจากรังสีเอ็กซ์มีค่าของพลังงานที่สูงกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตหลายเท่าทำให้ได้ชิ้นงานจากกระบวนการฉายแสงที่มีผนังเรียบตรงและตั้งฉาก

กับฐานรอง อันเป็นข้อดีของการสร้าง โครงสร้างด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างมอเตอร์  
จุลภาคที่มีแรงบิดสูงขึ้นและใช้แรงดันขับเคลื่อนน้อยลงเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเทคนิคดั้งเดิม โดย  
ในขั้นตอนนี้จะเน้นการแก้ปัญหากระบวนการผลิตให้สามารถผลิตมอเตอร์จุลภาคให้สามารถ  
เคลื่อนที่ได้จริงก่อนแล้วจึงปรับปรุงคุณลักษณะการทำงานให้ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

## บทที่ 3

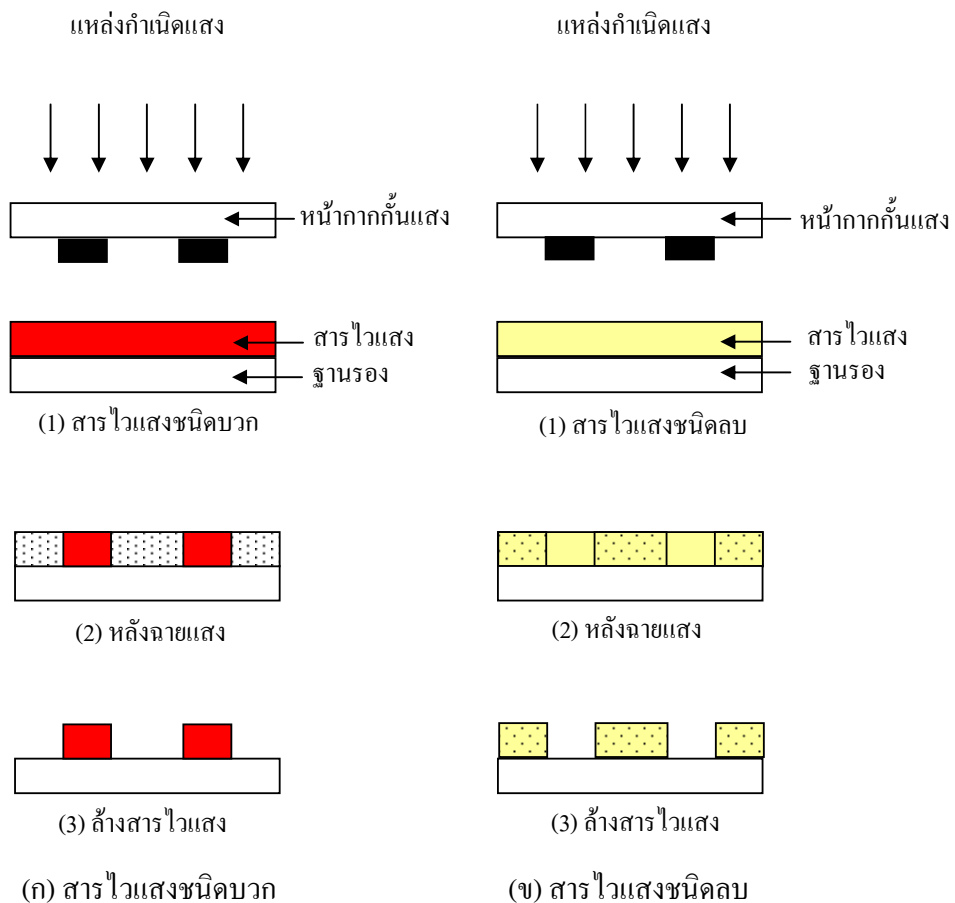
### กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

กระบวนการสร้างและการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยพื้นฐานแล้ว นิยมใช้กระบวนการลิโธกราฟี เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการมาตรฐานสำหรับสร้างวงจรรวม (Integrated circuit : IC) ประกอบด้วย การฉายแสง การล้างสารไวแสง นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นที่เกี่ยวข้องเช่น การเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) การเคลือบโลหะด้วยไอระเหย (Evaporation) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) การสกัดเนื้อวัสดุ (Etching) เป็นต้น

#### 3.1 กระบวนการลิโธกราฟี

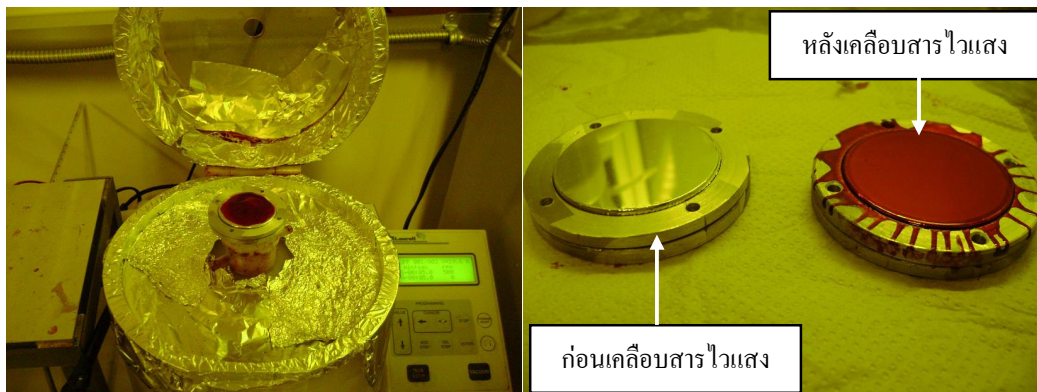
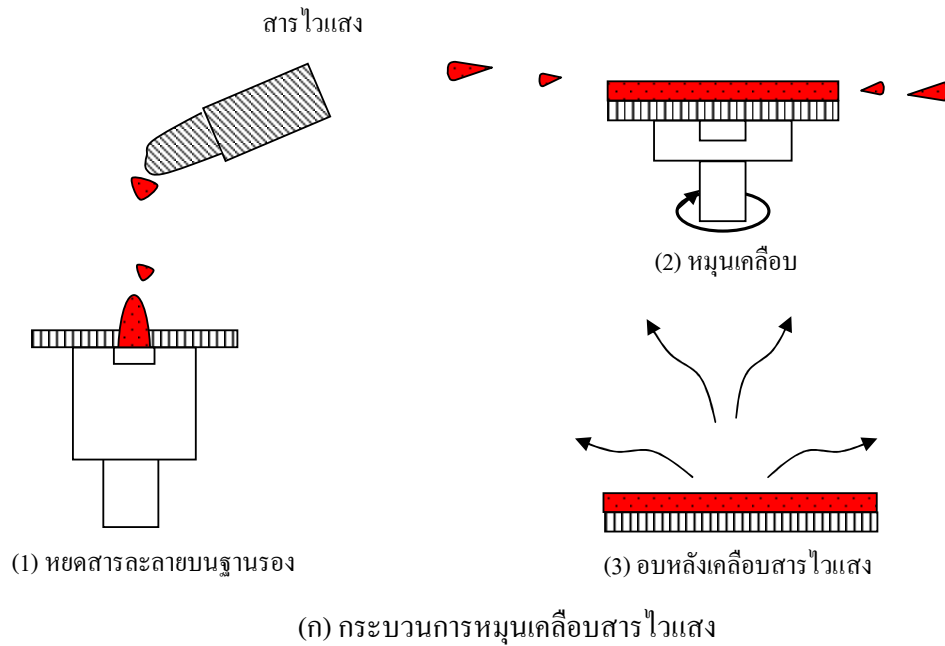
กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) เป็นกระบวนการที่สำคัญในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค สำหรับถ่ายทอดลวดลายด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากกันแสง (Mask) ลงบนแผ่นฐานรองที่เคลือบด้วยสารไวแสง (Photoresist) จำแนกออกได้เป็นสองชนิดคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) โดยที่สารไวแสงจะทำหน้าเป็นพื้นที่รับแสง จากนั้นบริเวณที่ถูกแสงฉายแสงนี้จะเกิดการทำปฏิกิริยาก่อให้เกิดลวดลายขึ้นมาในเนื้อสารไวแสงและหลังจากให้พลังงานหรือความร้อนแก่สารนั้นจะปรากฏลวดลายขึ้นมาเมื่อนำไปล้างด้วยสารละลายเคมีจะได้อลวดลายตามที่ต้องการ ซึ่งอาจจะเหมือนกับลวดลายต้นแบบหรือตรงข้ามกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสง เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการลิโธกราฟี หากต้องการนำไปพัฒนาเป็นวัสดุหรืออุปกรณ์อื่นก็สามารถทำได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่นกัน กระบวนการลิโธกราฟีไม่ได้จำกัดอยู่ที่แสงอัลตราไวโอเล็ตเท่านั้น แต่โดยมากแล้วจะนิยมใช้แสงที่อยู่ในย่านนี้เนื่องจากสารไวแสงมีความไวต่อความยาวคลื่นดังกล่าว นอกจากนี้แล้วยังมีรังสีเอ็กซ์ซึ่งต้องใช้หน้ากากกันแสงที่สามารถดูดซับรังสีเอ็กซ์ได้ ข้อดีคือสามารถสร้างชิ้นงานได้โครงสร้างที่สูงกว่าแสงอัลตราไวโอเล็ต เพราะมีพลังงานสูงกว่า ทำให้ผนังเรียบตรงพร้อมกับตั้งฉากกับฐานรอง เหมาะกับการสร้างอุปกรณ์ที่เน้นทางด้านความไวและทางด้านแรงขับเคลื่อน เช่น ตัวตรวจรู้จุลภาคและตัวขับเคลื่อนจุลภาค แต่การลงทุนที่สูงกว่าเช่นกัน ข้อดีของสารไวแสงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน คือหากเป็นสารไวแสงชนิดบวกสามารถล้างออกได้ง่าย แต่ข้อเสียคือมีข้อจำกัดอยู่ที่ความหนาไม่มากนัก ส่วนสารไวแสงชนิดลบสามารถสร้างความหนาสูงมากได้ แต่การสกัดสารทิ้งยากกว่า

สารไวแสงชนิดบวกเพราะมีความเหนียว ในรูปที่ 3.1 เป็นการเปรียบเทียบสารไวแสงทั้งสองชนิด โดยผ่านกระบวนการลิโธกราฟี ในรูปที่ 3.1 (ก) เป็นสารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่ถูกฉายแสงจะทำปฏิกิริยากับเนื้อสารทำให้เกิดการอ่อนตัวเมื่อนำไปล้างในน้ำยา ล้างสารไวแสง (Developer) บริเวณดังกล่าวจะหายไป สำหรับสารไวแสงชนิดลบบริเวณที่ถูกฉายแสงจะแข็งตัว ไม่สามารถล้างออกได้น้ำยาล้างสารไวแสงแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟี

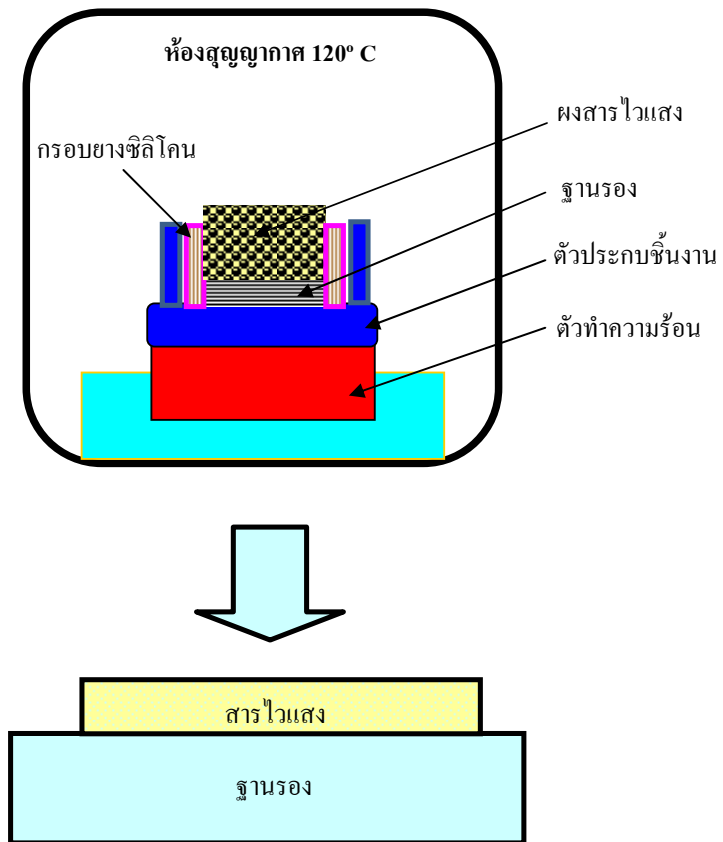
จากตัวอย่างของสารไวแสงซึ่งเป็นวัสดุสำหรับการสร้างเป็นลวดลายชิ้นงาน หรือสร้างเป็นแม่พิมพ์มีสองชนิดคือชนิดลบและชนิดบวก การเตรียมสารไวแสงสำหรับกระบวนการลิโธกราฟีในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมได้จากการหมุนเคลือบหรือการหล่อจากผงสารไวแสง ในรูปที่ 3.2 (ก) เป็นการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ และ รูปที่ 3.2 (ข) เป็นตัวอย่างการหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ



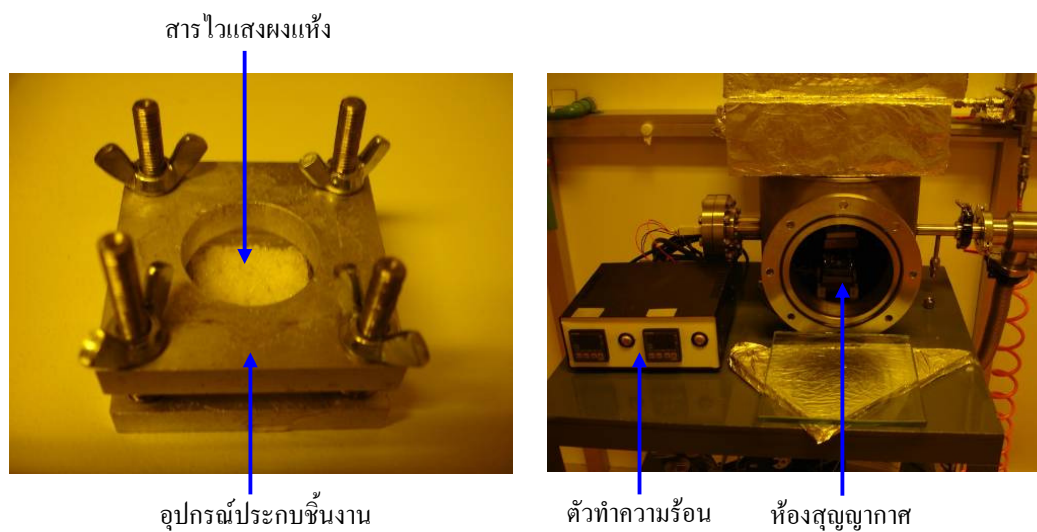
(ข) เครื่องหมุนเคลือบและตัวอย่างสารไวแสงที่เคลือบ

### รูปที่ 3.2 การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมุนเคลือบ

นอกจากการเตรียมสารไวแสงด้วยวิธีการหมุนเคลือบแล้วยังมีอีกวิธีคือ การหล่อสารไวแสงจากผงแห้ง ซึ่งสารไวแสงชนิดผงแห้งนี้ได้มาจากการนำสารไวแสงชนิดเหลวไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนในห้องสุญญากาศดังรูปที่ 3.3 เป็นระบบการหล่อสารไวแสงเพื่อเป็นวัสดุสำหรับสร้างลวดลวยที่เน้นความสูงของโครงสร้างชิ้นงานเหมาะกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ และรูปที่ 3.4 คือชั้นของสารไวแสงหลังจากการหล่อผงแห้ง

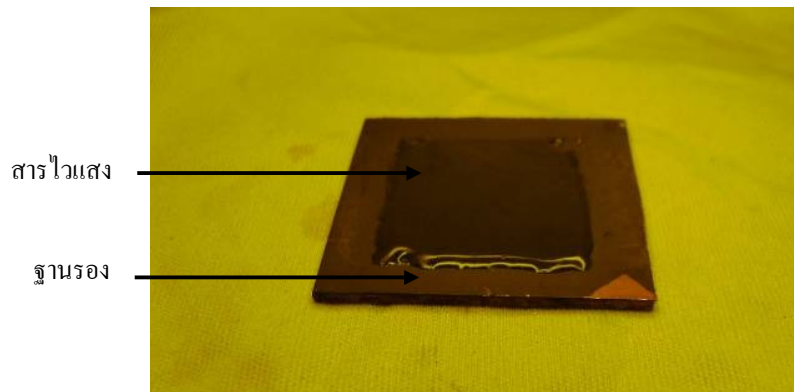


(ก) ขั้นตอนการหล่อสารไวแสงจากผงแห้ง



(ข) ชุดอุปกรณ์ในการหล่อสารไวแสงจากผงแห้ง

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหล่อสารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์

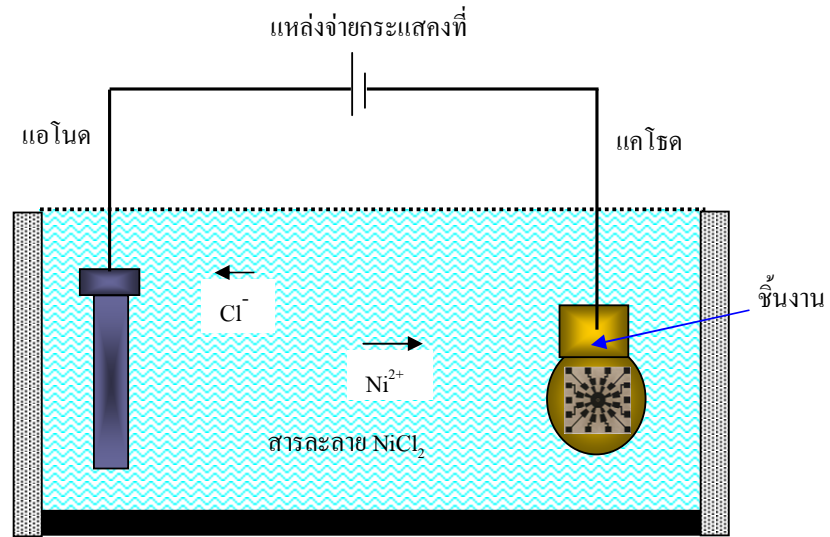


รูปที่ 3.4 ชั้นของสารไวแสงหลักจากการหล่อผงแห้ง

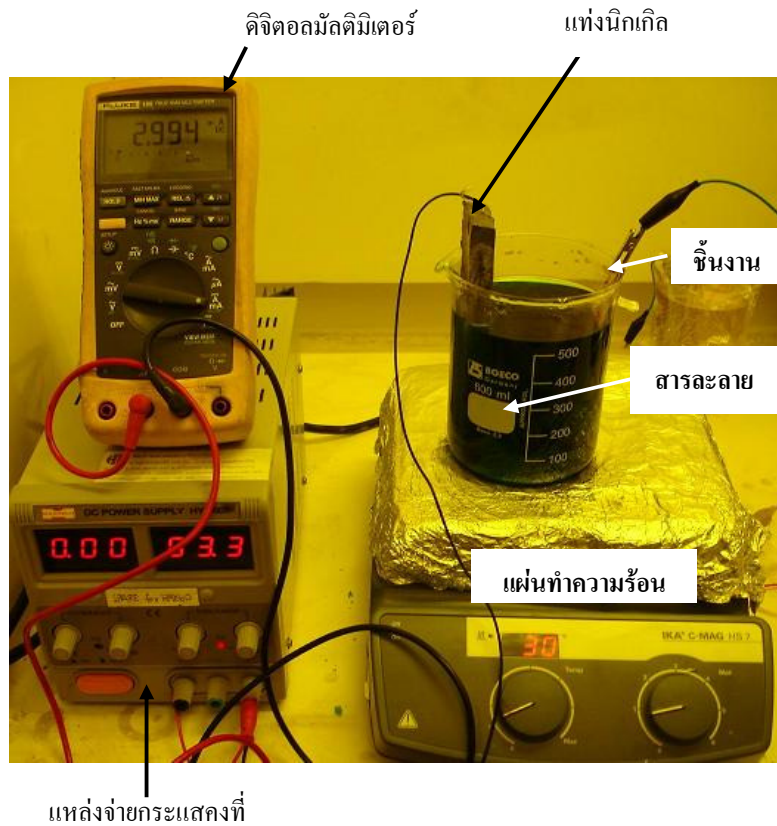
### 3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

อุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรมหลายชนิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องนำไฟฟ้าได้เพื่อนำไปใช้ในการวัด การควบคุม รวมถึงความคงทนแข็งแรงจึงเน้นการขึ้นรูปด้วยโลหะเป็นส่วนใหญ่ และโลหะที่นำมาใช้ได้แก่ เงิน ทองคำ ทองแดง นิกเกิล เป็นต้น การขึ้นรูปโลหะเหล่านี้โดยการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เป็นกระบวนการที่ง่าย ต่อการสร้างชิ้นงาน และราคาถูก หลังจากสร้างลวดลายลงบนฐานรองด้วยกระบวนการลิโธกราฟีแล้วขั้นตอนต่อไปคือการเติมโลหะเข้าไปในช่องว่างของสารไวแสงเพื่อสร้างชิ้นงานที่ต้องการ โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งไอออนของโลหะที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) จะผ่านสารละลายมาเคลือบบนชิ้นงานซึ่งเป็ขั้วแคโทด (Cathode) โลหะที่เหมาะสมสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่ขึ้นรูปได้เป็นอย่างดีสำหรับกระบวนการนี้คือ ทอง ทองแดง เงิน และนิกเกิล ในการชุบไฟฟ้าจะควบคุมด้วยการป้อนกระแสตรงที่ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอจะขึ้นกับการรักษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมตลอดกระบวนการ ในรูปที่ 3.5 เป็นตัวอย่างวงจรสำหรับชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะมีอุปกรณ์อื่นเข้ามาเสริมเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น เช่น วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse plating) หรือใช้ปั๊มของเหลวช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย หรือแม้แต่อุปกรณ์ทำความร้อนให้สารละลายมีอุณหภูมิที่เหมาะสม จากภาพอุปกรณ์สำหรับชุบโลหะนิกเกิล ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดัน แผ่นทำความร้อน สารละลาย ดิจิตอลมัลติมิเตอร์และชิ้นงาน การต่อวงจรทำได้โดยนำชิ้นงานต่อเข้ากับแคโทดและแท่งนิกเกิลที่แอโนด เมื่อเกิดกระแสไหลนิกเกิลจะก่อตัวที่ผิวของชิ้นงานจนได้ความหนาตามต้องการ ส่วนการชุบเงินหรือทองแดง หรือโลหะชนิดอื่น ก็ทำได้ในลักษณะเช่นเดียวกันนี้หากแต่เปลี่ยนชนิดของสารละลาย โดยสารละลายที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีหลากหลายชนิดดังตารางที่ 3.1





(ก) วงจรสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



(ข) ชุดอุปกรณ์สำหรับชุบโลหะนิกเกิล

รูปที่ 3.5 การชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างสารละลายสำหรับชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ชนิดโลหะ	สารละลาย
Gold	$\text{KAu(CN)}_2$ ; $\text{K}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ; $\text{HK}_2\text{PO}_4$ ; $\text{H}_2\text{O}$ $\text{NaAuSO}_3$ ; $\text{H}_2\text{O}$
Copper	$\text{CuSO}_4$ ; $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; $\text{H}_4\text{O}$
Nickel	$\text{NiSO}_4$ ; $\text{NiCl}_2$ ; $\text{H}_3\text{BO}_3$ ; $\text{H}_2\text{O}$
Permalloy	$\text{NiSO}_4$ ; $\text{NiCl}_2$ ; $\text{FeSO}_4$ ; $\text{H}_3\text{BO}_3$ ; $\text{C}_7\text{H}_4\text{NNaSO}_3$ ; $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; $\text{H}_2\text{O}$
Platinum	$\text{H}_2\text{PtCl}_6$ ; $\text{Pb(CH}_2\text{COOH)}_2$ ; $\text{H}_2\text{O}$
Aluminum	$\text{LiAlH}_4$ ; $\text{AlCl}_3$ ในไดทิลอีเทอร์
Silver	$\text{KCN}$ ; $\text{H}_2\text{O}$ ; $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; $\text{CNAg}$ ; Silver Glo 3K Make up: Silver Glo 3K TY

### 3.2.1 การเตรียมสารละลายนิกเกิลสำหรับการชุบด้วยไฟฟ้า

ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. เตรียม LBN-99 ready ปริมาตร 25 ลิตรเพื่อเป็นสารละลายชุบนิกเกิลจากนั้นทำการกรองสารละลายให้สะอาด
2. เติม Spectra LBN-99 ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ลงไปในสารละลาย
3. เติม Spectra LBN-99 Brightener ปริมาตรลงไปในสารละลาย
4. ให้ความร้อนแก่สารละลายที่  $55^\circ\text{C}$  พร้อมกับกวนสารละลายจนสารละลายผสมเข้ากันจนหมด
5. กรองสารละลายเพื่อกำจัดฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกก่อนใช้งาน

### 3.2.2 การเตรียมสารละลายเงินสำหรับการชุบด้วยไฟฟ้า

ทำได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

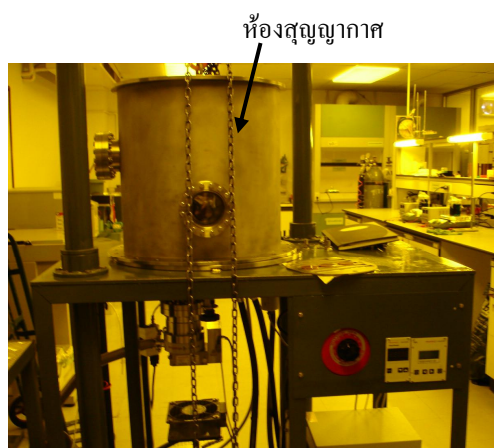
1. เตรียมน้ำปอดไอออน ปริมาตร 3000 มิลลิลิตร ในภาชนะที่มีการกวนเพื่อให้สารละลายผสมกันรวดเร็วยิ่งขึ้น เติม โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium cyanide) 833 กรัม ลงในสารละลายไปทีละน้อย ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จนสารดังกล่าวละลายจนหมด
2. เติม โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate) น้ำหนัก 75 กรัม ลงในสารละลายที่ยังมีการกวนอยู่ใช้เวลาประมาณ 5 นาที จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง
3. เติม ซิลเวอร์ไซยาไนด์ (Silver cyanide) น้ำหนัก 225 กรัม กวนสารละลายทิ้งไว้อีกประมาณ 15 นาที จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

4. เติมน้ำปอลดไอออน เพิ่มลงในสารละลาย จนได้ปริมาตร 5000 มิลลิลิตร
5. เติมผงคาร์บอน (Granular carbon) น้ำหนัก 10 กรัม กวนสารต่อไปเป็นเวลาอีก 30 นาที หลังจากนั้นจึงหยุดการกวนสาร ปล่อยให้สารเคมีทำปฏิกิริยากันอย่างน้อย 12 ชั่วโมง พร้อมกับปิดฝาสารละลายทั้งหมดให้สนิท
6. กรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง 3-5 ครั้งเพื่อกรองเอาผงคาร์บอนและฝุ่นผงในสารละลายออก
7. ทำความสะอาดสารละลายขั้นสุดท้ายโดยนำสารละลายมาชุบด้วยไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลส โดยใช้แรงดันคงที่ 1.5 V เป็นเวลา 15 นาที
8. เติมสาร Silver Glo make up ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 6.5 มิลลิลิตร เพื่อให้ผิวของโลหะเงินหลังการชุบด้วยไฟฟ้าเรียบเนียนและเงางาม

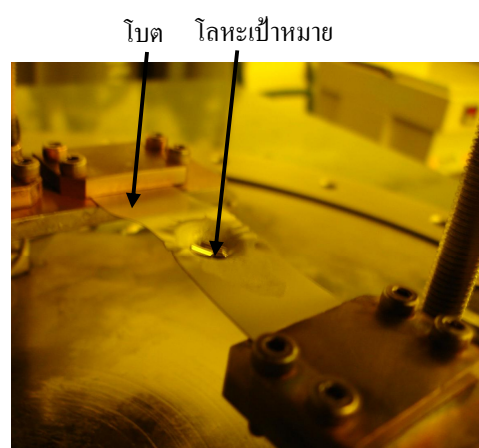
### 3.3 กระบวนการเคลือบโลหะ

เทคนิคการเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วเน้นเพื่อเคลือบวัสดุที่เป็นฉนวนให้สามารถนำไฟฟ้าได้เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์หรือชิ้นงานต่าง ๆ เช่น การเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วจะได้รับความหนาในระดับนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้จะเสนอกระบวนการเคลือบโลหะ 2 วิธีคือ

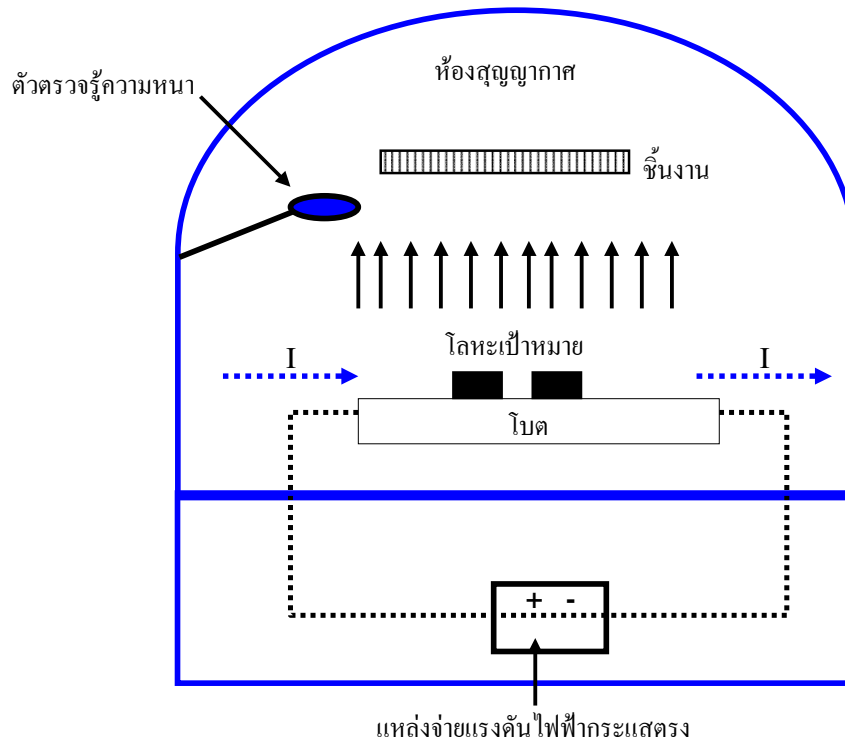
1. การระเหยไอโลหะในสุญญากาศ (Thermal evaporation) เทคนิคนี้อาศัยความร้อนจากแผ่นให้ความร้อน (Heating element) หรือโบท (Boat) ทำให้โลหะหลอมเหลวระเหยกระจายออกไปเคลือบชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 เป็นส่วนประกอบของวงจร



(ก) เครื่องเคลือบโลหะ



(ข) โลหะเป้าหมายภายในแผ่นทำความร้อน

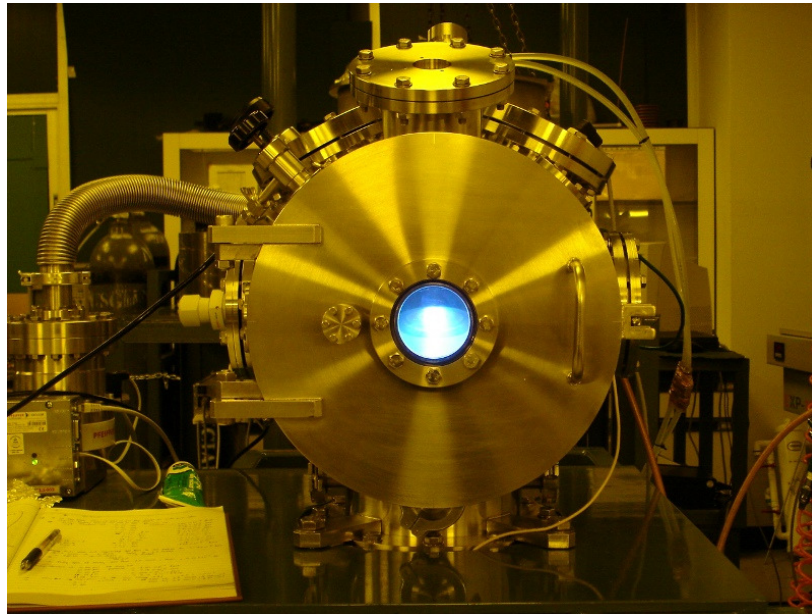


(ค) วงจรและอุปกรณ์

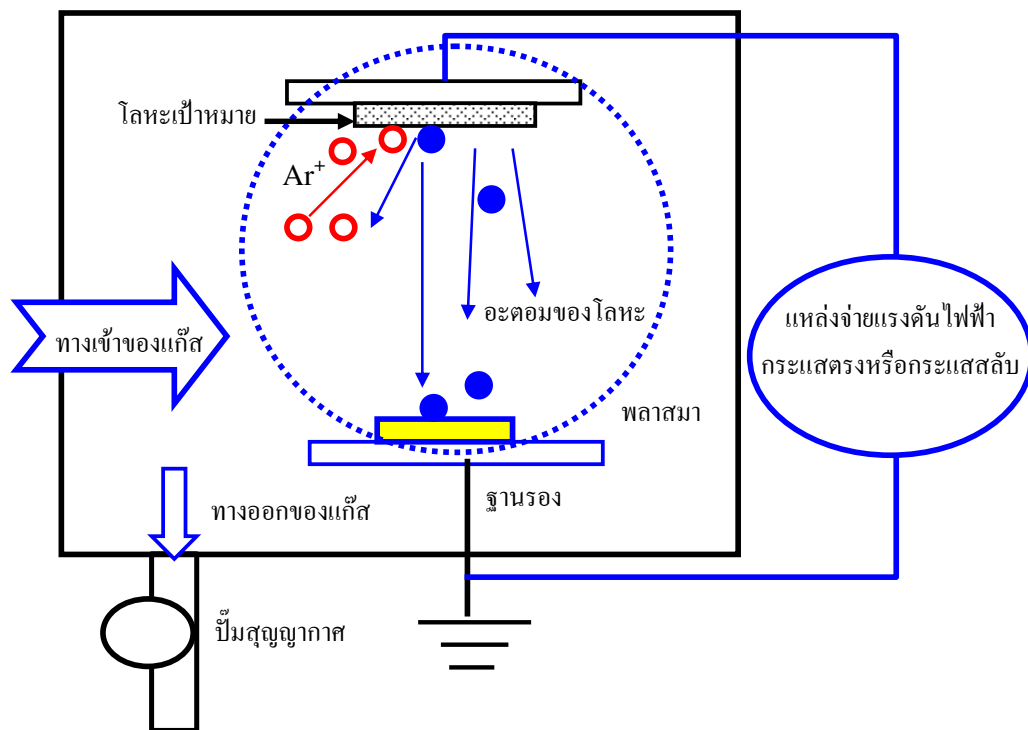
รูปที่ 3.6 เครื่องเคลือบโลหะด้วยการระเหยไอโลหะในสุญญากาศ

จากรูป 3.6 เครื่องมือสำหรับการเคลือบโลหะด้วยไอระเหยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญคือ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โบท โลหะเป้าหมาย ชิ้นงาน การเคลือบโลหะลงบนชิ้นงานจะทำให้ความดันสุญญากาศในระดับ  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-7}$  torr ข้อดีเครื่องเคลือบโลหะแบบนี้คือสร้างและใช้งานได้ง่าย แต่มีผลเสียตรงที่เกิดความร้อนมากและทิศทางของการเคลือบเป็นแบบทิศทางเดียว (Anisotropic) คือในแนวตรงจากแผ่นให้ความร้อน ทำให้ไม่สามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง

2. การสปัตเตอร์ริง (Sputtering) วิธีนี้อาศัยการสร้างพลาสมาของแก๊สเฉื่อย  $Ar^+$  และเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานการสปัตเตอร์ริง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด การสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นโลหะและการสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (RF sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นตัวนำหรือฉนวนความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนิยมใช้ค่า 13.56 MHz ดังรูปที่ 3.7 แสดงองค์ประกอบของระบบเคลือบวัสดุด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง



(ก) เครื่องสปีดเตอริง



(ข) วงจรและอุปกรณ์

รูปที่ 3.7 เครื่องเคลือบโลหะแบบการสปีดเตอริง

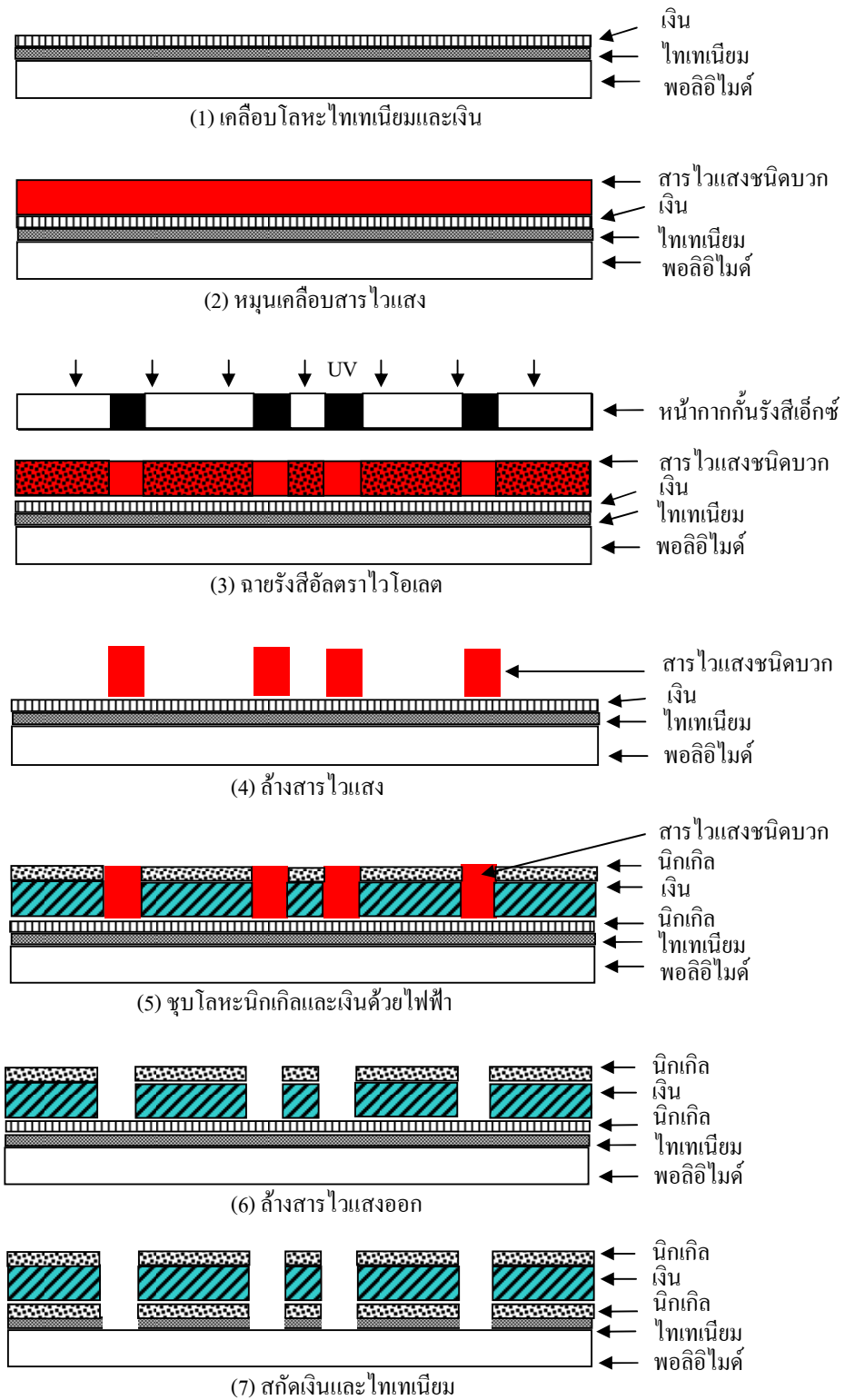
### 3.4 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์มีความสำคัญต่อกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์เป็นอย่างยิ่ง เพราะหน้ากากเป็นตัวกำหนดรูปร่างของโครงสร้างที่จะได้ออกมา กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์นั้นอาศัยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อสร้างลวดลาย เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อสร้างมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตมีรูปแบบที่พัฒนา 3 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่ง เป็นการออกแบบเพื่อสร้างมอเตอร์โดยให้โรเตอร์กับสเตเตอร์ พร้อมกัน ฉายรังสีเอ็กซ์เพียงครั้งเดียวเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการสร้างแล้วขึ้นรูปโครงสร้างด้วยการชุบนิกเกิลวิธีนี้พบข้อเสียคือ ต้องทำการจัดแนวฉายแสงเพื่อสร้างชั้นต่าง ๆ หลายครั้งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของรูปทรง และการสักระบายแสงที่ไม่ต้องการใช้เวลายาวนาน วิธีที่สอง เป็นการออกแบบเพื่อสร้างมอเตอร์โดยการขึ้นรูปของสเตเตอร์กับโรเตอร์แยกส่วนกันด้วยโครงสร้างโลหะนิกเกิล มีข้อดีคือสามารถสร้างโรเตอร์ได้ครั้งละหลายตัว แต่ยังมีข้อเสียคือและการสักระบายแสงส่วนที่ไม่ต้องการใช้เวลายาวนาน และวิธีสุดท้าย เป็นวิธีที่สามารถสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์ได้รวดเร็วโดยใช้สารไวแสงเป็นโครงสร้างแล้วเคลือบโลหะลงไปเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแทนการขึ้นรูปด้วยโลหะ ข้อดีอีกประการคือมีความเบากว่าโลหะ แต่ข้อเสียคือไม่แข็งแรงและทนต่อการสึกหรอน้อยกว่าทั้ง 3 วิธี โดยจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

#### 3.4.1 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะเป็นการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์เพื่อนำไปสร้างลวดลายของโรเตอร์และสเตอร์รี่ให้สามารถขึ้นรูปด้วยการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าได้พร้อมกัน โดยวิธีนี้สร้างด้วยสารไวแสงชนิดบวก AZP4620 ดังรูปที่ 3.8 สามารถอธิบายขั้นตอนการสร้างสร้างโดยย่อ ดังนี้

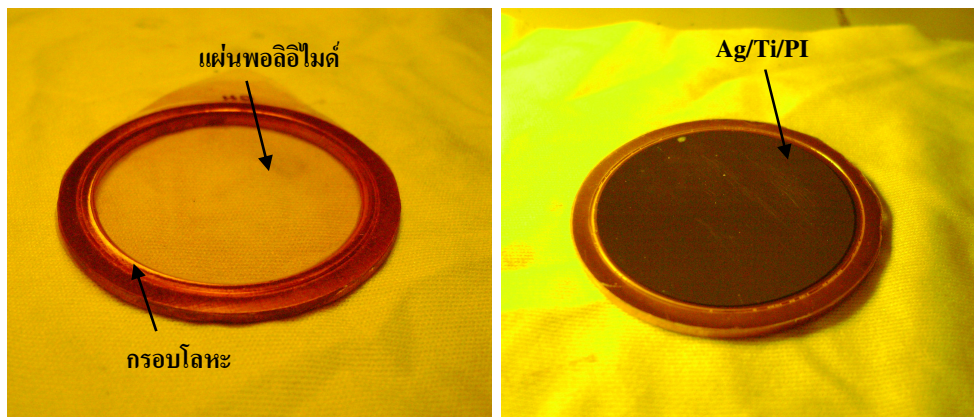
1. เคลือบฐานรองพอลิอิมิด์ที่ทำความสะอาดแล้วด้วยไทเทเนียมและเงิน โดยเครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยไอสุญญากาศ ตามลำดับ
2. หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐานรอง
3. ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากกันรังสีทำให้เนื้อสารไวแสงทำปฏิกิริยาบริเวณที่ถูกแสงเพื่อก่อเกิดลวดลาย
4. ทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายแสงทิ้ง
5. ชุบโลหะนิกเกิลและโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุชุบรังสีเอ็กซ์
6. สักระบายแสงทิ้งด้วยน้ำยาเคมี
7. สักระบายเงินและไทเทเนียมที่ติดกับฐานรองออก



รูปที่ 3.8 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุดภาคด้วยโครงสร้างโลหะ



จากกระบวนการสร้างรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ สามารถแสดงให้เห็นถึงการกระบวนการและผลการสร้างอย่างละเอียดวิธีการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สามารถเตรียมได้โดยยึดวงแหวนกับแผ่นพอลิอิมิด์ด้วยกาวอีพอกซี แล้วทำความสะอาดโดยเช็ดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ด้วยสำลี นิดด้วยอะซิโตนและนิตด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง แล้วจุ่มลงในน้ำปลดไอออน ต่อจากนั้นทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง อัลตราโซนิกในน้ำปลดไอออน ประมาณ 10 นาที แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที จนแห้ง จากนั้นทำความสะอาดผิวด้วยการพลาสมาโดยใช้แก๊สออกซิเจนกำลัง RF 100 W เป็นเวลา 3 นาที และท้ายสุดเคลือบโลหะไทเทเนียมและเงินด้วยความหนา 300 Å และ 500 Å ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยเครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยในสุญญากาศ (Thermal evaporator) ที่ความดันสุญญากาศประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  torr



(ก) ก่อนเคลือบโลหะ

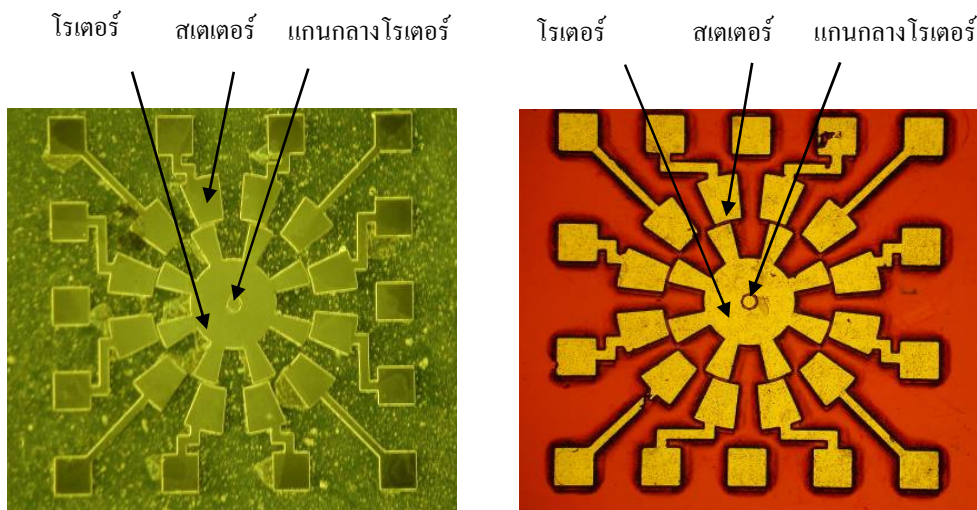
(ข) หลังเคลือบโลหะ

รูปที่ 3.9 แผ่นพอลิอิมิด์เคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

หลังจากเคลือบโลหะบนฐานรองพอลิอิมิด์จนนำไฟฟ้าแล้ว ต่อมาคือการเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ4620 ลงบนฐานรองดังกล่าว ด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนต่อด้วย ความเร็ว 600 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ได้ความหนาประมาณ 25  $\mu\text{m}$  จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 26.5°C ความชื้นสัมพัทธ์ 45% RH อีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงเย็นตัวลง ตามลำดับ จากนั้นฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel Q4000 ผ่านหน้ากากกันแสงที่ทำความสะอาดแล้ว เป็นเวลา 130 วินาที ที่ความเข้มแสง 19.75  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ได้พลังงานสะสม



ตกกระทบเนื้อสารไวแสงเท่ากับ  $2.567 \text{ J/cm}^2$  จากนั้นล้างสารไวแสงด้วย KOH ต่อ  $\text{H}_3\text{BO}_3$  ต่อ  $\text{H}_2\text{O}$  อัตราส่วนเท่ากับ 4 g ต่อ 1 g ต่อ 200 ml ตามลำดับ เป็นเวลา 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปอดไอออน แล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.10

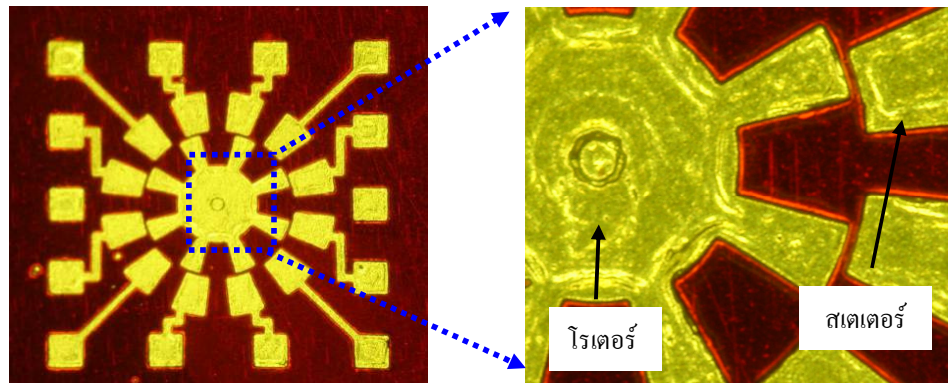


(ก) หน้ากากกันแสง

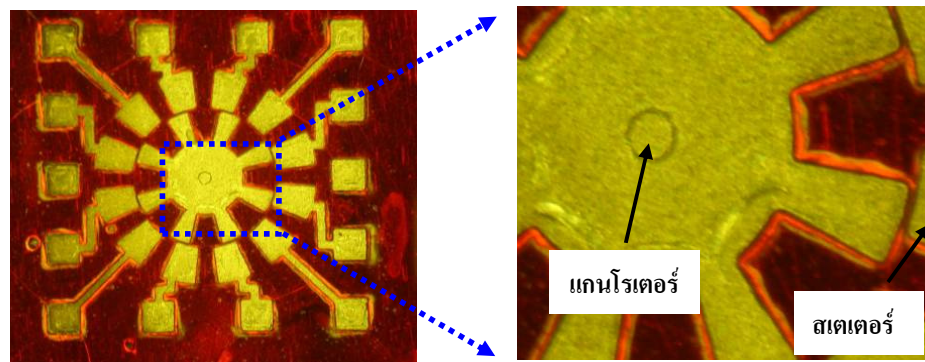
(ข) หลังฉายแสงและล้างสารไวแสง

รูปที่ 3.10 ลวดลายหลังฉายแสงสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างโลหะ

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลิโทกราฟีแล้วกระบวนการต่อมาคือการสร้างวัสดุคูดซ์รังสีเอ็กซ์ โดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในสารละลายเงินที่เตรียมไว้โดยให้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วบวก (Anode) และให้ชิ้นงานที่ต้องการเติมโลหะเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยใช้ความหนาแน่นกระแส  $12 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นต่อด้วย การชุบโลหะเงินที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ  $24 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 5 นาที และสุดท้ายทำการชุบโลหะเงินที่ความหนาแน่นกระแส  $40 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ ได้ผลการชุบโลหะเงิน ดังรูปที่ 3.11 เมื่อทำการชุบน้ำกากเงินจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้ว กระบวนการต่อมาคือชุบโลหะนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ  $8 \text{ mA/cm}^2$  ทับผิวเงินด้านบนเพื่อให้ป้องกันการกัดเซาะของสารละลายเคมีในขั้นตอนการกัดวัสดุเงินชั้นล่างซึ่งแสดงในรูปที่ 3.12

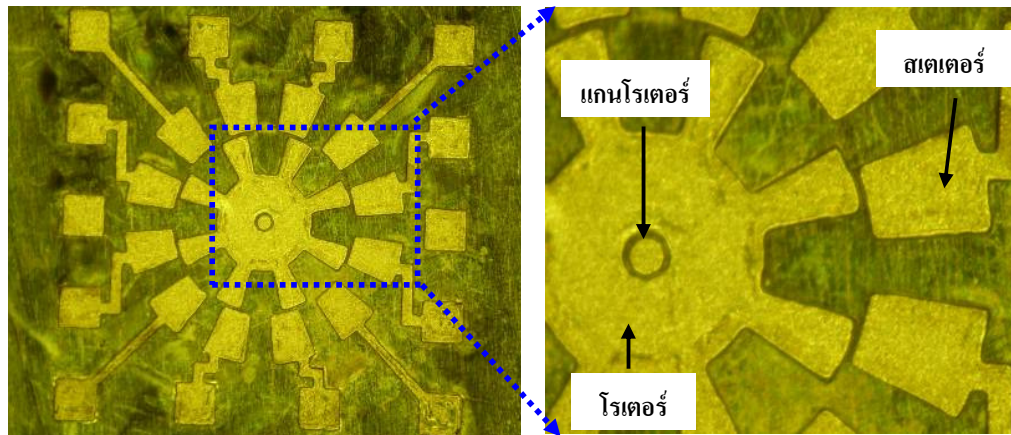


รูปที่ 3.11 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

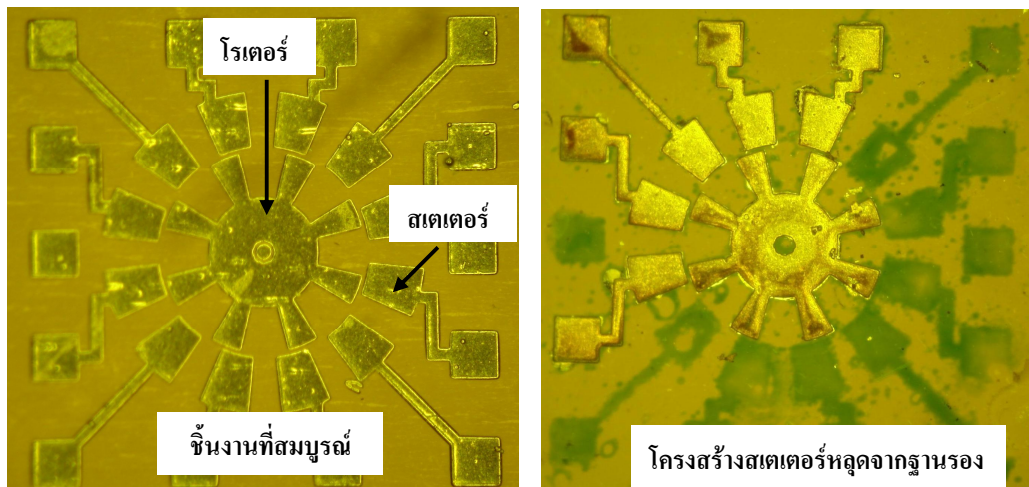


รูปที่ 3.12 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

ขั้นตอนต่อมาคือล้างสารไวแสง AZP4620 ที่ด้วยอะซิโตน และน้ำปอดไอออน แล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนแสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) จะพบว่ายังมีโลหะเงินและไทเทเนียมบาง ๆ ที่เคลือบอยู่ที่ผิวด้านบนของฐานรองทำการสกัดโลหะเงินออกโดยใช้สารละลาย  $H_2O_2$  ต่อ  $NH_4OH$  ในอัตราส่วนผสม 1 ต่อ 10 โดยปริมาตร และสกัดไทเทเนียมโดยใช้ กรด  $HF$  ความเข้มข้น 5% ตามลำดับ แล้วล้างด้วยน้ำปอดไอออนพร้อมกับเป่าแห้ง แสดงในรูปที่ 3.13 (ข) เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการของการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ ซึ่งมีทั้งชิ้นงานที่สมบูรณ์และชิ้นงานที่เสียหาย เนื่องจากสาเหตุการเกาะตัวไม่ดีระหว่างโลหะนำไฟฟ้าที่เคลือบลงไปกับฐานรอง และการยึดไม่แน่นของสารไวแสงบนผิวโลหะนำไฟฟ้า



(ก) หลังล้างสกัดสารไวแสง



(ข) หลังล้างสกัดเงินและไทเทเนียมออก

รูปที่ 3.13 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ที่สมบูรณ์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

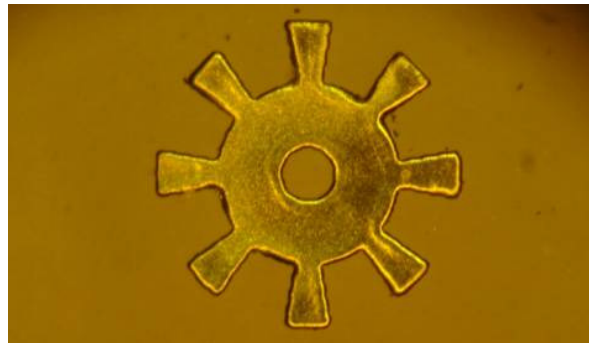
### 3.4.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค

#### ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

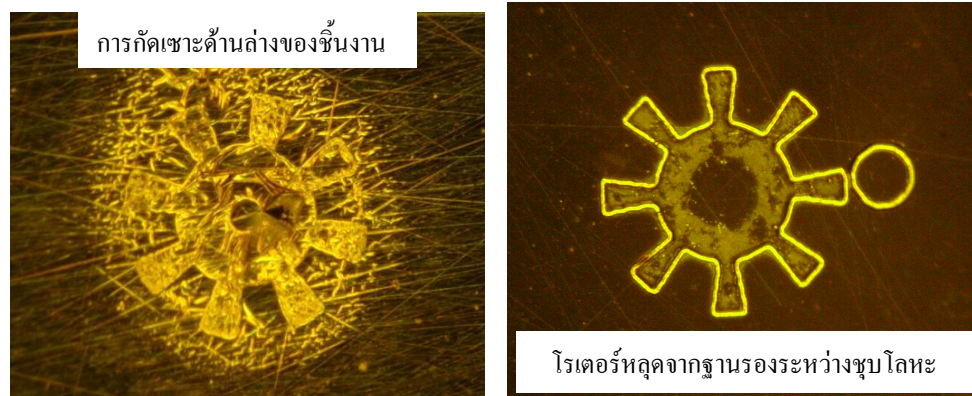
กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน เป็นการขึ้นรูปโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยโลหะ निकิลแยกส่วนกัน และเมื่อได้ชิ้นส่วนทั้งสองแล้ว จึงนำมาประกอบเข้ากันภายหลังเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาเรื่องการฉายแสงเพื่อสร้างโครงสร้างที่อาศัยการจัดแนวฉายแสง (Alignment) จากกระบวนการสร้าง



มอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ เพราะกระบวนการที่ผ่านมาจะก่อให้เกิดลวดลายที่ผิดเพี้ยนสำหรับกระบวนการนี้มีวิธีการคล้ายกันกับการสร้างหน้ากากสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ หากแต่ต่างกันตรงที่การสร้างลวดลายและการขึ้นรูปหน้ากากโรเตอร์กับสเตเตอร์จะแยกจากกัน ดังรูปที่ 3.14 เป็นหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ในส่วนของโรเตอร์ที่สภาพสมบูรณ์สามารถนำไปใช้งานได้จริง ส่วนรูปที่ 3.15 เป็นหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ในส่วนของโรเตอร์ที่สภาพเสียหายระหว่างการชุบโลหะเพราะการยึดตัวไม่ดีระหว่างฐานรองกับโลหะที่เคลือบผิว

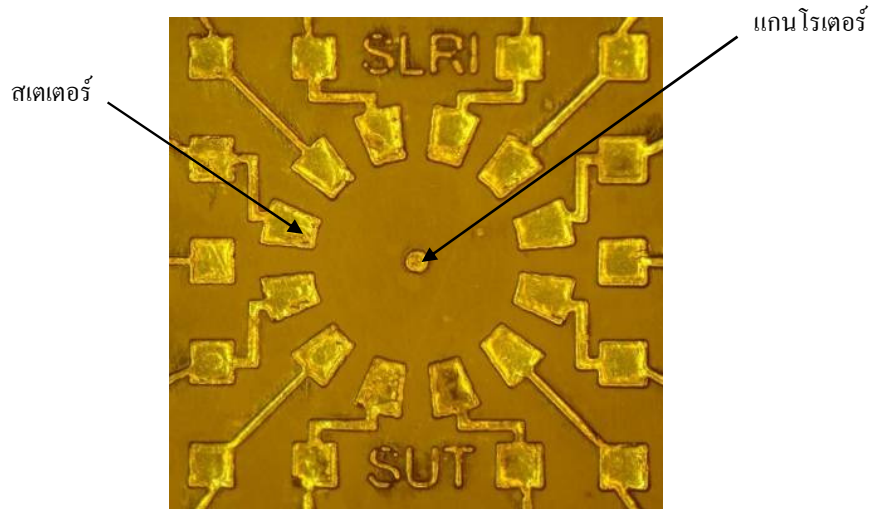


รูปที่ 3.14 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของโรเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน



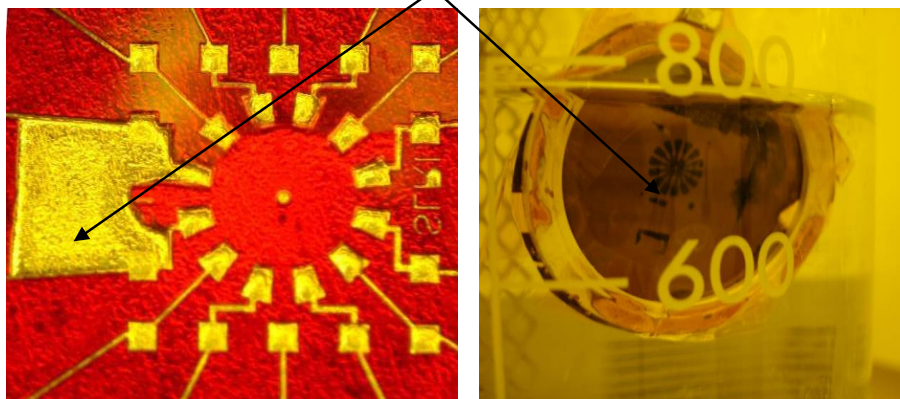
รูปที่ 3.15 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของโรเตอร์ที่เกิดความเสียหายสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

สำหรับการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งจะพบว่า มีทั้งสภาพที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เกิดความเสียหายเนื่องจากสารไวแสงไม่ยึดติดกับโลหะที่เคลือบผิวชิ้นงาน เมื่อทำการชุบโลหะเงินทำให้โลหะเงินเข้าไปแทนที่ช่องว่างบริเวณดังกล่าวได้



รูปที่ 3.16 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์สำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

ความเสียหายจากสารไวแสงยึดฐานรองไม่แน่นทำให้เกิดการกัดเซาะด้านข้างระหว่างชุบโลหะ



รูปที่ 3.17 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์สำหรับสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

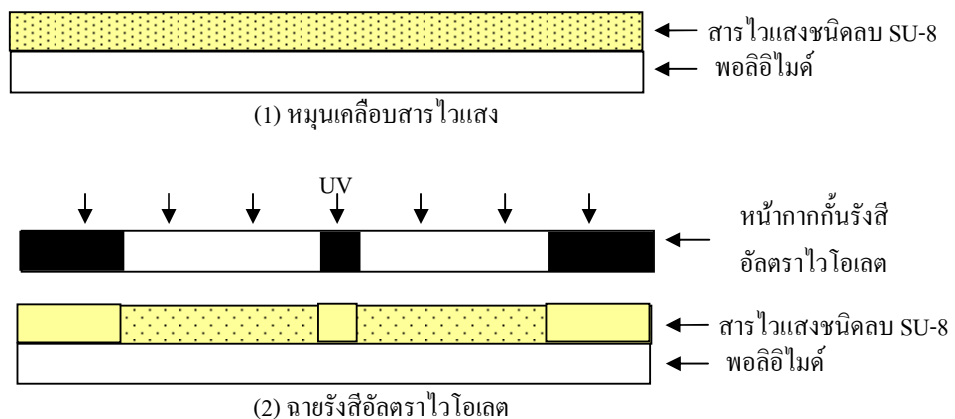
## แบบแยกส่วน

## 3.4.3 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วย

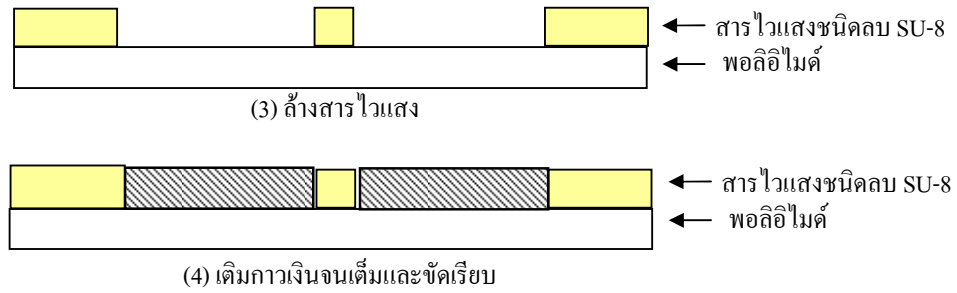
## โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

การสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีนี้มีการแก้ปัญหาเรื่องการชุบโลหะโดยการปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปโรเตอร์และสเตเตอร์จากโลหะ निकเกิดเป็นสารไวแสง SU-8 ที่เคลือบผิวด้วยโลหะแทนทำให้ลดระยะเวลาในการสร้างลงและยังมีข้อดีคือทำให้โครงสร้างของโรเตอร์ที่ได้มีความเบา พร้อมกับสร้างได้เร็วกว่า 2 รูปแบบแรก เพราะไม่ต้องทำการชุบโลหะเพื่อเป็นโครงสร้าง และไม่ต้องสกัดสารไวแสงทิ้งหลังจากได้โครงสร้างโลหะแล้ว รูปที่ 3.18 แสดงกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับรูปแบบที่ 3 ดังต่อไปนี้

1. เคลือบฐานรองพอลิโไมด์ที่ทำความสะอาดแล้ว ด้วยไทเทเนียมและเงิน จากนั้นทำการหมุนเคลือบด้วยสารไวแสงชนิดลบลง
2. ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านลวดลายต้นแบบทำให้เนื้อสารไวแสงทำปฏิกิริยาที่บริเวณถูกแสงเพื่อก่อเกิดลวดลาย
3. ทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงทิ้ง
4. เติมวัสดุคูดซับริงสีเอ็กซ์ซึ่งเป็นกาวเงินนำไฟฟ้าพร้อมขัดผิวหน้าจนเรียบ

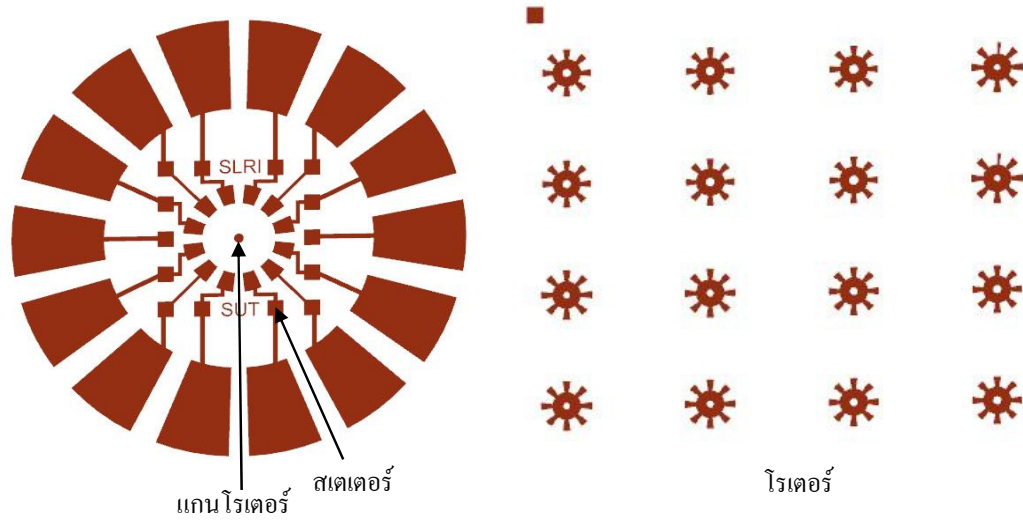


รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

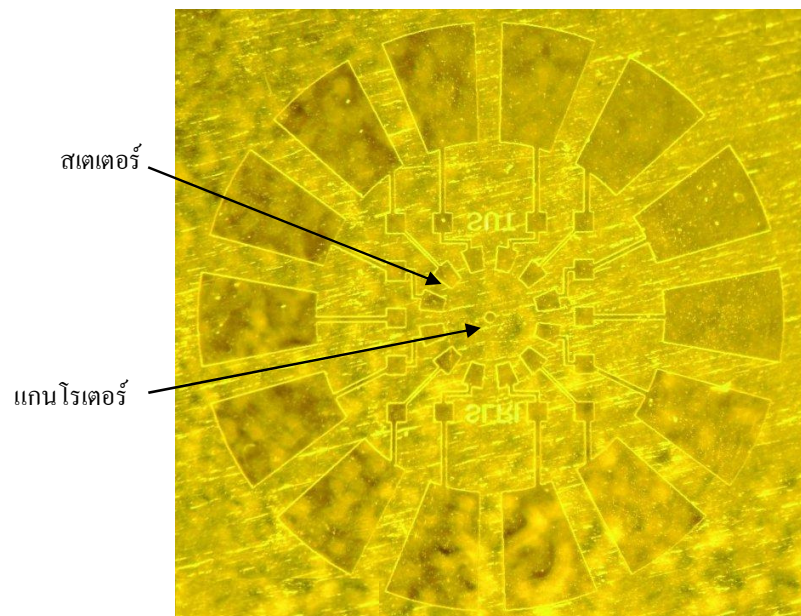


รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค  
ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า (ต่อ)

จากกระบวนการสร้างรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 3.18 กระบวนการต่อไปนี้จะเป็นการนำเสนอกระบวนการและผลการสร้างอย่างละเอียด โดยการนำแผ่นพอลิไมด์ยึดติดเข้ากับวงแหวนโลหะด้วยกาวอีพอกซี ทำความสะอาดโดยเช็ดด้วยสำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ล้างด้วยอะซิโตนและล้างไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง แล้วจุ่มลงในน้ำปอดไอออน แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน อบที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที จนแห้ง จากนั้นทำความสะอาดผิวฐานรองด้วยพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 3 นาที ต่อมาเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 3050 ลงบนฐานรองดังกล่าว ด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนต่อด้วยความเร็ว 2400 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ได้ความหนาประมาณ  $55\ \mu\text{m}$  จากนั้นอบที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $26.5^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์ 45% RH อีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงเย็นตัวลงตามลำดับ ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel Q4000 ผ่านหน้ากากกันแสงดังรูปที่ 3.19 เป็นเวลา 20 วินาที ที่ความเข้มแสง  $18.70\ \text{mW}/\text{cm}^2$  ได้พลังงานสะสมตกกระทบเนื้อสารไวแสงเป็น  $374\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  จากนั้นล้างสารไวแสงเพื่อให้เกิดลวดลายด้วย SU8-developer เป็นเวลา 2 นาที แล้วฉีดล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้แน่ใจว่าสารไวแสงไม่ตกค้างซึ่งหากมีสารไวแสงตกค้างก็จะเกิดคราบขาวหลังถูกฉีดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แสดงได้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์



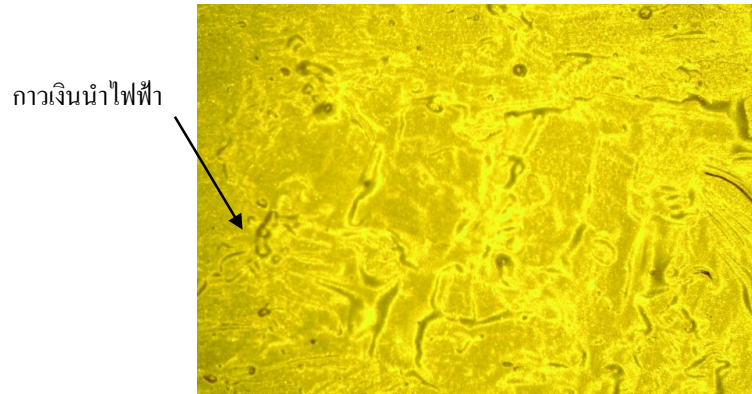
รูปที่ 3.19 หน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสเตเตอร์และโรเตอร์สำหรับสร้างมอเตอร์  
จุดภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า



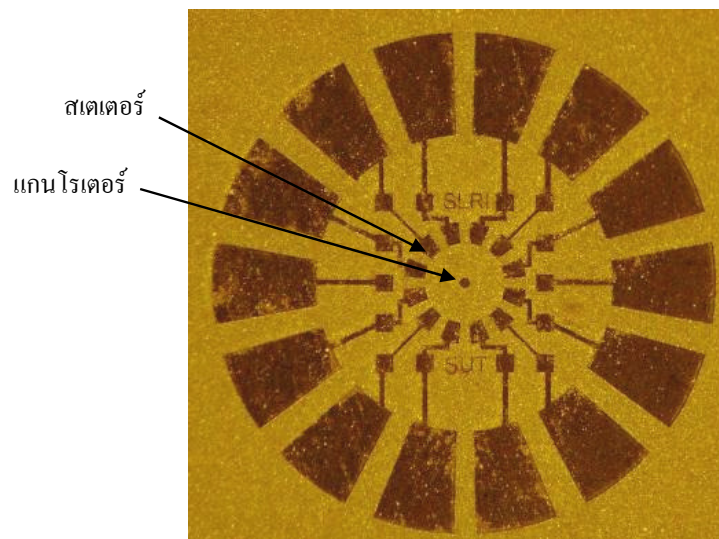
รูปที่ 3.20 หลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตและล้างสารไวแสงสำหรับสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์  
สำหรับสร้างมอเตอร์จุดภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า



หลังจากล้างสารไวแสงออกจนหมดแล้ว จากนั้นทำการเติมกาวเงินนำไฟฟ้าจนล้น ดังรูปที่ 3.21 (ก) และขัดผิวหน้าจนเรียบดังรูปที่ 3.21 (ข) จากนั้นอบที่อุณหภูมิ  $65^{\circ}\text{C}$  ใช้เวลา ประมาณ 2 ชั่วโมงจนแห้ง และกระบวนการสำหรับกรณีของโรเตอร์มีลักษณะเดียวกันดังแสดงใน รูปที่ 3.22

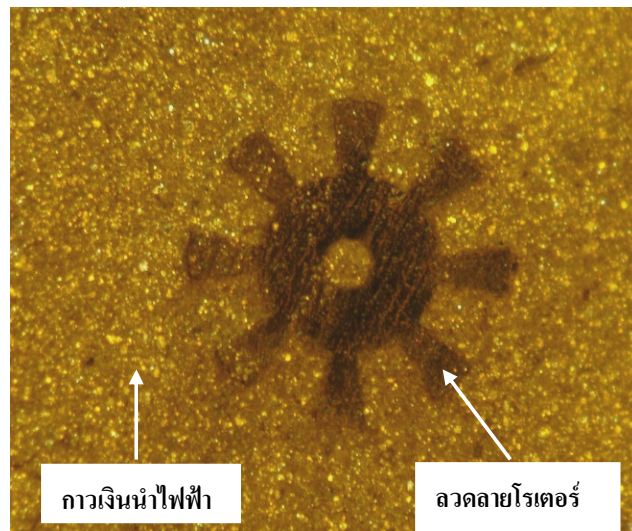


(ก) เติมกาวเงินนำไฟฟ้าลงในแม่พิมพ์พอลิเมอร์



(ข) ขัดผิวหน้าจนเรียบ

รูปที่ 3.21 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์ของสเตเตอร์รูปสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.22 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ของโรเตอร์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค  
ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

หลังจากได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบต่าง ๆ แล้วขั้นตอนต่อไปคือนำหน้ากากเหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อสร้างลวดลายของมอเตอร์จุลภาคและขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอย่างละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป

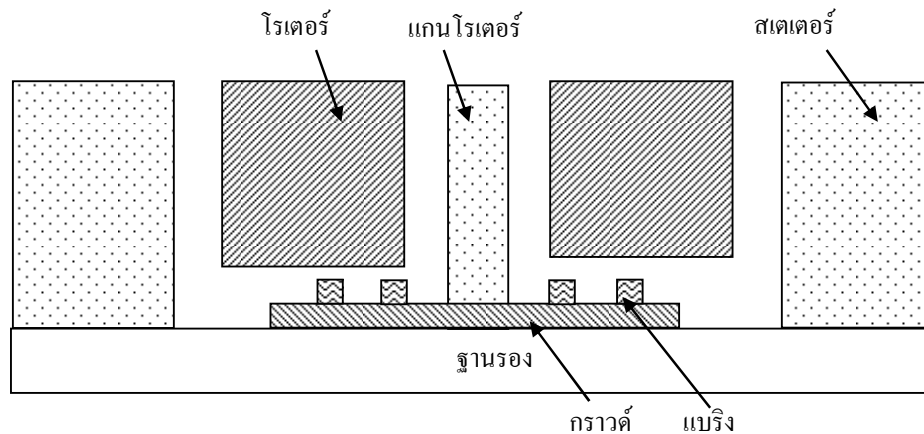
### 3.5 สรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างพื้นฐานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้แก่ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การเคลือบโลหะ ทำความสะอาดฐานรอง การเตรียมวัสดุไวแสง รวมถึงการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ด้วย กระบวนการดังที่ได้กล่าวมาจะเป็นขั้นพื้นฐานสำหรับพัฒนาอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ตัวตรวจรู้ ตัวขับเร้าและอุปกรณ์อื่นทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

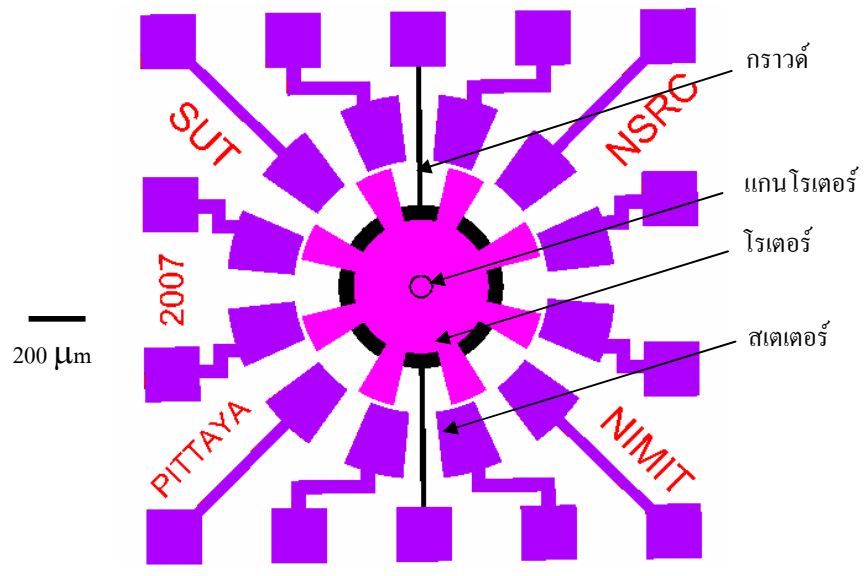
## บทที่ 4

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

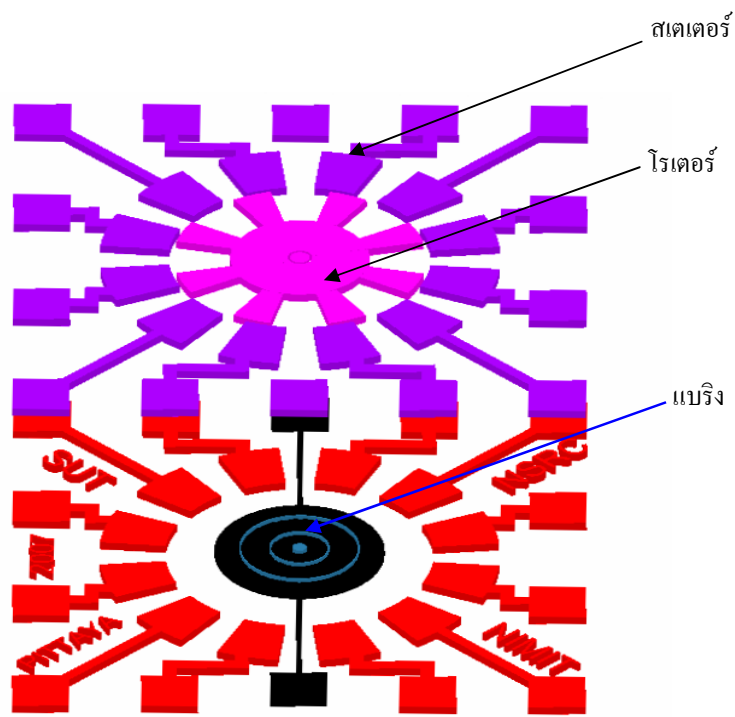
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เพื่อจำลองระบบการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นอีกทั้งยังมีเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผล การทดสอบและการควบคุมระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จาก การวิเคราะห์ทฤษฎีซึ่งทำให้ได้มาซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จากนั้นนำฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปหาค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยการวัดพร้อมก็นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับระบบจริงต่อไป การออกแบบมอเตอร์จลภาคแบบไฟฟ้าสถิตในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงขนาดโครงสร้าง วัสดุ กระบวนการสร้าง รวมถึงระยะเวลาในการสร้าง ให้สอดคล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ มอเตอร์จลภาคประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ได้แก่ โรเตอร์คือส่วนที่เคลื่อนที่ได้ สเตเตอร์คือส่วนที่อยู่กับที่สำหรับจ่ายแรงดันสูง กราวด์ แกนโรเตอร์ และแบริงคือส่วนที่สัมผัสหรือรับน้ำหนักของโรเตอร์ แสดงภาพตัดขวางได้ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงภาพสามมิติและภาพด้านบนของมอเตอร์จลภาค ซึ่งมีกระบวนการสร้างและเทคนิคอย่างหลากหลายได้แก่ กระบวนการลิโธกราฟี กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กระบวนการเคลือบโลหะ กระบวนการสกัดสารไวแสงและกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้า



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของมอเตอร์จลภาคแบบไฟฟ้าสถิต



(ก) โครงสร้างด้านบนของมอเตอร์จุลภาค

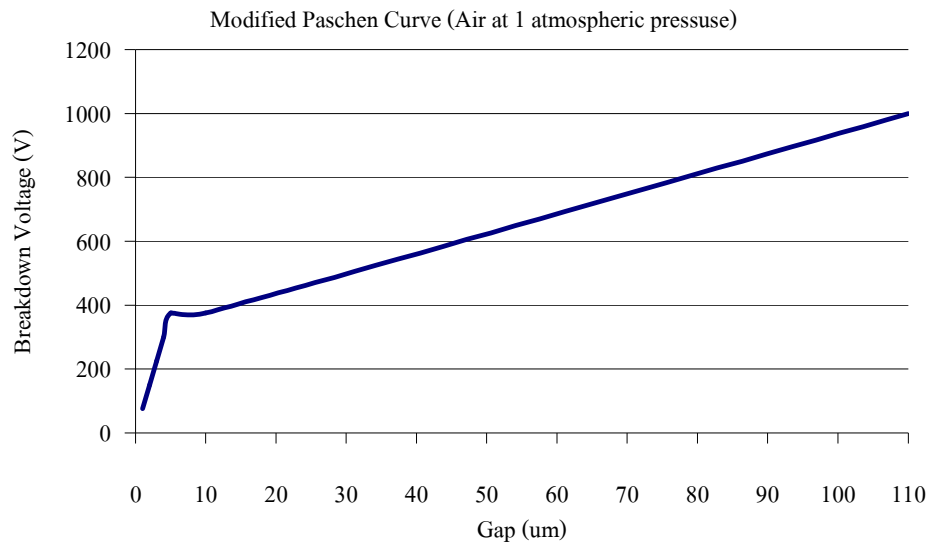


(ข) โครงสร้างสามมิติของมอเตอร์จุลภาค

รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

#### 4.1 การออกแบบโครงสร้างมอเตอร์จุลภาค

การออกแบบมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตหรือมอเตอร์จุลภาคในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงขนาดของแรงดันพังทลายเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งอาศัยหลักของเส้นโค้งพาเชน (Strong, 2006)

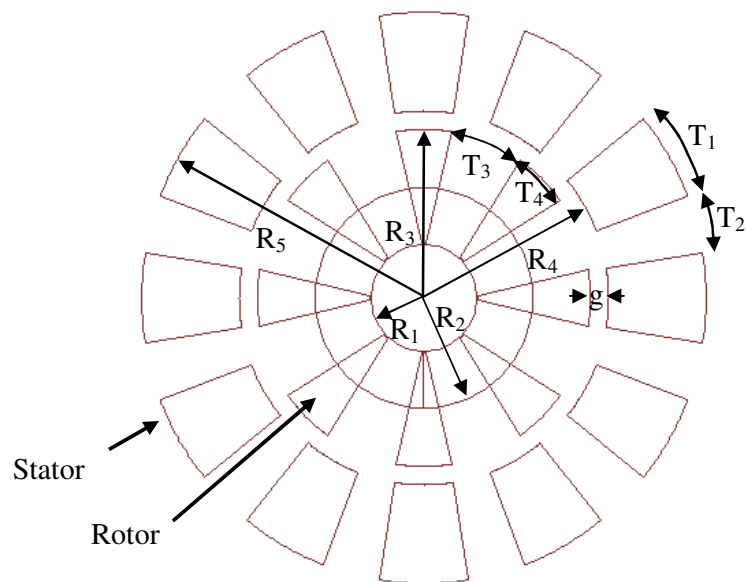


รูปที่ 4.3 ขนาดแรงดันพังทลายสำหรับตัวนำที่วางห่างกันในอากาศในระยะต่าง ๆ

เมื่อทราบขีดจำกัดของแรงดันพังทลายสำหรับตัวนำที่วางห่างกันในระยะต่าง ๆ แล้วจากนั้นจะเป็นการออกแบบขนาดของโครงสร้าง เริ่มต้นด้วยการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Yasseen et al., 1999; Emdemano, 2003; Vinhais et al., 2006; Behjat et al., 2007) แล้วทำการปรับปรุงขนาดโครงสร้าง กระบวนการสร้างให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้ออกแบบให้มีจำนวนขั้วของมอเตอร์จุลภาคมีจำนวนขั้วสเตเตอร์ต่อโรเตอร์เท่ากับ 12 ต่อ 8 เมื่อออกแบบโครงสร้างจนได้ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม จากนั้นนำโครงสร้างดังกล่าวมาวาดลงกระดาษ เพื่อสร้างหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถออกแบบลงกระดาษโครงสร้างจุลภาคได้ ในงานวิจัยใช้โปรแกรม Layout Editor<sup>®</sup> มีพารามิเตอร์แสดง ดังรูปที่ 4.4 แทนได้สัญลักษณ์ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

Parameter	Symbol	Size
Inner radius of the rotor	$R_1$	58 $\mu\text{m}$
Slot radius	$R_2$	250 $\mu\text{m}$
Rotor radius	$R_3$	443 $\mu\text{m}$
Inner radius of the stator	$R_4$	468 $\mu\text{m}$
Rotor-stator gap	$G$	25
Stator angle	$T_1$	18°
Stator angular space	$T_2$	12°
Rotor angular space	$T_3$	27°
Rotor angle	$T_4$	18°
Thickness	$h$	-
Bearing thickness	$h_b$	-



รูปที่ 4.4 ขนาดพารามิเตอร์ของมอเตอร์จุลภาคที่ออกแบบ

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการผลิตมอเตอร์โดยทั่วไปจะมีขนาดของระยะห่างระหว่างโครงสร้างที่เล็กที่สุดอยู่ในช่วง  $0.5 \mu\text{m}$ - $2 \mu\text{m}$  เนื่องจากมีกระบวนการสร้างฟิล์ม ที่สามารถควบคุมความหนาได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถสกัดเนื้อวัสดุเพื่อขึ้นรูปหรือทำลวดลายที่มีความเที่ยงตรง ซึ่งก็หมายถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานก็สูงตามไปด้วย การออกแบบขนาดโครงสร้างต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านการสร้างฟิล์มต้นแบบสำหรับเป็นหน้ากากกันแสง จึงมีขนาดโครงสร้างที่เล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้และมีความแม่นยำที่สามารถรับได้อยู่ในช่วง  $20 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$  เป็นเหตุผลทำให้โครงสร้างของมอเตอร์ที่ออกแบบจะต้องปรับขนาดโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้นโดยมีส่วนของโครงสร้างที่เล็กหรือแคบที่สุดอยู่ในช่วง  $20 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$  เมื่อโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว จึงจำเป็นที่จะต้องสร้างโครงสร้างให้มีความสูง เพื่อเป็นส่วนชดเชยของระยะห่างระหว่างโครงสร้าง เนื่องจากเหตุผลในเรื่องของแรงขับเคลื่อน (Driving force) เพราะหากโครงสร้างอยู่ห่างกันเกินไป จะทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมาก หมายถึงต้องสามารถสร้างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงมากพอ โรเตอร์จึงจะเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนเพื่อสร้างแหล่งจ่ายดังกล่าวและสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคืออันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูงต่อผู้ทดลองเองและอุปกรณ์อาจจะได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องทำการชดเชยโครงสร้างของมอเตอร์ด้วยการสร้างให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง เรียกว่า กระบวนการสร้างโครงสร้างจุดภาคตัดส่วนสูง (High aspect ratio micromachining) ต้องอาศัยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากรังสีเอ็กซ์มีพลังงานสูงทำให้ได้โครงสร้างที่มีผนังตั้งฉากกับฐานรองและเรียบคมและอีกเหตุผลที่ขนาดโครงสร้างของมอเตอร์จุดภาคมีขนาดโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่คือ ปัจจุบันกระบวนการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เพื่อสร้างได้ง่ายกว่าโครงสร้างขนาดเล็ก เพื่อเป็นการเรียนรู้และฝึกฝนเพื่อให้เกิดความเข้าใจและหาแนวทางการแก้ไขปัญหา การพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ให้เป็นมาตรฐานสำหรับการรองรับการสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการ โครงสร้างที่ขนาดเล็กต่อไป

#### 4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความจุไฟฟ้าและแรงบิด

สนามไฟฟ้าสถิต (Static electric field หรือ electrostatic field) คือ บริเวณรอบ ๆ ประจุที่ประจุสามารถส่งอำนาจไปถึง เกิดจากผลของประจุไฟฟ้าที่นิ่งอยู่กับที่ ซึ่งวางตัวอยู่ในตัวกลางต่าง ๆ เช่น วางตัวอยู่ในสุญญากาศหรืออวกาศว่าง (Free space) (นิรันดร์ คำประเสริฐ, 2551) ประจุเหล่านี้มีแรงกระทำต่อกันทำให้เกิดสนามไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าต่อไป การศึกษาเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกระทำระหว่างประจุสองประจุแปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสองและแปรผกผันกับระยะทางของประจุทั้งสองยกกำลังสองได้สมการเป็น

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon R^2} \quad (4.1)$$

โดยที่  $F$  คือ แรงไฟฟ้าสถิต (N)  
 $Q_1, Q_2$  คือ จำนวนประจุไฟฟ้า (C)  
 $R$  คือ ระยะทางระหว่างประจุ  
 $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon$  เท่ากับ  $\epsilon_0 \epsilon_r$  เท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m) เมื่อ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 1

การหาสนามไฟฟ้าหรือความเข้มสนามไฟฟ้า คือ แรงที่กระทำกับประจุหารด้วยประจุที่ถูกกระทำนั้น ๆ โดยพิจารณาจากสมการ (4.1) ให้  $Q_1$  เป็นประจุนิ่งอยู่กับที่  $Q_2$  คือประจุทดสอบจะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าเป็น

$$E = \frac{F}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon R^2} \quad (4.2)$$

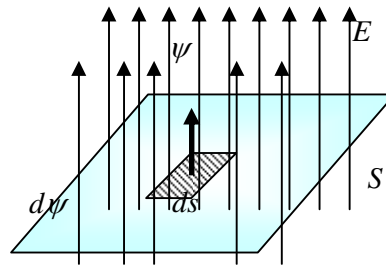
โดยที่  $E$  คือ สนามไฟฟ้า (N/C)

การพิจารณาสนามไฟฟ้าแบบพื้นผิวในแนวตั้งฉากที่พุ่งผ่านพื้นที่ผิว โดยกำหนดให้มีสนามไฟฟ้า ( $E$ ) พุ่งผ่านพื้นที่ ( $S$ ) จากกฎของเกาส์ (Gauss's law) ยืนยันว่าฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งผ่านผิวปิดใด ๆ จะมีค่าเท่ากับประจรรวมภายในผิวนั้น ดังรูปที่ 4.5 จึงได้สมการเป็น

$$\psi = \oint_s D \cdot ds = Q \quad (4.3)$$

เมื่อ  $\psi$  คือ ฟลักซ์ไฟฟ้าหรือจำนวนเส้นสนามไฟฟ้า (C)  
 $D$  คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า ( $C/m^2$ ) โดยที่  $D = \epsilon E$   
 $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศ  
 $S$  คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำ ( $m^2$ )  
 $Q$  คือ จำนวนประจุไฟฟ้า (C)



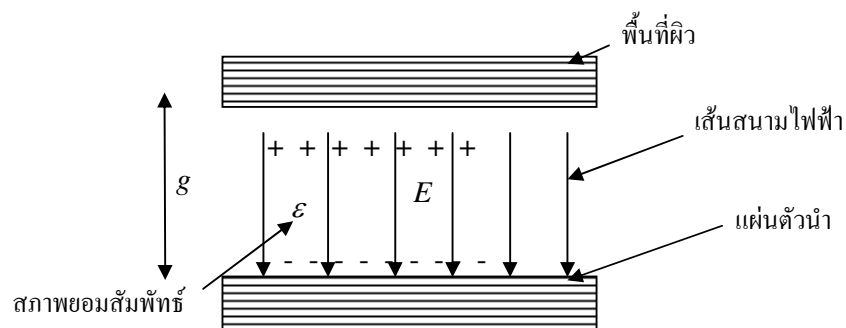


รูปที่ 4.5 พื้นที่สำหรับพิจารณาสนามไฟฟ้าแบบแผ่น

หากทำการอินทิเกรตสมการ (4.2) จะได้  $\psi = Q = \epsilon ES$  และได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแบบแผ่น ดังสมการ (4.4)

$$E = \frac{Q}{\epsilon S} \quad (4.4)$$

การเคลื่อนที่ของมอเตอร์อาศัยแรงไฟฟ้าสถิตในการขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่มีหลักการเช่นเดียวกับหลักการของแผ่นคู่ขนาน ดังรูปที่ 4.6 ประกอบด้วยแผ่นตัวนำขนานกันสองแผ่นและมีพื้นที่เท่ากับ  $S$  วางอยู่ห่างจากกันด้วยระยะทางสม่ำเสมอเท่ากับ  $g$  และยังมีระหว่างแผ่นทั้งสอง มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ  $\epsilon$  สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าโดยการประยุกต์กฎของเกาส์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 ภาคตัดขวางของตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนาน

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานมีค่าเท่ากับ  $Q = CV$  และ ค่าความจุไฟฟ้าจากสมการ

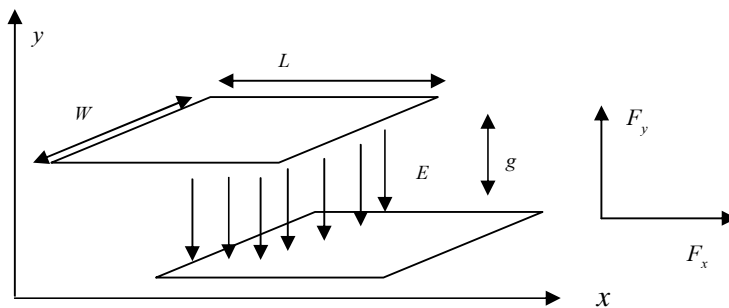
$$V = \int_{+}^{-} E dS = \frac{Q}{\epsilon S} \int_0^g dS = \frac{Qg}{\epsilon S} \quad (4.5)$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon S}{g} \quad (4.6)$$

โดยที่  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า (F)

เมื่อทราบถึงขนาดของความจุไฟฟ้าจากการคำนวณแล้ว ต่อมาเป็นการหาแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force:  $F$ ) ของแผ่นคู่ขนานโดยพิจารณา รูปที่ 4.7 แผ่นตัวนำมีความกว้างเท่ากับ  $w$  และความยาวเท่ากับ  $L$  ระยะห่างระหว่างแผ่นของตัวนำทั้งสองเท่ากับ  $g$



รูปที่ 4.7 แผ่นคู่ขนานสำหรับพิจารณาแรงไฟฟ้าสถิต

การหาพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Energy:  $W_e$ ) หาได้จากสมการ

$$W_e = \frac{1}{2} \int_{v'} \epsilon E^2 dv \quad (4.7)$$

โดยที่  $E = V/g$  เมื่อ  $V$  แรงดันหรือศักย์ไฟฟ้า และ  $g$  คือระยะห่างแผ่นตัวนำจะได้สมการใหม่เป็น

$$W_e = \frac{1}{2} \int_{v'} \epsilon \left(\frac{V}{g}\right)^2 dv = \frac{1}{2} \epsilon \left(\frac{V}{g}\right)^2 v \Big|_{v'} = \frac{1}{2} \epsilon \left(\frac{V}{g}\right)^2 Sg = \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon S}{g}\right) V^2 = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.8)$$

โดยที่  $W_e$  คือ พลังงานไฟฟ้าสถิต (J)  
 $v', v$  คือ ปริมาตรรวม ( $m^3$ )  
 $V$  คือ ศักย์ไฟฟ้า (V)  
 $g$  คือ ระยะห่างของแผ่นตัวนำ (m)

การหาแรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงที่ทำให้วัตถุสามารถเคลื่อนที่ได้ภายใต้เงื่อนไขประจุคงตัว (Constant charge condition) ที่อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าสถิต  $W_e$  สามารถหาได้จากสมการ

$$dW_e = F \cdot dx \quad (4.9)$$

และจะได้สมการของแรงไฟฟ้าสถิตของแผ่นคู่ขนานตามทิศทางเคลื่อนที่เป็นดังสมการ

$$F = \frac{d}{dx}(W_e) \quad (4.10)$$

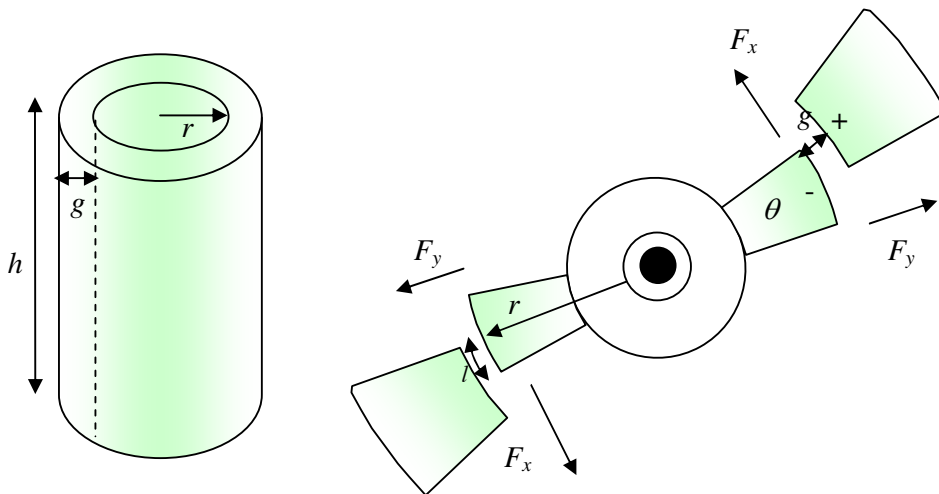
จึงสามารถคำนวณแรงได้จากสมการ

$$F_x = \frac{dW_e}{dl} = \frac{d}{dl} \left( \frac{1}{2} CV^2 \right) = \frac{d}{dl} \left( \frac{1}{2} \frac{\epsilon w l V^2}{g} \right) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon w V^2}{g} \quad (4.11)$$

$$F_y = \frac{dW_e}{dg} = \frac{d}{dg} \left( \frac{1}{2} CV^2 \right) = \frac{d}{dg} \left( \frac{1}{2} \frac{\epsilon w l V^2}{g} \right) = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon w l V^2}{g^2} \quad (4.12)$$

- โดยที่  $F_x$  คือ แรงไฟฟ้าสถิตทิศทางขนานกับแผ่นตัวนำ  
 $F_y$  คือ แรงไฟฟ้าสถิตทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ  
 $w$  คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ  
 $l$  คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

การเคลื่อนที่ของมอเตอร์จุลภาคเกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าบวกกับลบ ก็จะมีสนามไฟฟ้าขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ส่งผลให้มีแรงไฟฟ้าสถิต ( $F$ ) ดึงดูดระหว่างขั้วทั้งสอง ทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ตามทิศทางของการกระตุ้น การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เริ่มต้นโดยการคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งตัวนำของมอเตอร์เป็นลักษณะรูปทรงกระบอก (William and John, 2001; นิรันดร์ คำประเสริฐ, 2551) ดังรูปที่ 4.8 คือ ตัวนำภายในมีรัศมี  $r$  และตัวนำภายนอกอยู่ห่างจากตัวนำภายในเท่ากับ  $g$  ในช่องว่างระหว่างตัวนำทั้งสองเป็นอากาศมีสภาพยอมสัมพัทธ์เท่ากับ  $\epsilon$  และมีความสูงของตัวนำเท่ากับ  $h$  สามารถหาคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการพิจารณาบริเวณเหลื่อมซ้อน (Overlap:  $l$ ) ของโรเตอร์กับสเตเตอร์



รูปที่ 4.8 ตัวนำรูปทรงกระบอกสำหรับพิจารณาแรงไฟฟ้าสถิต

การคำนวณหาแรงบิด ค่าความจุไฟฟ้า โดยการประยุกต์กฎของเกาส์เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าเป็นลักษณะเป็นพื้นผิวทรงกระบอก จากสมการ (4.1) จะได้ดังสมการ

$$E = \frac{Q}{\epsilon S} = \frac{Q}{\theta \epsilon r h} \quad (4.13)$$

สามารถหาความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ได้ดังสมการ (4.14-4.15)

$$V = \int_r^{r+g} E dS = \frac{Q}{\theta \epsilon r h} \int_r^{r+g} dr = \frac{Q}{\theta \epsilon h} \int_r^{r+g} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{\theta \epsilon h} \ln \left( \frac{r+g}{r} \right) \quad (4.14)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon h \theta}{\ln \left( \frac{r+g}{r} \right)} \quad (4.15)$$

โดยที่  $r$  คือ รัศมีของตัวนำ  
 $\theta$  คือ ขนาดมุมของโรเตอร์

จากสมการที่ (4.9) เป็นการพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว ถ้าพิจารณาต่อเฟสจะมี 4 ขั้วเล็กโรต ได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเป็นดังสมการ

$$C_{ph} = 4C = \frac{4\epsilon h \theta}{\ln \left( \frac{r+g}{r} \right)} \quad (4.16)$$

โดยที่  $C_{ph}$  คือ ความจุไฟฟ้าต่อเฟส และพิจารณาสมการของแรงไฟฟ้าสถิตกับแรงบิดของมอเตอร์ต่อเฟส ดังสมการ

$$F = \frac{dW_e}{dl} = \frac{dW_e}{rd\theta} \quad (4.17)$$

เนื่องจากแรงบิด  $T_d = Fr$  และ  $l = r\theta$  เมื่อ  $l$  คือ ความยาวเหลื่อมซ้อน และ  $\theta$  คือ มุมของโรเตอร์ จึงได้สมการแรงบิดคือ

$$T_d = \frac{dW_e}{d\theta} = \frac{d}{d\theta} \left( \frac{1}{2} C_{ph} V^2 \right) \quad (4.18)$$

จากสมการ (4.17) และ (4.18) จะได้สมการคำนวณแรงบิดใหม่เป็น

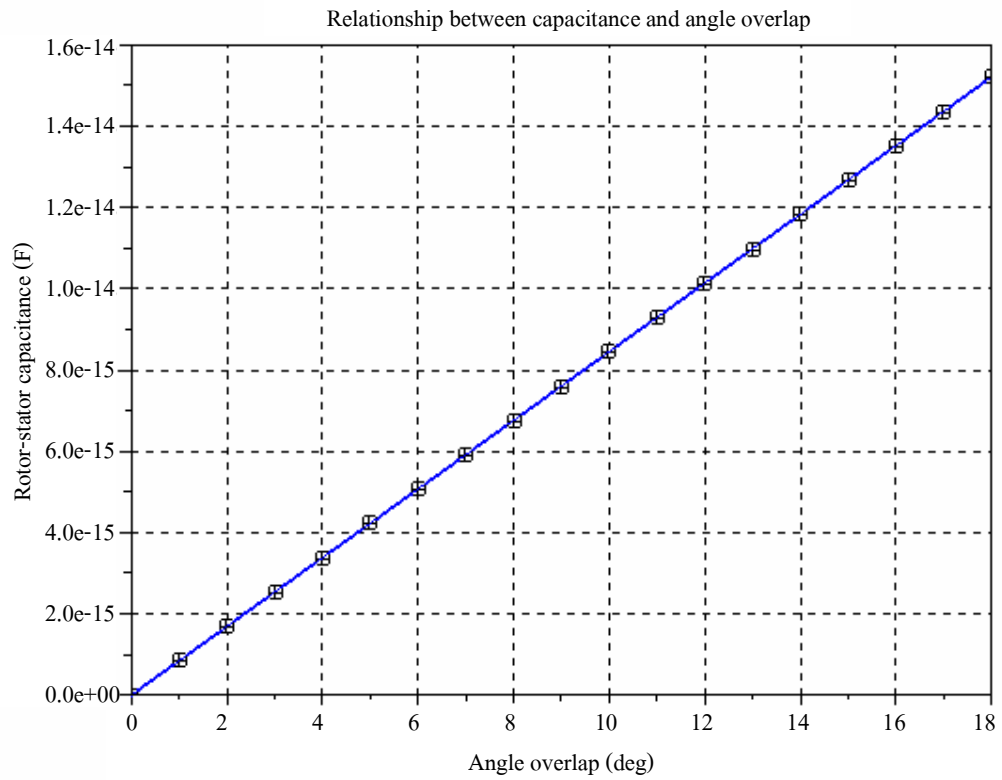
$$T_d = \frac{d}{d\theta} \left( \frac{2\epsilon h \theta V^2}{\ln\left(\frac{r+g}{r}\right)} \right) = \pm \frac{2\epsilon h V^2}{\ln\left(\frac{r+g}{r}\right)} \quad (4.19)$$

จากสมการ (4.19) ดังกล่าวเครื่องหมาย (-) หรือ (+) คือ ทิศทางของการหมุน

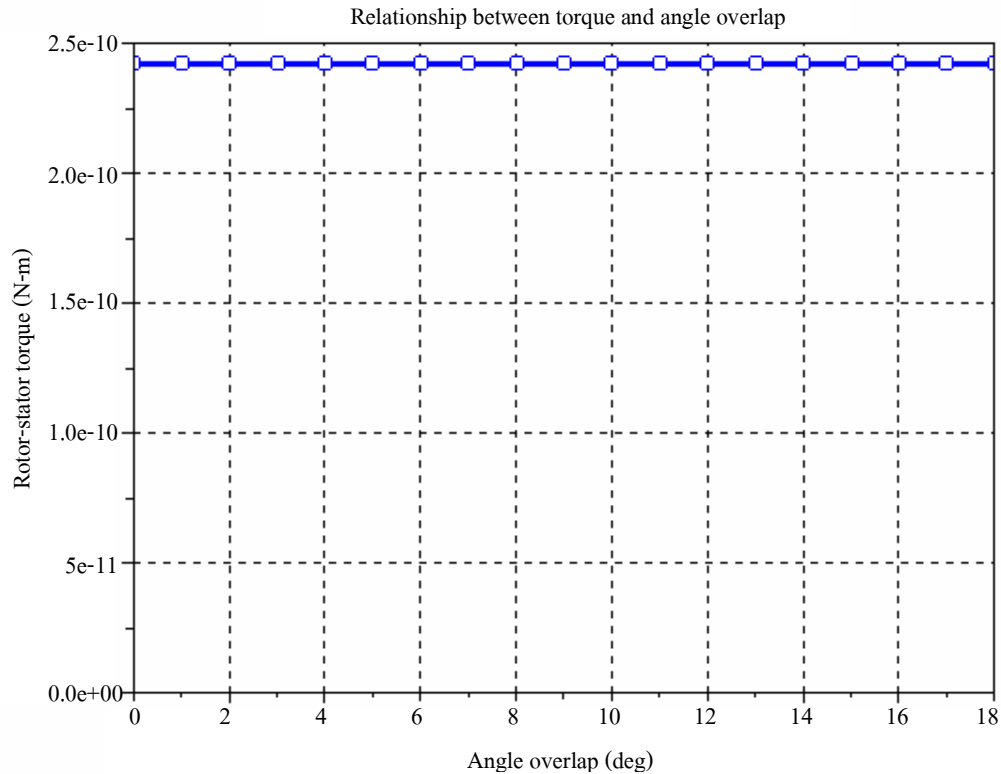
โดยที่  $T_d$  คือ แรงบิด (N-m)

$h$  คือ ความสูง (m)

เมื่อพิจารณาแรงบิดและค่าความจุไฟฟ้าโดยทดสอบที่ค่าของ  $\epsilon$  เท่ากับ  $8.8542 \times 10^{-12}$  F/m  $V$  เท่ากับ 50 V  $h$  เท่ากับ 300  $\mu\text{m}$   $r$  เท่ากับ 458  $\mu\text{m}$  และ  $g$  เท่ากับ 25  $\mu\text{m}$  สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้ากับมุมเหลื่อมซ้อนของโรเตอร์กับสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.9 และในรูปที่ 4.10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและมุมเหลื่อมซ้อนของโรเตอร์กับสเตเตอร์เช่นกัน พบว่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเมื่อโรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่และมีค่าสูงสุดอยู่ที่มุมเหลื่อมซ้อนเท่ากับ  $18^\circ$  และถ้าพิจารณาแรงบิดจะได้มีค่าคงตัวตลอดระยะเวลาการเคลื่อนที่ เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับมุมเหลื่อมซ้อน



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมเหลื่อมซ้อน

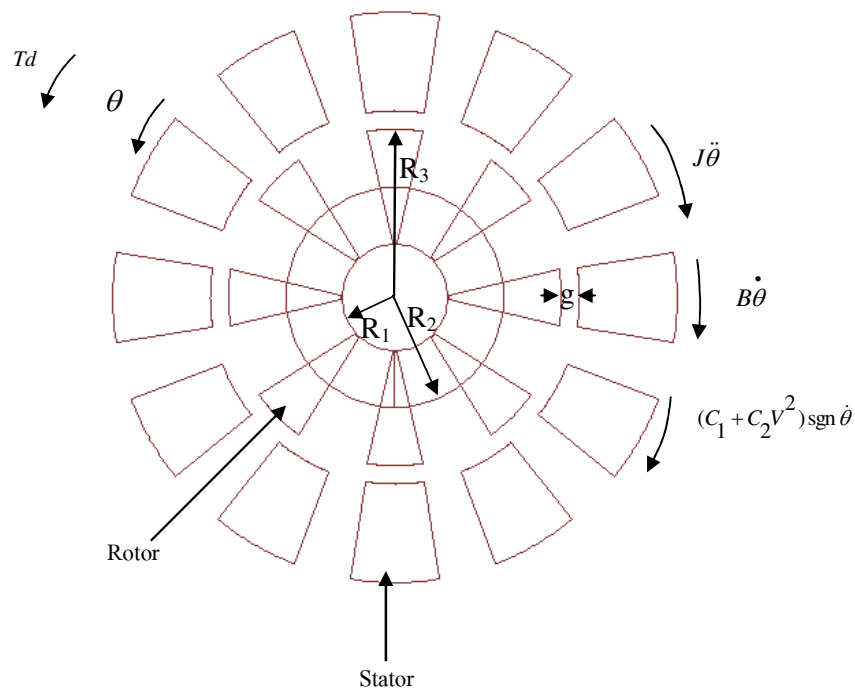
### 4.3 ระบบพลวัตของมอเตอร์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของมอเตอร์จุดภาค โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาสมการพลวัตของระบบ เมื่อวัตถุเกิดการหมุนหรือการเคลื่อนที่รอบแกนจะต้องพิจารณาถึงแรงบิดหรือเรียกได้ว่า โมเมนต์ของแรง โมเมนต์ความเฉื่อยหรือแรงบิดต้านการเคลื่อนที่ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการเลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ ความเร็วเข้าสู่สถานะอยู่ตัว โดยสามารถพิจารณารูปที่ 4.11 ขนาดพารามิเตอร์ของมอเตอร์จุดภาคประกอบด้วย  $R_1$  คือ รัศมีชั้นในของโรเตอร์  $R_2$  คือ รัศมีชั้นกลางของโรเตอร์  $R_3$  คือ รัศมีของโรเตอร์ และ  $g$  คือ ระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณความเร็วของมอเตอร์จุดภาค (Endemano et al., 2003; Mehregany, 1990) จาก  $\Sigma T_d = J \ddot{\theta}$  จะได้ว่า

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + (C_1 + C_2V^2)\text{sgn}\dot{\theta} = T_d \quad (4.20)$$



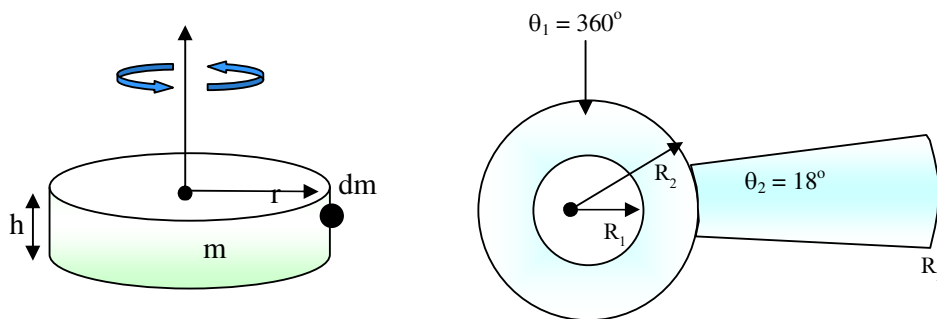
โดยที่	$T_d$	คือ แรงบิด (N-m)
	$J$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ ( $\text{kg-m}^2$ )
	$C_1$	คือ ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์ (N-m) (ค่ามาตรฐานเท่ากับ $1 \times 10^{-13}$ )
	$C_2$	คือ ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์ที่เป็นฟังก์ชันของแรงดัน (N-m/V <sup>2</sup> ) (ค่ามาตรฐานเท่ากับ $1 \times 10^{-17}$ )
	$\dot{\theta}$	คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
	$\ddot{\theta}$	คือ ความเร่งเชิงมุม (rad/s <sup>2</sup> )
	$V$	คือ แรงดัน (V)
	$B$	คือ ค่าแรงต้านของสัมประสิทธิ์ความหนืด (N-m-s)



รูปที่ 4.11 แสดงพารามิเตอร์สำหรับระบบพลวัต

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะพิจารณาเทอม  $(C_1 + C_2 V^2) \text{sgn } \dot{\theta}$  เป็นแรงเสียดทานที่ต่อต้านแรงบิด มีความไม่เป็นเชิงเส้น และมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อน โดยที่  $\text{sgn } \dot{\theta} = 1$  เมื่อ  $\dot{\theta} > 0$  และ  $\text{sgn } \dot{\theta} = -1$  เมื่อ  $\dot{\theta} < 0$  ค่าที่เป็นบวกหรือลบนี้ขึ้นกับทิศทางการหมุน หากพิจารณาการหมุนเพียงด้านเดียวและกำหนดให้เป็นบวกเทอมนี้มีค่าเท่ากับ 1

ต่อมาการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุซึ่งเป็นปริมาณที่ต่อต้านการหมุนของวัตถุ ถ้าหากมีขนาดปริมาณมาก ก็ต้องใช้แรงบิดมากในการทำให้วัตถุเคลื่อนที่มีขนาดเท่ากับผลคูณของมวลกับระยะทางกำลังสองจากจุดหมุนถึงมวล โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ (Hibbeler, 2004) ซึ่งโครงสร้างของมอเตอร์จูลภาคเป็นลักษณะรูปทรงกระบอกดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โครงสร้างมอเตอร์จูลภาคสำหรับหาโมเมนต์ความเฉื่อย

จากรูปสามารถหาสมการ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุทรงกระบอกหมุนรอบแกนได้ดังสมการที่ (4.21) และ (4.22)

$$J = \int_m r^2 dm \quad (4.21)$$

$$dm = \rho dV = \rho h dA = \rho h r dr d\theta \quad (4.22)$$

สามารถเขียนสมการ (4.21) ใหม่ได้เป็นดังสมการ

$$J = \int_m r^3 \rho h dr d\theta \quad (4.23)$$

โดยที่  $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย  
 $R$  คือ รัศมีของวงกลม  
 $m$  คือ มวลของวัตถุ

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

หากพิจารณาโครงสร้างของมอเตอร์สามารถหาขนาดโมเมนต์ความเฉื่อยได้ดังสมการ

$$J = \rho h \int_0^{\theta_1} \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr d\theta + 8\rho h \int_0^{\theta_2} \int_{R_2}^{R_3} r^3 dr d\theta$$

$$= \frac{1}{4} \rho h (R_2^4 - R_1^4) \theta_1 + 2\rho h (R_3^4 - R_2^4) \theta_2 \quad (4.24)$$

โดยที่  $R_1$  คือ รัศมีชั้นในของโรเตอร์  
 $R_2$  คือ รัศมีชั้นกลางของโรเตอร์  
 $R_3$  คือ รัศมีของโรเตอร์  
 $\theta_1$  คือ มุมของรัศมี  $R_2$   
 $\theta_2$  คือ มุมของรัศมี  $R_3$   
 $h$  คือ ความสูง

การคำนวณหาค่าแรงต้านของสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of viscous drag) ของวัตถุ (Bart, 1992) ดังสมการ

$$B = \frac{\pi \eta R_3^4}{h_b} \quad (4.25)$$

โดยที่  $B$  คือ แรงต้านของสัมประสิทธิ์ความหนืด (N-m-s)  
 $h_b$  คือ ความสูงแบริง (m)  
 $\eta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของอากาศเท่ากับ  $1.82 \times 10^{-5}$  kg/m-s

#### 4.4 การหาผลเฉลยของสมการพลวัต

หลังจากทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหมุน จากนั้นเป็นการหาผลเฉลยหรือแก้ปัญหาด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ วิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) และการแก้ปัญหาด้วย SCICOS (Scilab connected object simulator) เป็นโปรแกรมจำลองผลเกี่ยวกับระบบพลวัตของ Scilab ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลทั้ง 3 วิธี ได้แก่

##### 4.4.1 การหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์

จากสมการ (4.15) หากนำไปแก้ปัญหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) จะพิจารณาเทอมของแรงเสียดทาน  $\text{sgn } \dot{\theta} = 1$  เมื่อ  $\dot{\theta} > 0$  และ  $\text{sgn } \dot{\theta} = -1$  เมื่อ  $\dot{\theta} < 0$  ค่าที่เป็นบวกหรือลบนี้ขึ้นกับทิศทางการหมุนแต่หากพิจารณาการหมุนเพียงด้านเดียว โดยให้เป็นบวก เทอมนี้จะมีค่าเป็น 1 สามารถพิจารณาสมการดังกล่าวเป็นลักษณะสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Nonhomogeneous equations) (Kreyzig, 1999) ดังนี้

$$\ddot{\theta} + p(t)\dot{\theta} + q(t)\theta = r(t) \quad (4.26)$$

$p(t)$  และ  $q(t)$  เป็นค่าคงตัว ส่วน  $r(t)$  เป็นสมการอยู่ในรูปฟังก์ชันต่าง ๆ โดยที่คำตอบทั่วไปของสมการแบบไม่เอกพันธ์จะอยู่ในรูปของ

$$\theta(t) = \theta_h(t) + \theta_p(t) \quad (4.27)$$

โดย  $\theta_h(t)$  คือ คำตอบทั่วไปของสมการเอกพันธ์เท่ากับ  $c_1\theta_1(t) + c_2\theta_2(t)$

$c_1, c_2$  คือ ค่าที่จะสมมติให้เป็นค่าคงตัวใด ๆ

$\theta_p(t)$  คือ ผลเฉลยเฉพาะ

ดังนั้นสามารถจัดรูปสมการ (4.20) ใหม่ เพื่อเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการ (4.27) ได้เป็น

$$\ddot{\theta} + \frac{B}{J}\dot{\theta} = \frac{Td - (C_1 + C_2V^2)}{J} \quad (4.28)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณกำหนดให้  $\frac{B}{J}$  แทนด้วยตัวแปร  $Z$  และ  $\frac{Td - (C_1 + C_2 V^2)}{J}$  แทนด้วยตัวแปร  $Y$  จึงได้สมการใหม่เป็น

$$\ddot{\theta} + Z\dot{\theta} = Y \quad (4.29)$$

ในทางปฏิบัติ การหาค่าคอบของสมการดังกล่าวมีวิธีดังนี้

1. หาผลเฉลยทั่วไป  $\theta_h(t)$  จากสมการเอกพันธ์  $\ddot{\theta} + p(t)\dot{\theta} + q(t)\theta = 0$  มีสมการเอกพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสมการคือ

$$\ddot{\theta} + Z\dot{\theta} = 0 \quad (4.30)$$

ซึ่งมีสมการพหุนามลักษณะเฉพาะ (Polynomial characteristic) เป็น  $\lambda^2 + Z\lambda = 0$  ได้ผลเฉลยคือ  $\lambda = 0, -Z$  ดังนั้นสมการเอกพันธ์มีผลเฉลยดังนี้

$$\theta_h(t) = c_1 + c_2 e^{-Zt} \quad (4.31)$$

2. หาผลเฉลยเฉพาะ  $\theta_p(t)$  จากสมการไม่เอกพันธ์  $\ddot{\theta} + p(t)\dot{\theta} + q(t)\theta = r(t)$  มีผลเฉพาะคือ

$$\begin{aligned} \theta_p(t) &= At \\ \dot{\theta}_p(t) &= A \\ \ddot{\theta}_p(t) &= 0 \end{aligned} \quad (4.32)$$

เมื่อนำผลเฉลยดังสมการ (4.32) แทนในสมการ (4.29) จะได้  $A = Y/Z$  ทำให้ได้ผลเฉลยเฉพาะเป็น

$$\theta_p(t) = \frac{Y}{Z}t \quad (4.33)$$

3. ผลเฉลยทั่วไปของสมการแบบไม่เอกพันธ์  $\theta(t) = \theta_h(t) + \theta_p(t)$  เป็นดังสมการ

$$\theta(t) = c_1 + c_2 e^{-Zt} + \frac{Y}{Z} t \quad (4.34)$$

$$\dot{\theta}(t) = -Zc_2 e^{-Zt} + \frac{Y}{Z} \quad (4.35)$$

จากผลเฉลยดังกล่าวกำหนดให้ค่าเริ่มต้น  $\theta(0) = 0$  และ  $\dot{\theta}(0) = 0$  เนื่องจากสถานะเริ่มต้นโรเตอร์ยังไม่เกิดการเคลื่อนที่จะได้

$$\theta(0) = c_1 + c_2 = 0 \quad (4.36)$$

$$\dot{\theta}(0) = -Zc_2 + \frac{Y}{Z} = 0 \quad (4.37)$$

จากสมการที่ (4.36) และ (4.37) จะได้  $c_1 = -\frac{Y}{Z^2} = -c_2$  สามารถเขียนผลเฉลยทั่วไปได้ดังนี้

$$\theta(t) = \frac{Y}{Z^2} (e^{-Zt} + Zt - 1) \quad (4.38)$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{Y}{Z} (1 - e^{-Zt}) \quad (4.39)$$

จากนั้นแทน  $Z$  ด้วย  $\frac{B}{J}$  และ  $Y$  ด้วย  $\frac{Td - (C_1 + C_2 V^2)}{J}$  ในสมการ (4.32) และ (4.33) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\theta(t) = \frac{J}{B^2} (Td - C_1 - C_2 V^2) \left( e^{-\frac{B}{J} t} + \frac{B}{J} t - 1 \right) \quad (4.40)$$

$$\dot{\theta}(t) = \frac{Td - C_1 - C_2V^2}{B} (1 - e^{-\frac{Bt}{J}}) \quad (4.41)$$

การคำนวณเชิงวิเคราะห์ทำให้ได้มาซึ่งสมการที่ (4.40-4.41) จากนั้นสร้างโปรแกรมเพื่อหาผลเฉลยจากสมการดังกล่าวซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก. กำหนดให้โครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นดังนี้  $V$  เท่ากับ 50 V  $\mathcal{E}$  เท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m  $h$  เท่ากับ 300  $\mu\text{m}$   $\rho_{\text{SU-8}}$  เท่ากับ  $1200 \text{ kg/m}^3$   $R_1$  เท่ากับ  $58 \times 10^{-6}$  m  $R_2$  เท่ากับ 250  $\mu\text{m}$   $R_3$  เท่ากับ 458  $\mu\text{m}$   $g$  เท่ากับ 25  $\mu\text{m}$   $\eta$  เท่ากับ  $1.83 \times 10^{-6}$  Kg/m-s  $h_b$  เท่ากับ 1  $\mu\text{m}$   $C_f$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-13}$  N-m และ  $C_2$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-17}$  N-m/V<sup>2</sup>

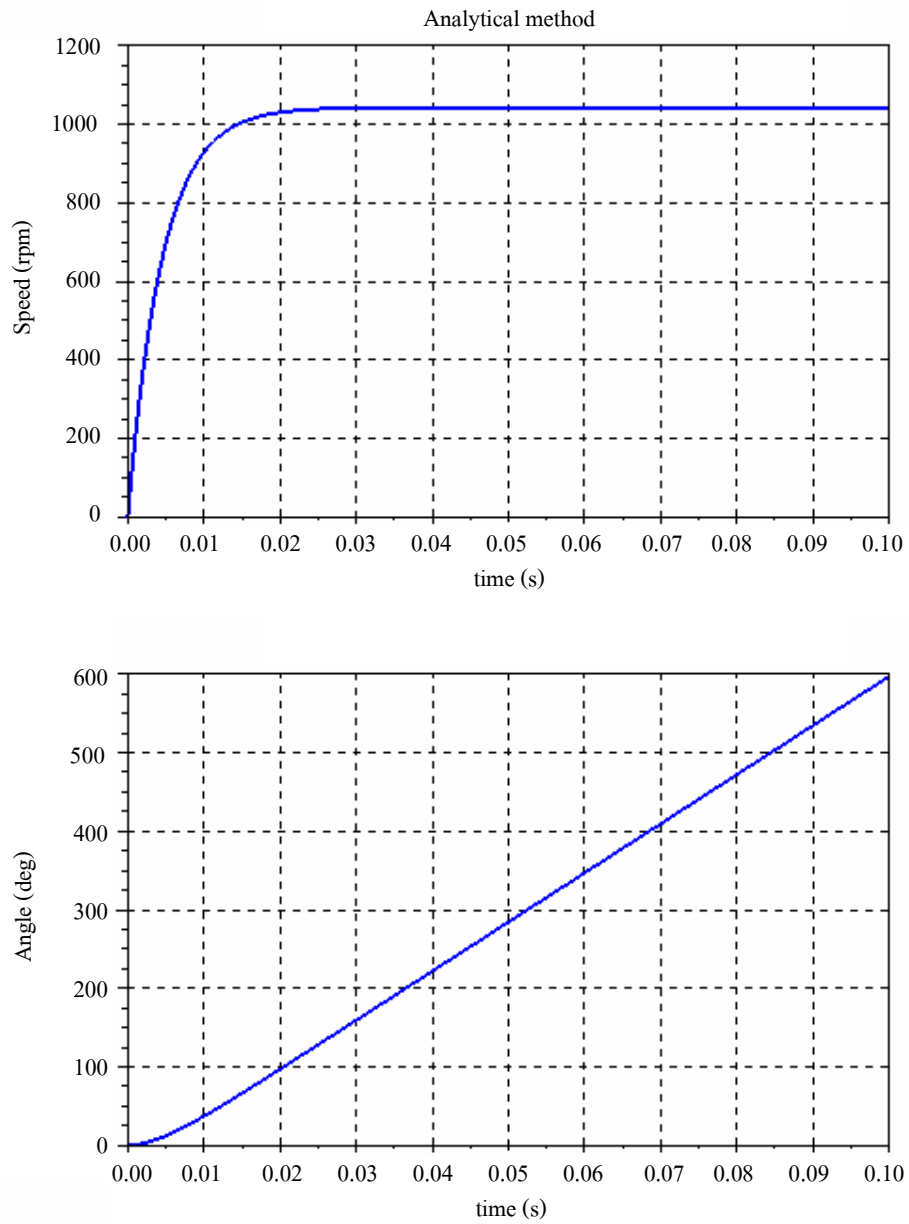
จากพารามิเตอร์ดังกล่าวเมื่อกำหนดค่าจะได้ค่าดังนี้  $T_d$  เท่ากับ  $2.418 \times 10^{-10}$  N-m  $B$  เท่ากับ  $2.21 \times 10^{-12}$  N-m-s และ ค่า  $J$  เท่ากับ  $1.0 \times 10^{-14}$  kg-m<sup>2</sup> และได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ๆ ดังรูปที่ 4.13

#### 4.4.2 การหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

การหาผลเฉลยด้วยวิธีนี้จะใช้ฟังก์ชัน ODE ของ SCILAB โดยใช้วิธีของรุ่ง-คัตตา อันดับ 4 (Runge kutta method : RK4) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขสำหรับระบบพลวัตอีกวิธีหนึ่งที่ได้ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางเพราะมีความแม่นยำสูงและใช้เวลาการคำนวณไม่นานเกินไป จากสมการที่ (4.20) กำหนดตัวแปรสถานะเป็น  $x_1 = \theta$  และ  $x_2 = \dot{\theta}$  จึงเขียนสมการสถานะได้เป็น

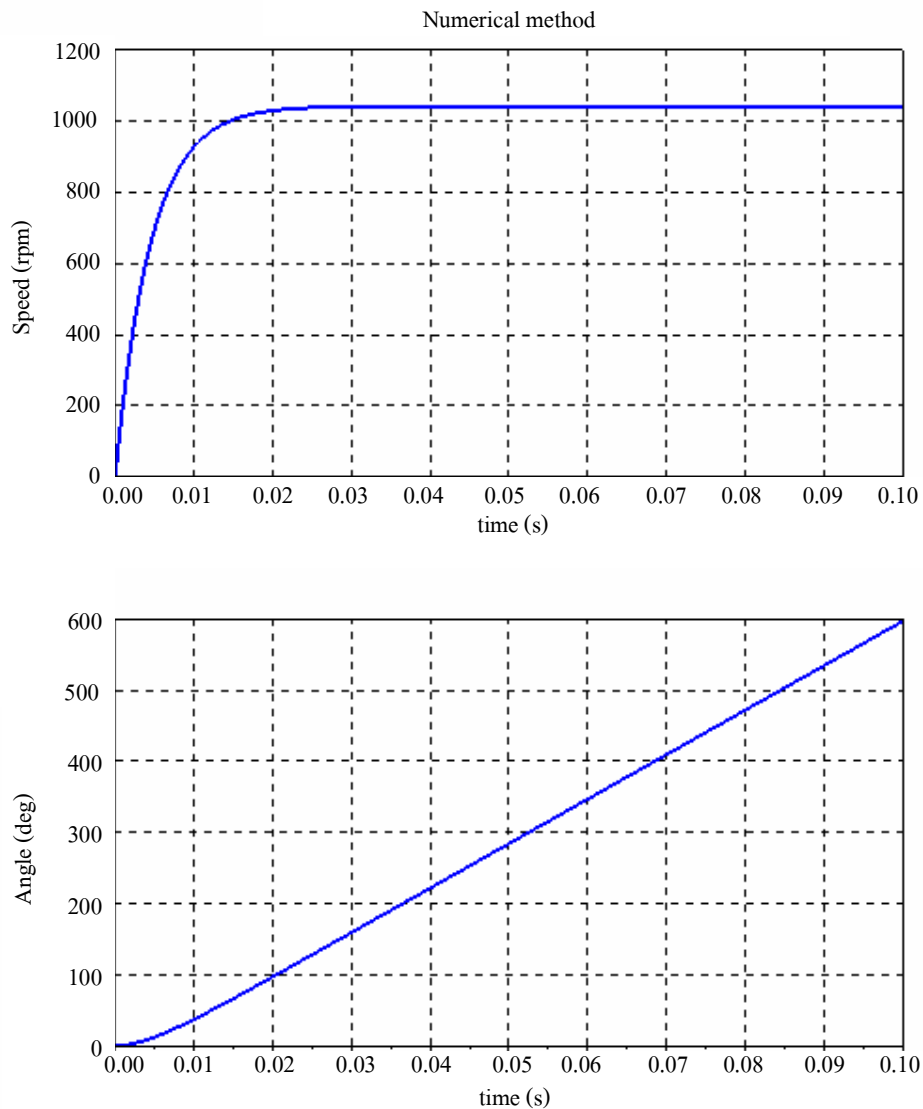
$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{Td - Bx_2 - (C_1 + C_2V^2) \text{sgn}(x_2)}{J} \end{aligned} \quad (4.42)$$

จากสมการที่ 4.42 สามารถสร้างโปรแกรมเพื่อจำลองผลดังแสดงในภาคผนวก ก. โดยใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับหัวข้อย่อย 4.4.1 ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 4.14



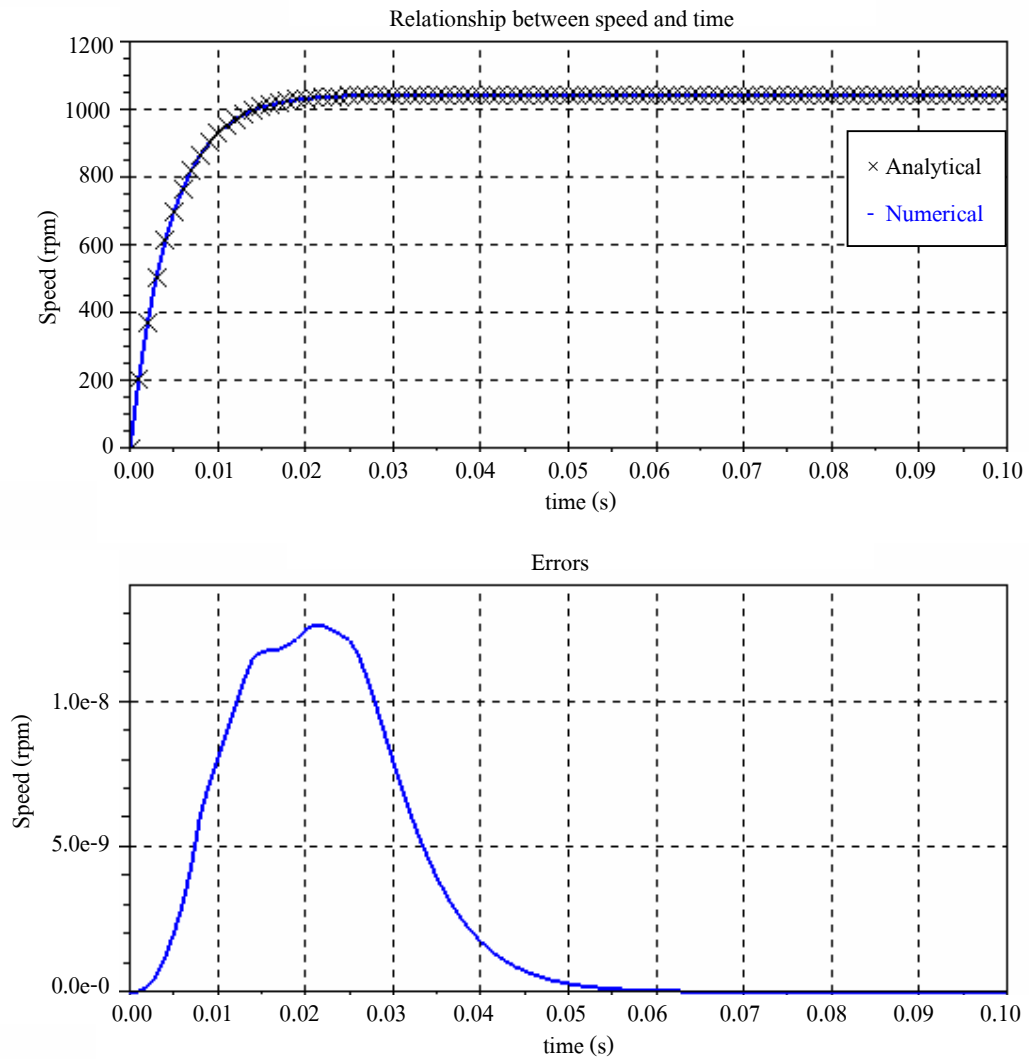
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์





รูปที่ 4.14 ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวได้ใช้วิธี รัง-กูดตา อันดับสี่ จึงได้ความแม่นยำ และสามารถเปรียบเทียบความเร็วและคลาดเคลื่อนของการคำนวณทั้งสองวิธี ได้ดังรูปที่ 4.15

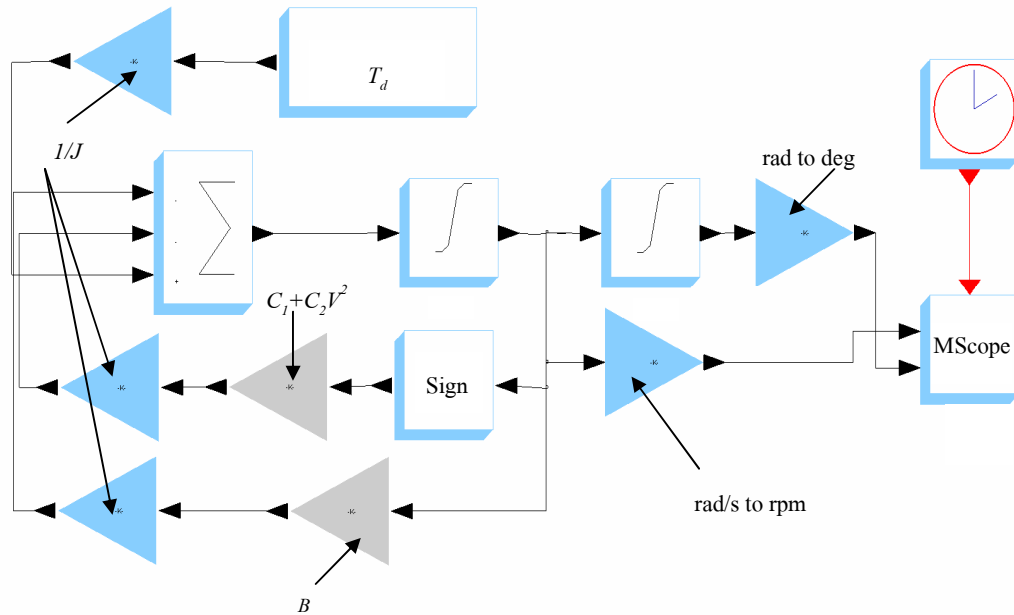


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบความเร็วและความคลาดเคลื่อนกับเวลาของวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ และการคำนวณเชิงตัวเลข

จากกราฟผลการเปรียบเทียบความเร็วกับเวลาด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่า มีค่าความเร็วใกล้เคียงกัน และค่าคลาดเคลื่อนพุ่งสูงอยู่ในช่วงเริ่มต้นและค่อย ๆ ปรับตัวลดลงเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

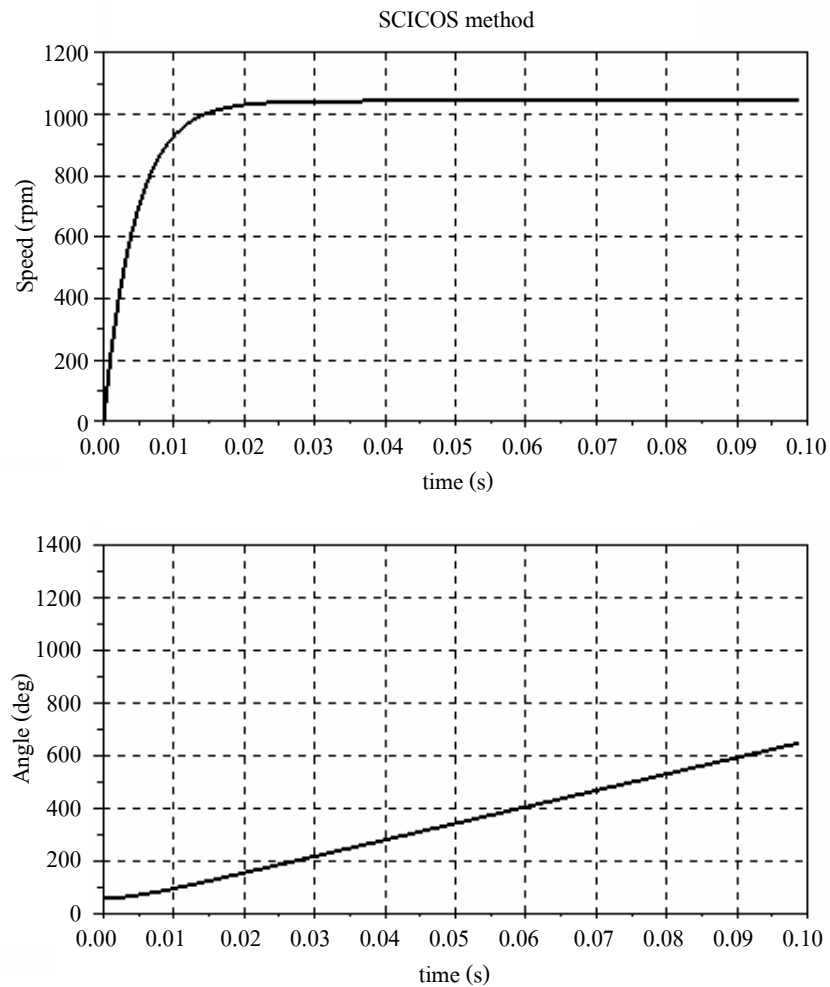
#### 4.4.3 การหาผลเฉลยของสมการพลวัตด้วย SCICOS

จากสมการที่ (4.42) สามารถสร้างโปรแกรม SCICOS โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ เท่ากันกับพารามิเตอร์ในหัวข้อย่อย 4.4.1 มีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งการแก้ปัญหาด้วย SCICOS เป็นการแก้ปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขอีกวิธีที่มีความสะดวกและรวดเร็ว



รูปที่ 4.16 การจำลองระบบพลวัตด้วย SCICOS

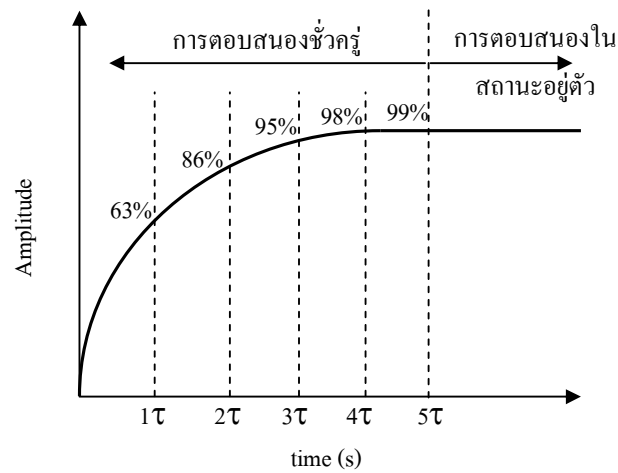
จากโปรแกรม SCICOS เพื่อจำลองผลระบบพลวัตมีส่วนประกอบของโปรแกรม ได้แก่ ค่าแรงบิด ( $T_d$ ) ค่าแรงเสียดทาน ( $C_1 + C_2 V^2$ ) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ( $J$ ) ค่าแรงต้านของสัมประสิทธิ์ความหนืด ( $B$ ) และเวลา (time) ซึ่งผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.17 พบว่ามีผลการตอบสนองต่ออินพุตเป็นลักษณะเดียวกันกับการคำนวณเชิงวิเคราะห์และการคำนวณเชิงตัวเลข



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองระบบพลวัตด้วยโปรแกรม SCICOS

#### 4.5 ผลการจำลองการตอบสนองของระบบ

จากการหาผลเฉลยของสมการพลวัตที่ผ่านมา เป็นการใช้สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได (Unit step) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวใช้อย่างกว้างขวางและเป็นสัญญาณมาตรฐานสำหรับการทดสอบระบบ (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546) การตอบสนองของระบบพลวัต มีองค์ประกอบสองส่วน ได้แก่ การตอบสนองชั่วคราว (Transient response) และการตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (Steady-state response) การตอบสนองทั้งสองแบบรวมกันเกิดเป็นการตอบสนองรวม ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันได

เมื่อเวลาผ่านไปยาวนาน ( $t \rightarrow \infty$ ) การตอบสนองชั่วคราวจะสลายไป ยังคงเหลือส่วนของการตอบสนองในสภาวะคงตัว ซึ่งรูปทรงของการตอบสนองชั่วคราวนั้นขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนการตอบสนองในสถานะอยู่ตัว ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอินพุต

จากรูปของผลการตอบสนองของมอเตอร์พบว่า มีรูปแบบการตอบสนองของระบบเป็นอันดับหนึ่ง (First order) มีสัญญาณอินพุตเป็นแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step response) และมีสมการเป็น

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.43)$$

โดยที่  $c(t)$  คือ แอมพลิจูดของการตอบสนองรวม

$T$  คือ เวลา

$\tau$  คือ ค่าคงที่ทางเวลา (Time constant)

จากสมการที่ (3.36) หากเวลาผ่านไปเนิ่นนานจะพบว่า

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = c(\infty) = 1 \quad (4.44)$$

สมการที่ (4.44) เป็นการตอบสนองขั้นสุดท้ายและพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา  $\tau$  วินาที การตอบสนองมีค่าแอมพลิจูดเป็น 63% ของค่าสุดท้าย (Final value) เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ  $2\tau$   $3\tau$   $4\tau$  และ  $5\tau$  ระบบจะตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็น 86% 95% 98% และ 99% ของค่าสุดท้ายตามลำดับ ซึ่งในทางวิศวกรรมถือว่าระบบให้การตอบสนองโดยสมบูรณ์เท่ากับ  $5\tau$  หรือ 5 เท่าของค่าคงที่ทางเวลาระบบและเมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์การตอบสนองของมอเตอร์จากสมการที่ (4.43) กับสมการที่ (4.36) จะได้  $c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - e^{-\frac{B}{J}t}$  และได้ค่าคงที่ทางเวลาเป็น

$$\tau = \frac{J}{B} \quad (4.45)$$

จากการแก้สมการจะได้ค่าคงที่ทางเวลาเท่ากับ  $J/B$  จากการตอบสนองต่ออินพุตจากรูปที่ 4.9-4.12 มีค่า  $B$  เท่ากับ  $2.21 \times 10^{-12}$  N-m-s และค่า  $J$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-14}$  kg-m<sup>2</sup> ดังนั้น  $\tau$  มีค่าเท่ากับ 4.53 ms ทำให้ระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเท่ากับ 22.65 ms มีความเร็วเท่ากับ 1035 rpm ระบบดังกล่าวเป็นระบบอันดับหนึ่ง มีรูปฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

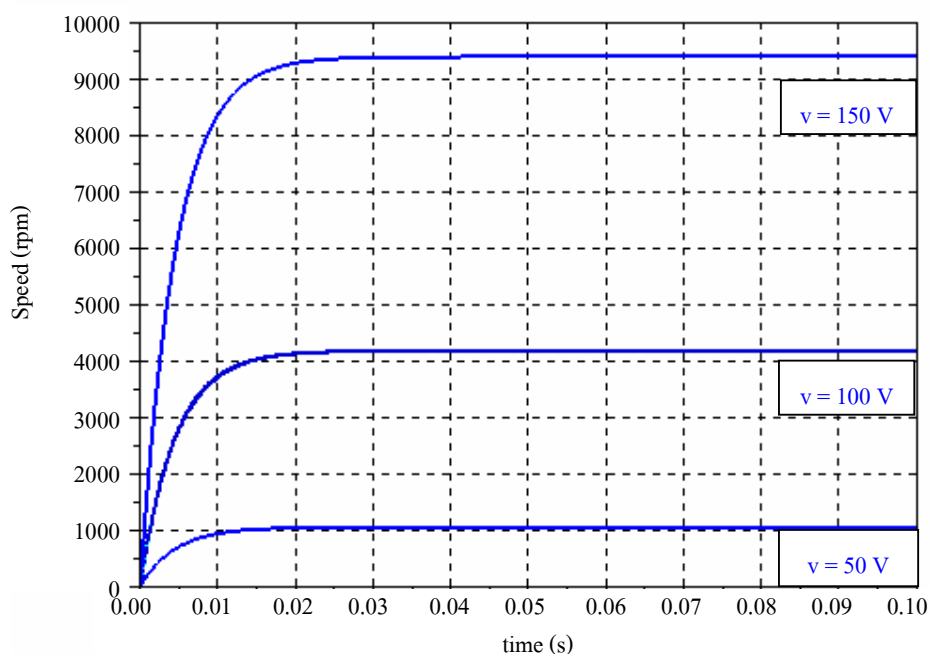
$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (4.46)$$

โดยที่  $G(s)$  คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน  
 $K$  คือ อัตราขยายหรือเกน  
 $C(s)$  คือ เอาต์พุต  
 $R(s)$  คือ อินพุต

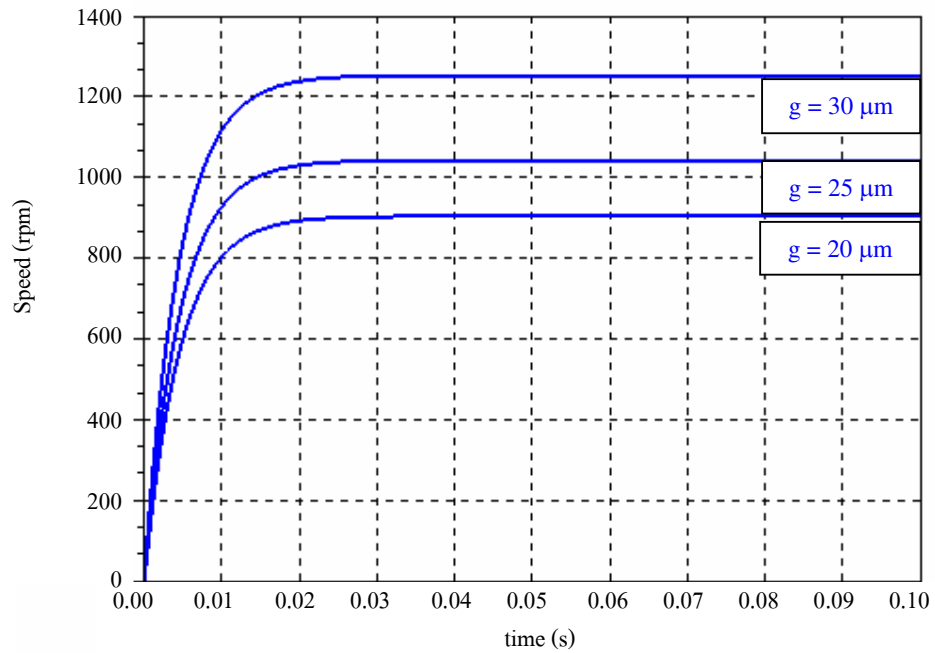
จากฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อทำการชดเชยระบบเพื่อให้ตอบสนองได้ดียิ่งขึ้นได้แก่ตัวชดเชย พี พีโอ หรือ พีโอดี โดยในงานวิจัยนี้จะไม่ขอเสนอการชดเชยด้วยวิธีดังกล่าว เพียงแต่หาฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่ออธิบายผลตอบสนองของระบบเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอินพุตหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ และเป็นการวางรากฐานสำหรับการพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์จูลภาค ในโอกาสต่อไป จากมอเตอร์จูลภาคที่ทำการสร้างขึ้นมีจำนวนโรเตอร์ต่อสเตเตอร์เท่ากับ 8 ต่อ 12 มีขนาดของมุมเหลื่อมซ้อนระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เป็น  $18^\circ$  สำหรับขั้วที่อยู่ตรงกันและขั้วของโรเตอร์ตัวถัดไปจะทำมุมเหลื่อมซ้อนกับสเตเตอร์ตัวถัดไปเท่ากับ  $3^\circ$  ทำให้มอเตอร์จูลภาค

ต้องเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอีก  $15^\circ$  จึงจะเข้าเหลี่ยมซ้อนกับขั้วของสเตเตอร์ที่ป้อนแรงดันพอดิ หากต้องการควบคุมให้มอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง ทำได้โดยการหาระยะเวลาที่มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่ากับ  $15^\circ$  แล้วทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้แก่ขั้วสเตเตอร์ตัวถัดไป ซึ่งจากผลการจำลองได้ระยะเวลาและความเร็วที่  $15^\circ$  เท่ากับ 5.7 ms และ 746 rpm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ณ ตำแหน่งดังกล่าวมอเตอร์ยังเคลื่อนที่อยู่ในช่วงการตอบสนองชั่วคราว ถ้าหากต้องการให้มอเตอร์จุลภาคเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องจนมีความเร็วเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ต้องทำการป้อนแรงดันที่สเตเตอร์ถัดไปทันทีจะทำให้มอเตอร์จุลภาคเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องโดยการควบคุมจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 6 ต่อไป

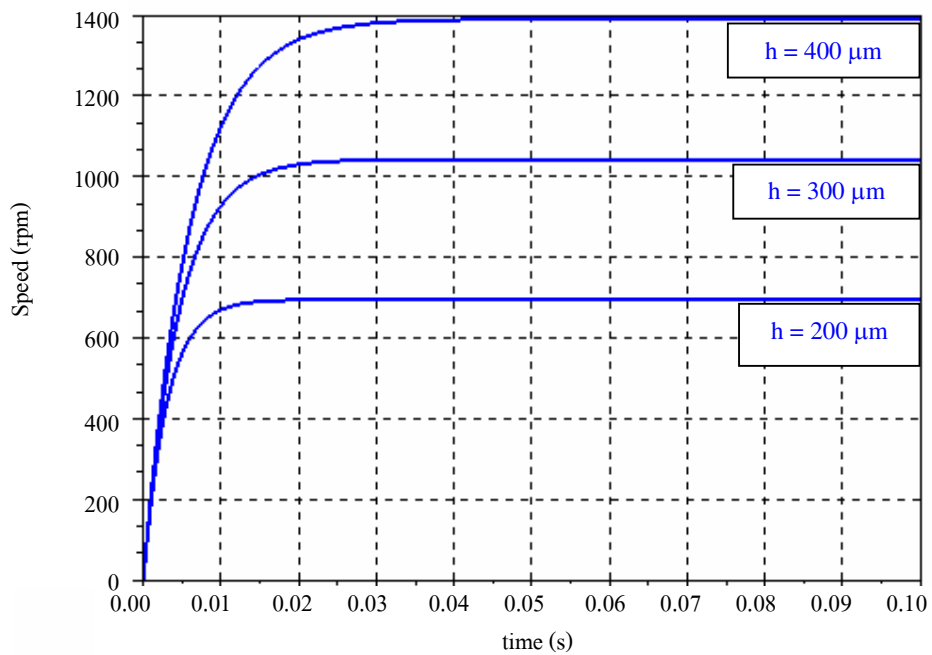
จากการจำลองระบบพบว่าการแก้ปัญหาทั้งสามวิธีได้คำตอบที่ใกล้เคียงมากกันจึงเลือกใช้การจำลองผลระบบพลวัตโดยการแก้ปัญหาด้วยการคำนวณเชิงวิเคราะห์เพราะเป็นผลเฉลยที่แม่นยำและสามารถแสดงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เมื่อรับสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ดังรูปที่ 4.19-4.21 เพื่อใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ โดยกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.19 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอินพุต



รูปที่ 4.20 ผลการตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์



รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของระบบเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของโรเตอร์

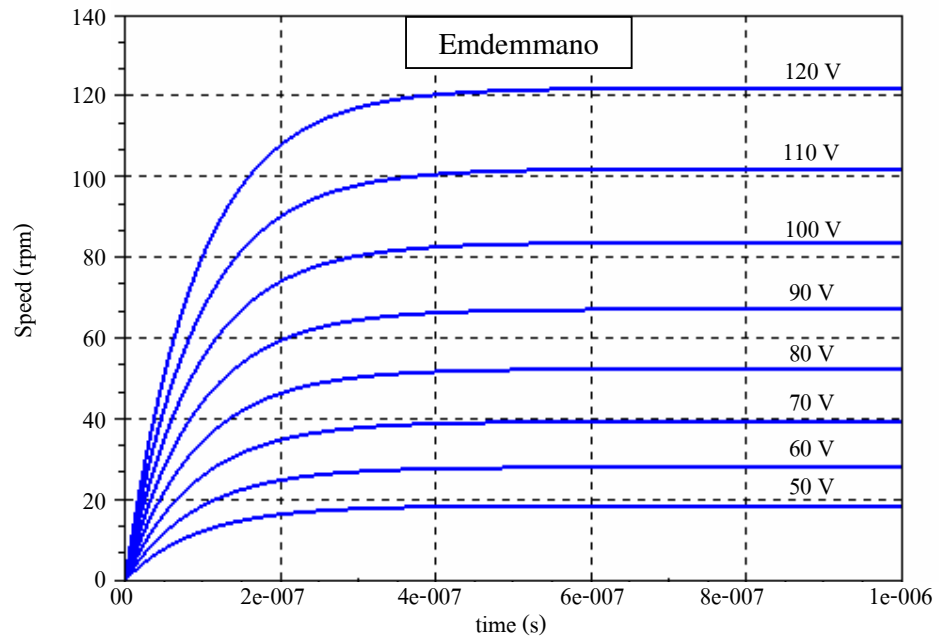


จากผลการจำลองในรูปที่ 4.19 เมื่อทำการเพิ่มแรงดันอินพุตให้กับระบบ โดยคงค่าความสูงและระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ที่ค่าใดค่าหนึ่ง พบว่าความเร็วของโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าแรงบิดมีค่าเพิ่มและพบว่าค่าคงที่ทางเวลายังคงเท่าเดิมเพราะค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับโมเมนต์ความเฉื่อยและความหนืดซึ่งไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เมื่อทำการคงค่าแรงดันอินพุตกับความสูงแล้วลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ดังรูปที่ 4.20 พบว่ามอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นพร้อมกับค่าคงที่ทางเวลายลดลง เนื่องจากมีความเฉื่อยลดลง และสุดท้ายทำการคงค่าระยะห่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์พร้อมกับคงค่าแรงดันอินพุตดังรูป 4.21 เมื่อทำการเพิ่มความสูงพบว่าความเร็วของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นและค่าคงที่ทางเวลาเพิ่มขึ้นเช่นกันเพราะมีค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้น

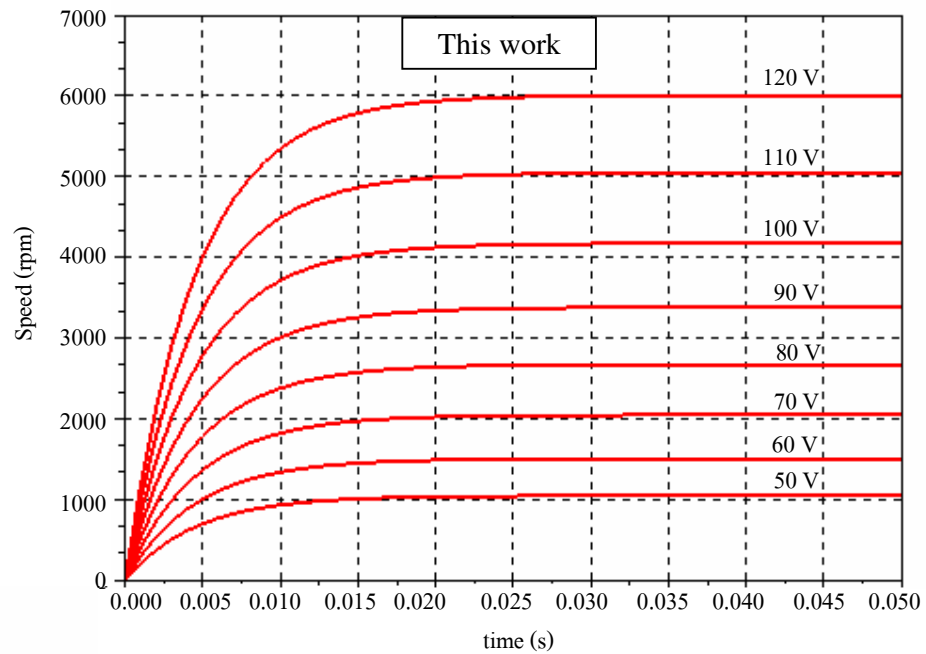
ต่อไปนี้จะเป็นอย่างแสดงเปรียบเทียบข้อแตกต่างของการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัยกับกระบวนการสร้างลวดลายบนฐานรอง (Surface micromachining) โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยวัสดุพอลิซิลิคอนที่มีความหนาในระดับต่ำ โดยนักวิจัย Emdemmano (2003) ซึ่งมีพารามิเตอร์ขนาดคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้คือมีจำนวนขั้วของโรเตอร์กับสเตเตอร์เท่ากับ 8 ต่อ 12 โดยมีโครงสร้างเป็นดังตารางที่ 4.2 มีขนาดของพารามิเตอร์บางตัว ดังนี้  $J$  เท่ากับ  $2.6 \times 10^{-19} \text{ kg-m}^2$   $B$  เท่ากับ  $2.8 \times 10^{-12} \text{ N-m-s}$   $C_1$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-12} \text{ N-m}$  และ  $C_2$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-15} \text{ N-m/V}^2$  ทำการทดสอบป้อนแรงดันตั้งแต่ 50 V ถึง 120 V พบว่าผลการตอบสนองของมอเตอร์จุลภาคดังกล่าวมีความเร็วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวด้วยระยะเวลาเท่ากับ  $0.4643 \mu\text{s}$  มีความเร็วที่แรงดัน 120 V เท่ากับ 120 rpm และผลการตอบสนองดังรูปที่ 4.22 พร้อมทั้งสามารถแสดงผลการตอบสนองของระบบต่ออินพุตของ Emdemmano และงานวิจัยได้ดังรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.2.1 ขนาดพารามิเตอร์มอเตอร์จุลภาคของ Emdemmano และงานวิจัย

สัญลักษณ์	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	h
ขนาด	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )				( $\mu\text{m}$ )
Emdemmano	40	50	60	61	$18^\circ$	$12^\circ$	$27^\circ$	$18^\circ$	-
This work	70	250	443	468	$18^\circ$	$12^\circ$	$27^\circ$	$18^\circ$	300

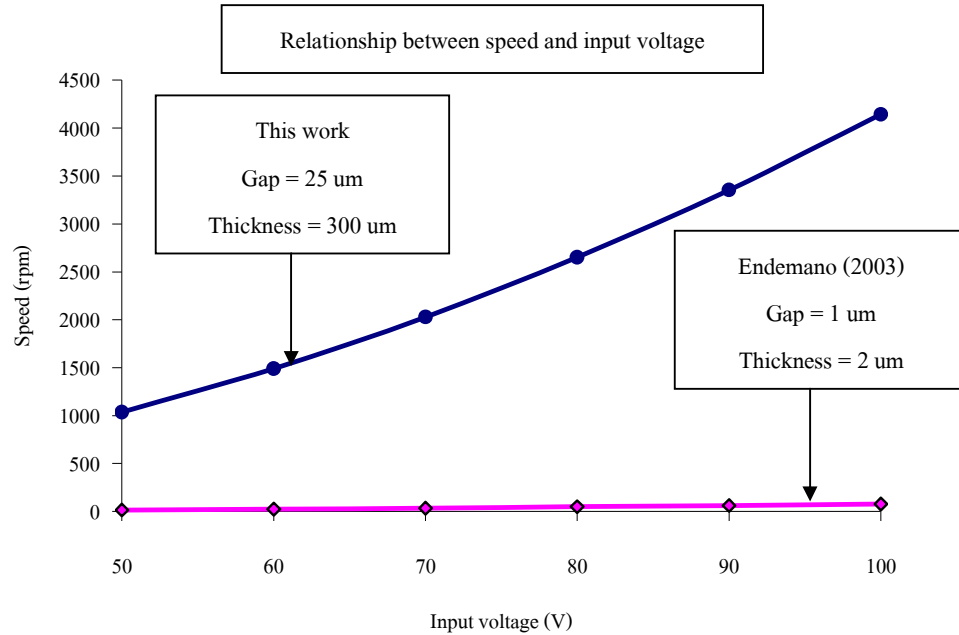


(ก) ผลการตอบสนองความเร็วต่อแรงดันอินพุต 50 V ถึง 120 V ของ Emdemmano



(ข) ผลการตอบสนองความเร็วต่อแรงดันอินพุต 50 V ถึง 120 V ในงานวิจัย

รูปที่ 4.22 การตอบสนองของมอเตอร์จตุภาคต่อแรงดันอินพุตของ Emdemmano และงานวิจัย



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลตอบสนองของความเร็วต่อแรงดันอินพุตของ Endemmano และงานวิจัย

จากผลการเปรียบเทียบการตอบสนองความเร็วต่อแรงดันอินพุตทั้งสองงานวิจัยที่แรงดันอินพุตเท่ากัน พบว่ามอเตอร์จุลภาคที่สร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มีความเร็วสูงกว่าการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างโครงสร้างที่มีความสูงมากกว่า ทำให้มีแรงบิดสูงและมอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วตามแรงบิด

#### 4.6 สรุป

บทที่ 4 เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์จุลภาค ได้แก่ การหาค่าความจุไฟฟ้า แรงบิด และระบบพลวัตโดยใช้การแก้ปัญหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข การคำนวณด้วยวิธีการคำนวณเชิงวิเคราะห์ และการแก้ปัญหาด้วย SCICOS เพื่อศึกษาพฤติกรรมของมอเตอร์ เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างมอเตอร์ ในบทต่อไปจะเป็นกระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาค การพัฒนารวมถึงปัญหาและการแก้ไขปัญหา

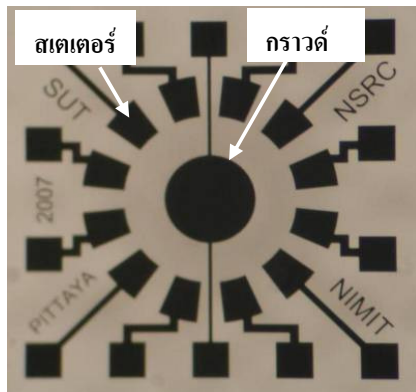
## บทที่ 5

### กระบวนการพัฒนามอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

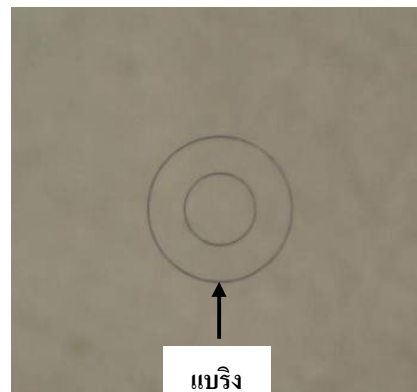
หลังจากได้ศึกษากระบวนการพื้นฐานจากบทที่ 3 และในบทที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบมอเตอร์จูลภาคพร้อมกันได้ทำการจำลองระบบพลวัต ในบทนี้จะนำเสนอการผลิต การพัฒนา และการแก้ปัญหาระหว่างการสร้างมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจูลภาค โดยใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ รวมถึงกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบกลไฟฟ้าจูลภาค การสร้างมอเตอร์จูลภาคในงานวิจัยนี้ มีวิธีการสร้างและการพัฒนาถึง 3 วิธีหรือ 3 รูปแบบหลักเพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการที่สามารถสร้างให้มอเตอร์จูลภาคเกิดการเคลื่อนที่ได้เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ *วิธีที่ 1* การสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ *วิธีที่ 2* การสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน และ *วิธีที่ 3* เป็นการสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

#### 5.1 การสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

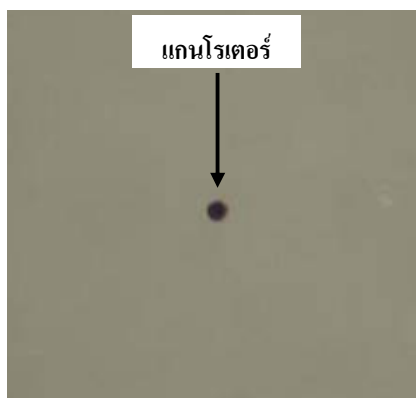
เป็นการออกแบบกระบวนการสร้างมอเตอร์โดยที่โรเตอร์กับสเตเตอร์เกิดขึ้นพร้อมกันด้วยการฉายรังสีเอ็กซ์เพียงครั้งเดียว จากนั้นทำการเติมโลหะลงไปในช่วงว่างเพื่อขึ้นรูป เป็นการประหยัดเวลาในการสร้างลดทลายด้วยรังสีเอ็กซ์วิธีนี้พบข้อเสียคือ ยุ่งยากตอนทำการจัดแนวฉายแสงอัลตราไวโอเลตหรือเรียกว่า Alignment เพื่อสร้างชั้นต่าง ๆ หลายครั้งทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปทรง และการสกัดสารไวแสงหลังจากขึ้นรูปที่ยาวนาน หลังทำการออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ จนเสร็จสมบูรณ์และส่งลดทลายดังกล่าวสร้างฟิล์มทึบแสง เพื่อเป็นหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลต จนได้หน้ากาก ดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตจำนวน 5 ลดทลาย ได้แก่ *หน้ากากที่ 1* คือ ลดทลายสำหรับสร้างกราวด์และสเตเตอร์ชั้นล่าง *หน้ากากที่ 2* คือ ลดทลายสำหรับสร้างแบริงสำหรับรองรับน้ำหนักโรเตอร์ *หน้ากากที่ 3* คือ ลดทลายสำหรับสร้างแกน โรเตอร์ชั้นล่าง *หน้ากากที่ 4* คือ ลดทลายสำหรับสร้างวัสดุชั่วคราว เพื่อทำหน้าที่แยกโรเตอร์ออกจากส่วน และ *หน้ากากที่ 5* สำหรับสร้างโรเตอร์ แกนโรเตอร์และสเตเตอร์เพื่อใช้สร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์



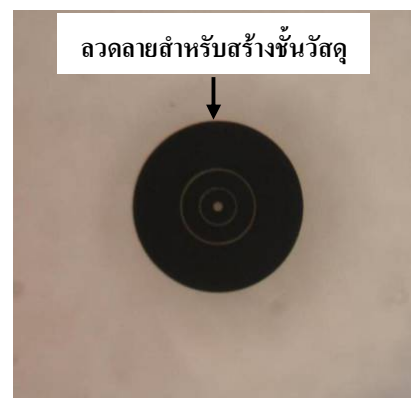
(ก) กราวด์และสเตเตอร์ชั้นล่าง



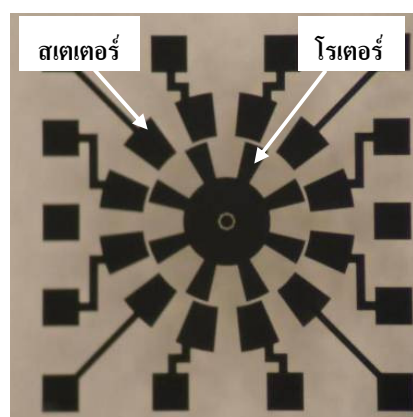
(ข) แบร์ริง



(ค) แกนโรเตอร์ชั้นล่าง



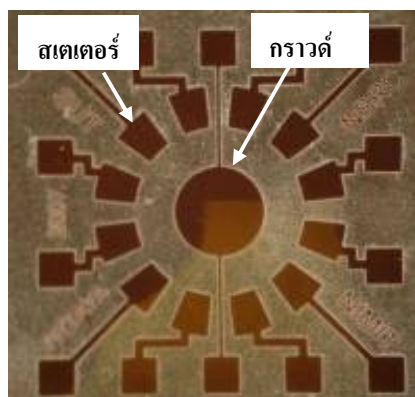
(ง) สำหรับสร้างวัสดุชั่วคราว



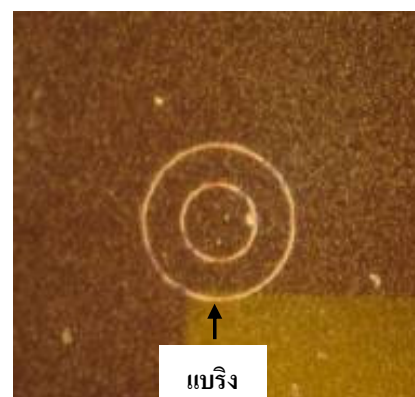
(จ) สำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 5.1 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

เนื่องจากหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตที่ได้จากการออกแบบและสังสร้าง เป็นหน้ากากชนิดบวก (Positive mask) แต่ในบางกระบวนการสร้างจะต้องใช้หน้ากากแบบลบ (Negative mask) หรือตรงข้ามกับที่ได้ออกแบบด้วย จึงต้องทำการกลับหน้ากากที่ได้มาก่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เป็นการถ่ายทอดลวดลายจากหน้ากากที่เป็นแบบบวกลงสู่กระจกเพื่อกลับลวดลายให้ตรงกันข้าม โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตกับกระบวนการชุบนิเกิล ซึ่งใช้สารไวแสงแบบบวก (AZ1512) รายละเอียดได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เมื่อสร้างหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเลตที่ทำการกลับลวดลายจนครบแล้ว จากนั้นนำหน้ากากที่ 5 ซึ่งเป็นหน้ากากสำหรับสร้างโรเตอร์ แกนโรเตอร์และสเตเตอร์ มาสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์โดยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ใช้เงินเป็นวัสดุชุบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 มีฐานรองที่เป็นแผ่นพอลิอิมิด์



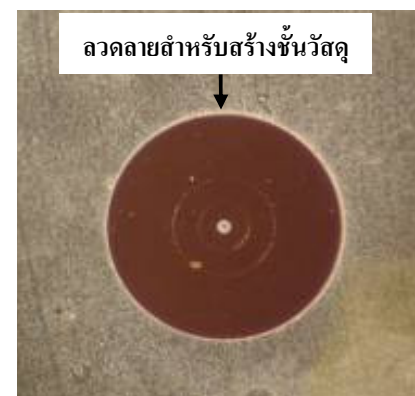
(ก) กราวด์และสเตเตอร์ชั้นล่าง



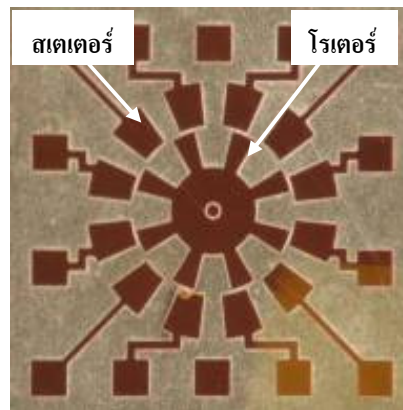
(ข) แบร์ริง



(ค) แกนโรเตอร์

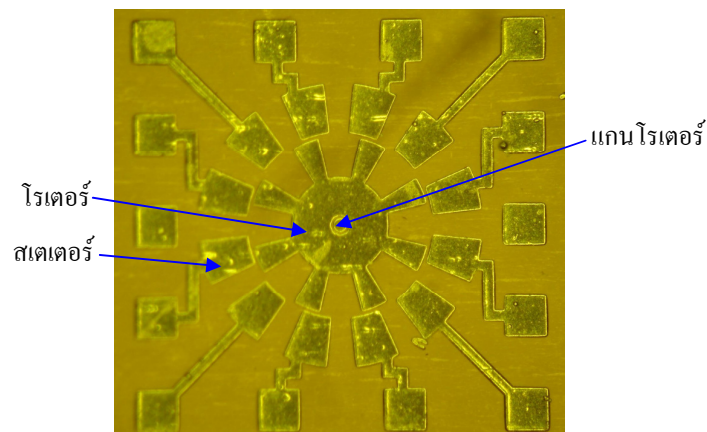


(ง) สำหรับสร้างชั้นวัสดุชั่วคราว



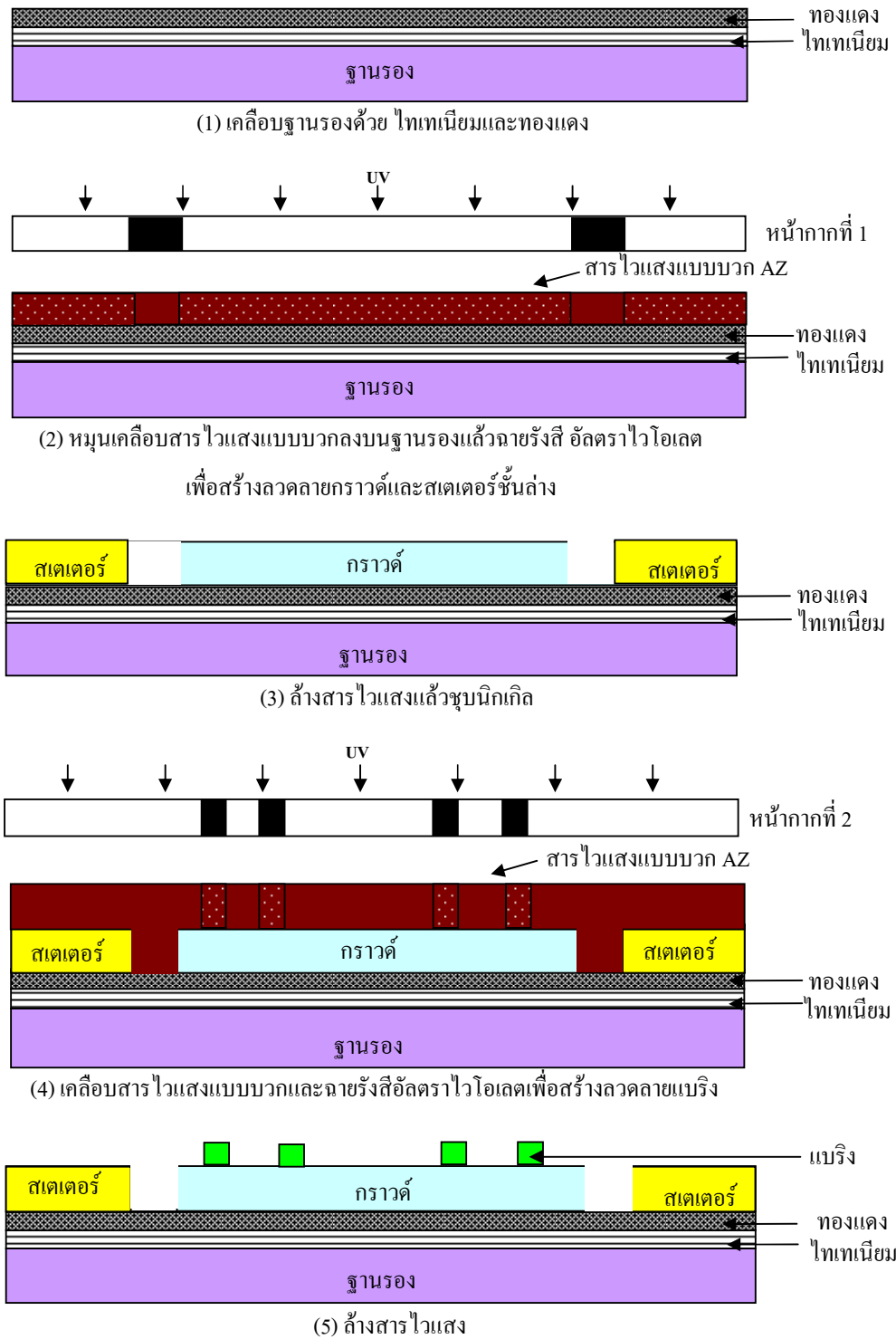
(จ) สำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 5.2 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ  
ที่ผ่านการกลับลวดลาย



รูปที่ 5.3 หน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ

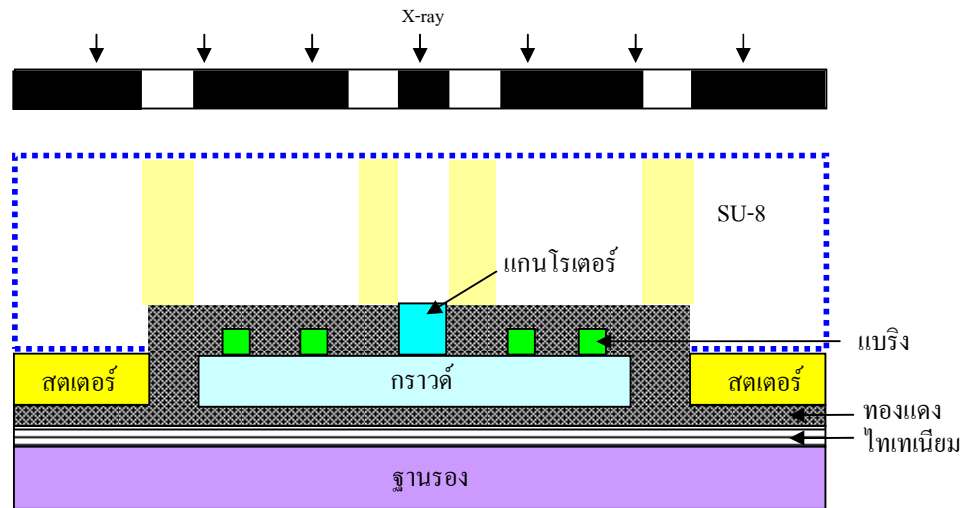
เมื่อสร้างหน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตและหน้ากากกันรังสีเอ็กซ์สำหรับกระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะจนเสร็จสิ้นแล้ว ต่อมาจะนำเสนอวิธีการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะซึ่งกระบวนการสร้างดังกล่าวมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตสำหรับสร้างชั้นกราวด์ สเตเตอร์ฐานล่าง แบริงฐานล่าง โครงสร้างสำหรับสร้างวัสดุชั่วคราว และโรเตอร์ฐานล่าง ส่วนที่สองเป็นการสร้างโรเตอร์ แกนโรเตอร์และสเตเตอร์ จะใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



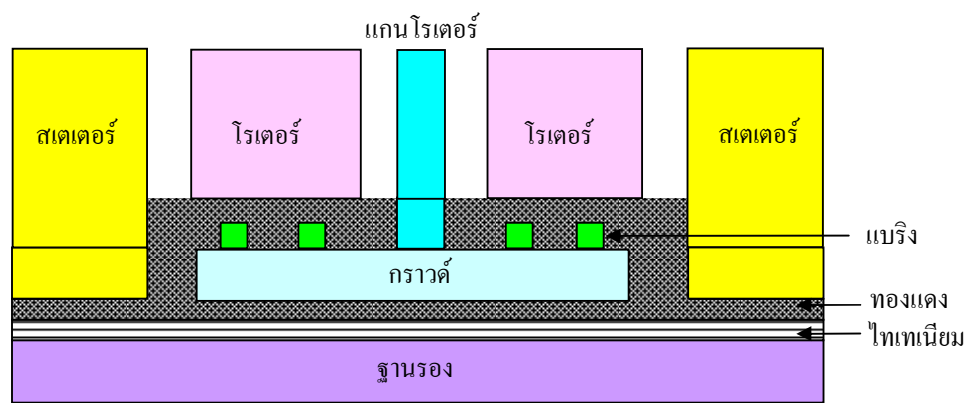
รูปที่ 5.4 กระบวนการสร้างมอดูลจลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ



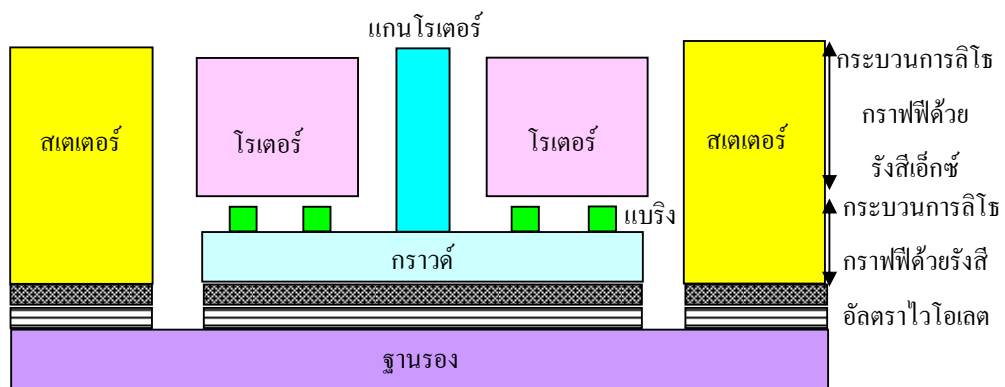




(10) หล่อสารไวแสงแบบลบแล้วฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างลวดลายโรเตอร์และสแตเตอร์ชั้นล่าง



(11) ล้างสารไวแสงและหูนิกเกิล



(12) สกัดทองแดงและไทเทเนียม

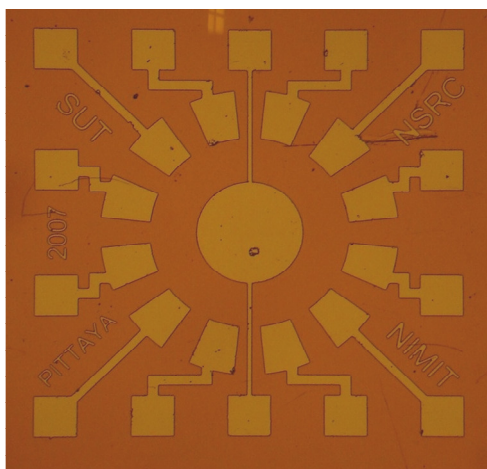
รูปที่ 5.4 กระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ (ต่อ)

จากกระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างโลหะในรูปที่ 5.4 สามารถอธิบายกระบวนการโดยละเอียดได้ดังนี้

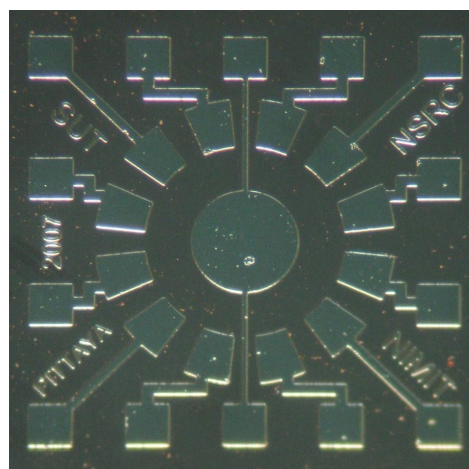
1. ทำความสะอาดฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) โดยแช่ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ด้วยลำที แล้วฉีดด้วยอะซิโตนและฉีดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง จากนั้นล้างน้ำปอดไอออน แล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ต่อมาเคลือบด้วยไทเทเนียม (Ti) และทองแดง (Cu) ตามลำดับ โดยใช้เครื่องเคลือบแบบระเหยไอในสุญญากาศได้ความหนาประมาณ  $300 \text{ \AA}$  และ  $500 \text{ \AA}$  ตามลำดับ

2. หมุนเคลือบสารไวแสงแบบบวก AZ1512 ลงบนแผ่นฐานรองที่เคลือบโลหะแล้วด้วยความเร็ว  $500 \text{ rpm}$  เป็นเวลา 5 วินาที และ  $1500 \text{ rpm}$  เป็นเวลา 30 วินาที ได้ความหนา  $10 \text{ \mu m}$  จากนั้นอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 นาที บนแผ่นความร้อน และฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่ 1 เพื่อสร้างลวดลายของกราวด์และสเตเตอร์ชั้นล่าง ที่ความเข้มแสง  $22.2 \text{ mW/cm}^2$  เป็นเวลา 3 วินาที ได้ค่าพลังงานเท่ากับ  $66.6 \text{ mJ/cm}^2$  ล้างสารไวแสงด้วย  $\text{KOH} : \text{H}_3\text{BO}_3 : \text{H}_2\text{O}$  อัตราส่วน  $4 \text{ g} : 1 \text{ g} : 200 \text{ ml}$  เป็นเวลา 45 วินาที แล้วสกัดไทเทเนียมชั้นบนด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 5% จะพบทองแดงที่อยู่ด้านล่างแล้วทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

3. ชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ที่ความเข้มกระแส  $10 \text{ mA/cm}^2$  ประมาณ 5 นาที แล้วขัดเรียบให้เรียบให้ได้ความหนาประมาณ  $5 \text{ \mu m}$  จากนั้นสกัดสารไวแสงทิ้งด้วยอะซิโตน ดังรูปที่ 5.5



(ก) ก่อนชุบนิกเกิล

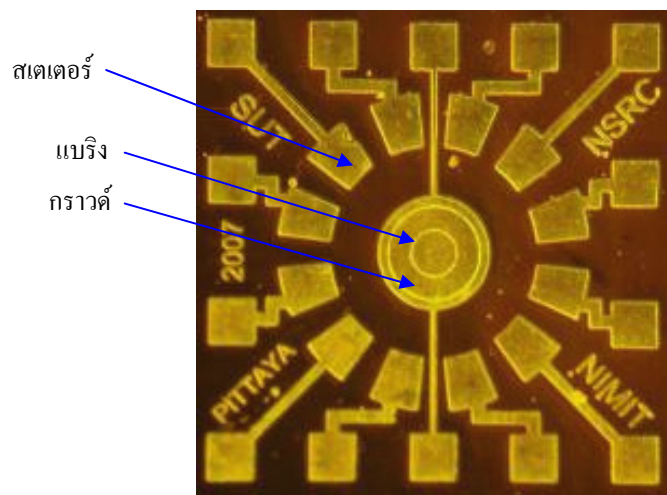


(ข) หลังชุบนิกเกิล

รูปที่ 5.5 ลวดลายของชั้นกราวด์ของมอเตอร์จุลภาคโครงสร้างโลหะ

4. หมุนเคลือบ AZ1512 ลงทับบนชิ้นงานที่มีลวดลายกราวด์และสเตเตอร์ชั้นล่างที่เป็นโลหะ निकเกิดอยู่แล้ว ด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ ได้ความหนาประมาณ 10  $\mu\text{m}$  อบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5 นาที บนแผ่นความร้อน ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่ 2 เพื่อสร้างแบริงที่ความเข้มแสงเท่ากับ 22.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 3 วินาที ได้พลังงานเท่ากับ 66.6  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  ล้างสารไวแสงออกด้วย KOH :  $\text{H}_3\text{BO}_3$  :  $\text{H}_2\text{O}$  อัตราส่วน 4 g : 1 g : 200 ml เป็นเวลา 45 วินาที จะพบลวดลายแบริงเกิดขึ้น

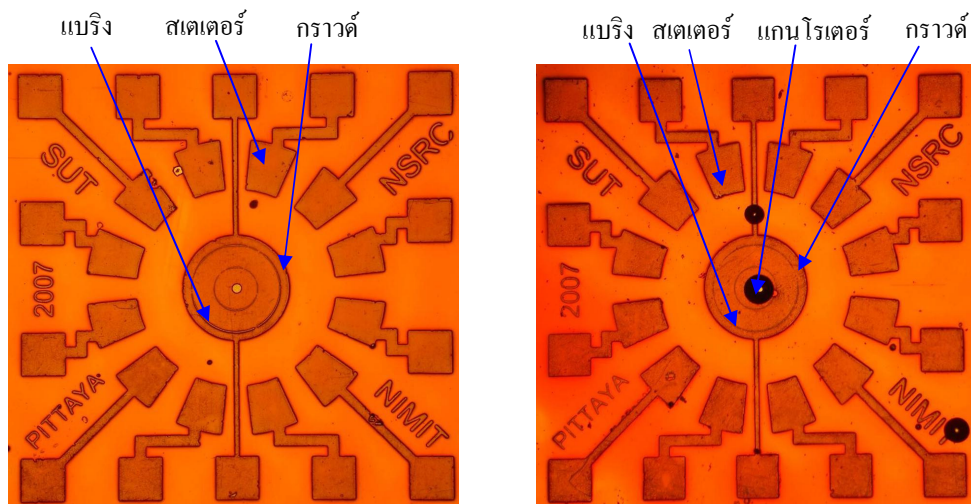
5. ทำการชุบโลหะ निकเกิดด้วยไฟฟ้าที่ความเข้มกระแส 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  ประมาณ 5 นาที จากนั้นขัดผิวให้เรียบให้ได้ความหนาประมาณ 2  $\mu\text{m}$  แล้วล้างสารไวแสงออกด้วยอะซิโตน เป่าแห้ง ด้วยแก๊สไนโตรเจน ได้ผลดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แบริงหลังชุบ निकเกิดของมอเตอร์จตุภาค โครงสร้างโลหะ

6. หมุนเคลือบ AZ1512 ลงบนชิ้นงานด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ ได้ความหนาประมาณ 10  $\mu\text{m}$  อบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 5 นาที บนแผ่นความร้อนแล้วฉายแสงผ่านหน้ากากที่ 3 ที่ความเข้มแสง 22.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 3 วินาที ที่ค่าพลังงานเท่ากับ 66.6  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  เพื่อสร้างแกน โรเตอร์หรือแกนกลาง ล้างสารไวแสงด้วยสารละลาย KOH :  $\text{H}_3\text{BO}_3$  :  $\text{H}_2\text{O}$  ในอัตราส่วน 4 g : 1 g : 200 ml เป็นเวลา 45 วินาที แล้วเป่าให้แห้ง

7. ชุบโลหะ निकเกิดเพื่อขึ้นรูปด้วยความเข้มกระแส 5  $\text{mA}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 5 นาที ขัดผิวเรียบ ให้ได้ความหนาประมาณ 5  $\mu\text{m}$  แล้วล้างสารไวแสงออกด้วยอะซิโตนและเป่าแห้ง ได้ผลดังรูปที่ 5.7

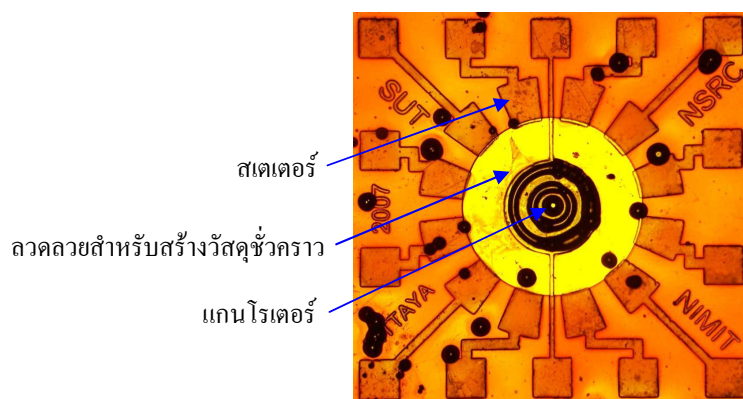


(ก) หลังการฉายแสง

(ข) หลังการชุบนิเกิล

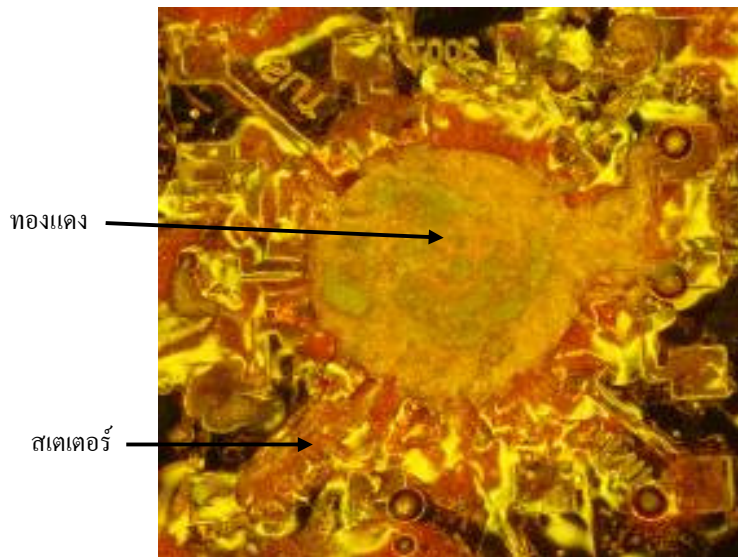
รูปที่ 5.7 แกนโรเตอร์หลังการฉายแสงและการชุบนิเกิลของมอเตอร์จุลภาคโครงสร้างโลหะ

8. เคลือบสารไวแสงแบบบวก AZ1512 บนชิ้นงานด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ ได้ความหนาประมาณ  $10 \mu\text{m}$  อบที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 นาที บนแผ่นความร้อน ฉายรังสีผ่านหน้ากากที่ 4 เพื่อสร้างลวดลายสำหรับชุบทองแดง สำหรับเป็นวัสดุชั้นชั่วคราวเพื่อแยกโรเตอร์ออกจากส่วนอื่น ที่ค่าพลังงาน  $72 \text{ mW}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 3 วินาที ได้พลังงาน  $216 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  ล้างสารไวแสงด้วย สารละลาย  $\text{KOH} : \text{H}_3\text{BO}_3 : \text{H}_2\text{O}$  อัตราส่วน  $4 \text{ g} : 1 \text{ g} : 200 \text{ ml}$  เป็นเวลา 45 วินาที ได้ผลดังรูป 5.8



รูปที่ 5.8 ลวดลายหลังฉายแสงสำหรับสร้างวัสดุชั่วคราวของโครงสร้างโลหะ

9. ชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าด้วยความเข้มข้นกระแส 10 mA/cm<sup>2</sup> ประมาณ 25 นาที จนล้นจากนั้น  
ขัดผิวหน้าให้เรียบแล้วล้างสารไวแสงออก ได้ผลดังรูปที่ 5.9

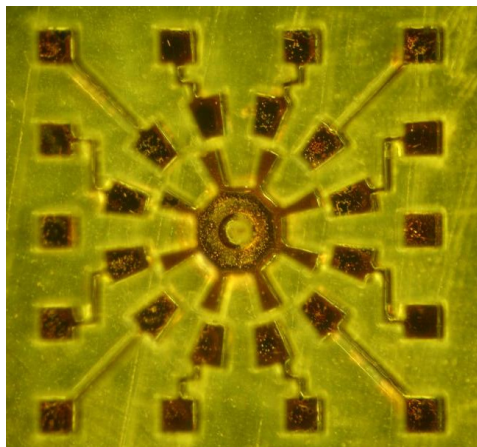


รูปที่ 5.9 ลวดลายหลังชุบทองแดงเป็นวัสดุชั่วคราวของโครงสร้างโลหะ

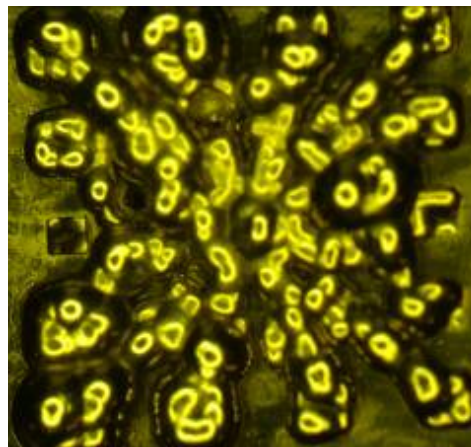
10. จากกระบวนการที่ผ่านมาพบแล้วว่ามีโครงสร้างหลายส่วนผิติดเพี้ยนจากกระบวนการ  
ฉายแสงกระบวนการชุบ และทำความสะอาด ทำให้น้ำขึ้นงานดังกล่าวมาพัฒนาต่อไปไม่ได้ แต่เพื่อ  
เรียนรู้ทักษะการใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์จึงทำการหล่อสารไวแสงแบบลบ SU-8  
ลงบนกระจกที่เคลือบด้วย ไทเทเนียม ทองแดง และไทเทเนียม รวมจำนวน 3 ชั้น ตามลำดับ แล้วขัด  
เรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากเงิน (หน้ากากที่5) ด้วย  
พลังงาน 5130 Dose ที่กระแส 143 mA เป็นเวลา 4 นาที 26 วินาที เพื่อทดสอบการสร้างโรเตอร์  
สเตเตอร์และแกนกลางแล้วอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน

11. ล้างสารไวแสงออกด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที แล้วสกัดไทเทเนียมด้วย HF  
ความเข้มข้น 5% จากนั้นชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แล้วทำการขัด  
เรียบและสุดท้ายทำการสกัดสารไวแสงออกด้วยน้ำยา PG remover ที่ความร้อน 60°C ได้ผลดังรูปที่  
5.10

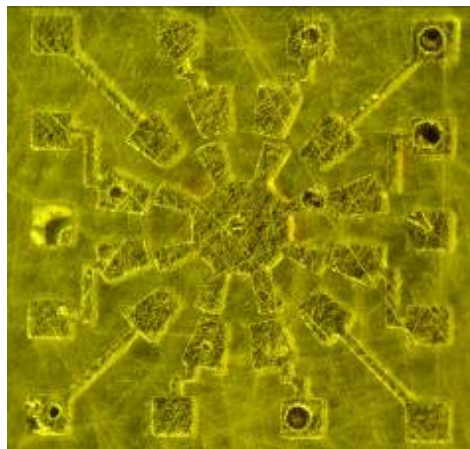




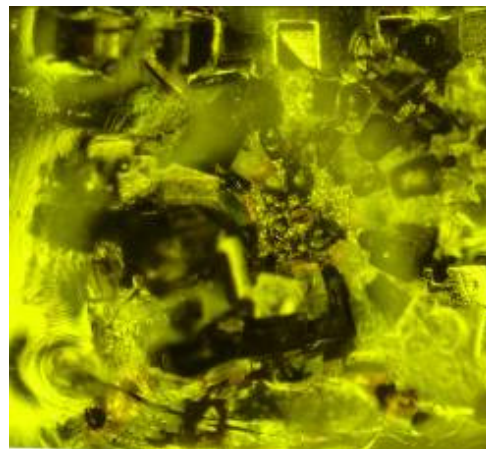
(ก) หลังฉายแสงและล้างสารไวแสง



(ข) หลังชุบนิกเกิลจนล้น



(ค) หลังขัดนิกเกิล



(ง) หลังสกัดสารไวแสงด้วย PG Remover

### รูปที่ 5.10 โครงสร้างของมอเตอร์หลังฉายแสงและชุบนิกเกิล

12. กระบวนการต่อไปคือทำสัปดาห์เทเนียมและทองแดงออกจากชิ้นงานเพื่อให้ได้โครงสร้างมอเตอร์ โดยที่โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งยึดเกาะกับด้านล่างหรือด้านข้างได้ แต่เนื่องจากชิ้นงานได้ชำรุดไประหว่างกระบวนการสร้าง ดังนั้นกระบวนการที่ได้กล่าวมานี้จึงไม่สามารถสร้างมอเตอร์เป็นตามที่คาดการณ์เอาไว้ได้จึงหยุดการดำเนินงาน

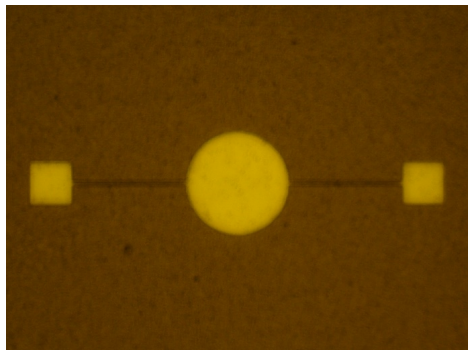
หลังจากสิ้นสุดกระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การเตรียมสารไวแสง การฉายแสง การล้างสารไวแสง การสกัดโลหะ การชุบนิกเกิล และขัดเรียบ จนถึงกระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อทำการสกัดสารไวแสงด้วย

สารละลายทางเคมีบริเวณที่ไม่ต้องการออก ทำให้ निकิลบางส่วนของมอเตอร์จูลภาคหลุดออกจากฐานรองพร้อมกับสารไวแสงเนื่องด้วยการยึดเกาะที่ไม่ดีของโลหะ निकิลกับฐานรองและยังเป็นการสกัดในรูปแบบที่ไม่เหมาะกับงาน ซึ่งต้องทำการแก้ไขในจุดบกพร่องดังกล่าว จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการที่พัฒนามอเตอร์จูลภาคด้วยวิธีนี้บางกระบวนการยังไม่เหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงาน เนื่องด้วยเหตุผลหลายประการ ได้แก่ จำนวนการจัดแนวฉายแสงมากเกินไปทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของลวดลายจากชั้นล่างสู่ชั้นบน การชุบโลหะหลังจากกระบวนการลิโธกราฟีใช้เวลานาน จึงต้องหาแนวทางการพัฒนาขั้นต่อไป

## 5.2 การสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

หลังจากประสบปัญหาเกี่ยวกับการสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างโลหะ โดยต้องการสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์เพื่อให้โครงสร้างทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมกัน มีความยุ่งยากของการจัดแนวเพื่อฉายแสง อีกทั้งปัญหาของการชุบโลหะ निकิลระหว่างชั้นบนกับชั้นล่างไม่ดีพอ ทำให้ต้องเปลี่ยนแนวทางการสร้างซึ่งวิธีใหม่เป็นการออกแบบและสร้างมอเตอร์ด้วยการขึ้นรูปโครงสร้างด้วย निकิลเช่นเดิม แต่แนวทางของการสร้างคือ ต้องการสร้างสเตเตอร์กับโรเตอร์แยกส่วนกันโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถสร้างโรเตอร์ได้ครั้งละหลายตัว แต่ยังพบข้อเสียคือการสกัดสารไวแสงส่วนที่ไม่ต้องการใช้เวลายาวนานเช่นเดียวกับวิธีที่ผ่านมา ในกระบวนการสร้างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ โครงสร้างและขนาดของพารามิเตอร์สเตเตอร์ยังคงเหมือนเดิม แต่เพิ่มจำนวนโรเตอร์ให้มีหลายตัวและหลายขนาดลดหลั่นกันลงไป เพื่อสร้างเป็นตัวทดแทนเมื่อเกิดการสูญเสียต่อเนื่องจากเป็นส่วนที่สร้างง่ายที่สุดและเกิดการสูญหายง่ายที่สุดเช่นกัน เพราะมีขนาดเล็กและไม่ยึดเกาะกับส่วนอื่นใดของมอเตอร์ กระบวนการสร้างมอเตอร์จูลภาคในขั้นตอนนี้มีจำนวนโครงสร้างลดลง โดยส่วนของแบริงจะหายไปประมาณได้ว่าความหนาแน่นอย่างมาก (ส่วนที่ลอยอยู่เหนือแผ่นกราวด์) ทำให้เหลือโครงสร้างเพียง 4 ส่วนคือ โรเตอร์ สเตเตอร์ แกนโรเตอร์ และกราวด์ และมีหน้าากกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ต 1 หน้าาก สำหรับสร้างกราวด์ ส่วนหน้าากสำหรับสร้างสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์จะใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มี 2 หน้าาก แบ่งออกเป็นหน้าากสำหรับสร้างโรเตอร์ และหน้าากสำหรับสร้างสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์ดังรูปที่ 5.11

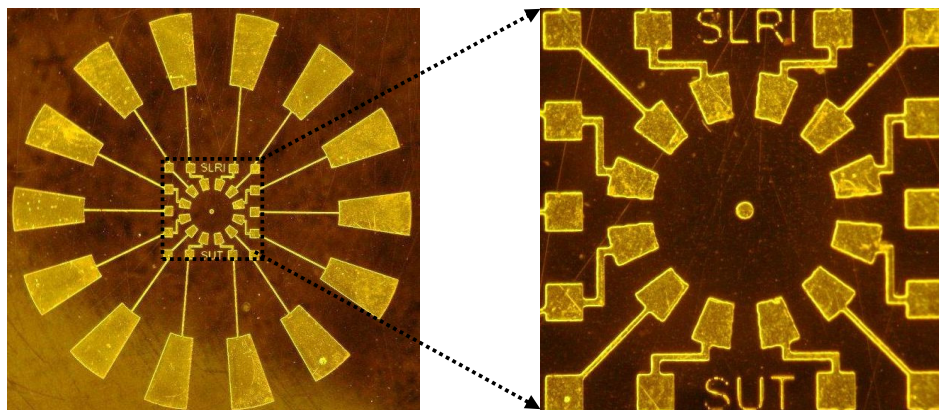




(ก) หน้ากากสำหรับสร้างกราวด์



(ข) หน้ากากสำหรับสร้างโรเตอร์

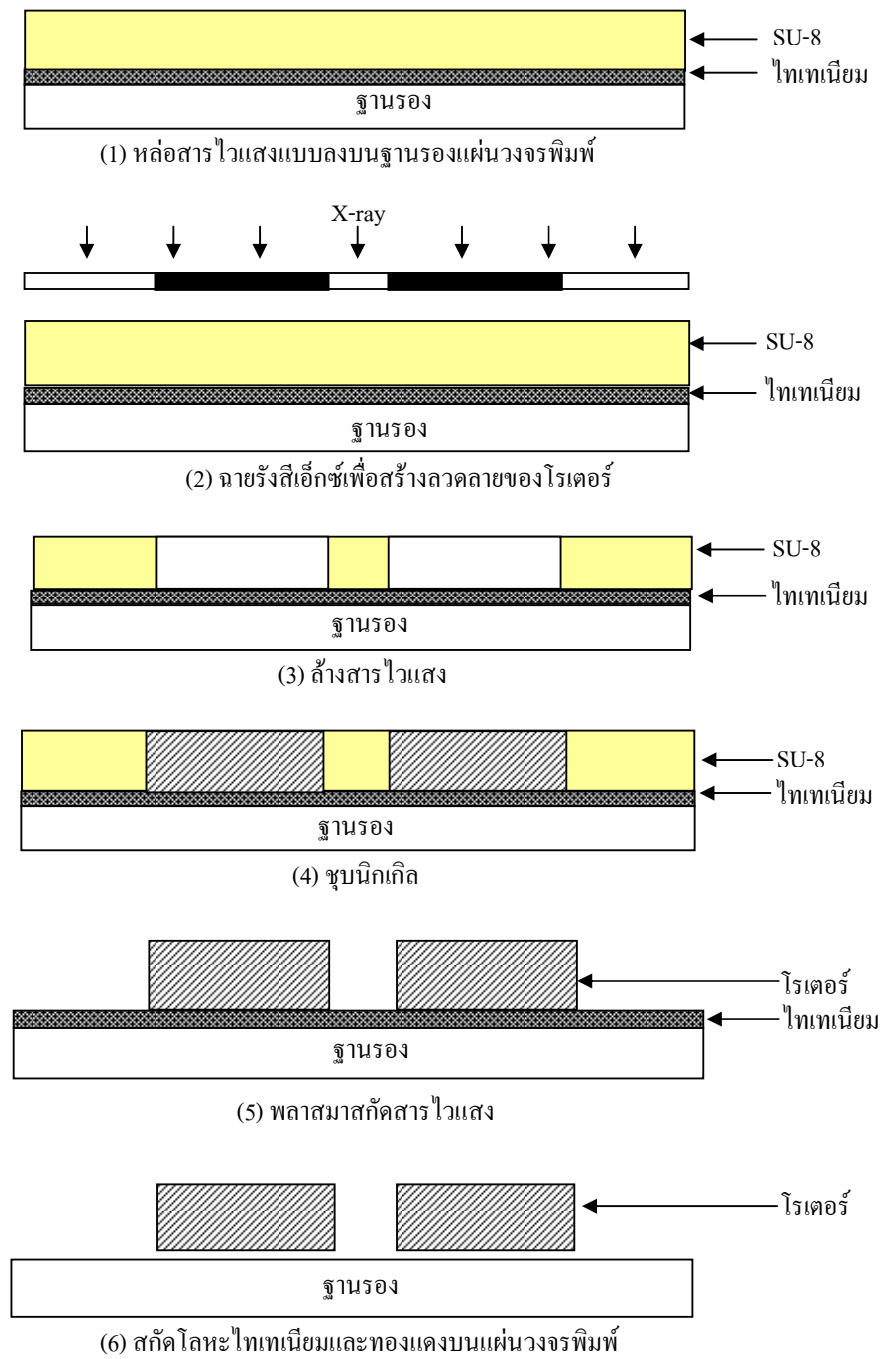


(ค) หน้ากากสำหรับสร้างสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์

รูปที่ 5.11 หน้ากากกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างมอเตอร์จุลภาค  
ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

### 5.2.1 การสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

การสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วนจะใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ในการสร้างลวดลาย ซึ่งมีวิธีการที่ซับซ้อนน้อยกว่าการสร้างสเตเตอร์มาก เนื่องจากไม่มีการจัดแนวฉายแสง จากนั้นทำการเติมโลหะลงไปบริเวณที่เป็นช่องว่าง แล้วสกัดสารไวแสงและสุดท้ายสกัดโลหะที่อยู่บนฐานรองและที่อยู่ด้านล่างของโรเตอร์ออก จะได้โรเตอร์โครงสร้างเป็นโลหะ สามารถแสดงกระบวนการสร้างได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กระบวนการสร้างโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

กระบวนการสร้างมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิตด้วยโครงสร้างแบบแยกส่วน มีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้

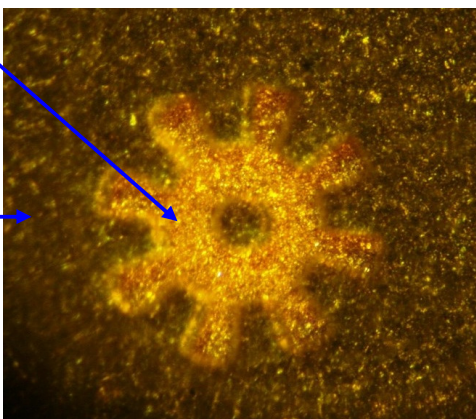
1. ทำความสะอาดฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้ทำการพันทรายบนผิวหน้า ด้วยการทำซูปเปอร์โซนิคในน้ำปอลดไอออน จนกว่าเศษของเม็ดทรายจะหลุดจากผิวแล้วฉีดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ฉีดด้วยอะซิโตนและเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนจากนั้นอบที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วเคลือบด้วยไทเทเนียม (Ti) ด้วยเครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยไอในสุญญากาศเพื่อให้ฐานรองยึดเกาะกับเนื้อสารไวแสงได้ดียิ่งขึ้น

2. หล่อสารไวแสง SU-8 ผงแห้งลงบนฐานรองที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  ที่ห้องสุญญากาศ แล้วขัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ  $300\ \mu\text{m}$  จากนั้นฉายรังสีเอ็กซ์ที่กระแสลำอเล็กตรอนเท่ากับ  $136\ \text{mA}$  ได้พลังงาน  $16229\ \text{Dose}$  (Bottom dose) เป็นเวลา 5 นาที ความดัน  $0.73\ \text{torr}$  แล้วอบที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนจะพบลวดลายของโรเตอร์ขึ้นมา

3. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยา SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที ทำความสะอาดผิวด้วยการพลาสมาของแก๊สออกซิเจนกำลัง RF  $100\ \text{W}$  เป็นเวลา 3 นาที แล้วสกัดไทเทเนียมออกด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 5% และทำความสะอาดด้วยสารละลาย HCl ความเข้มข้น 10% ตามด้วยน้ำปอลดไอออนแล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนดังรูปที่ 5.13

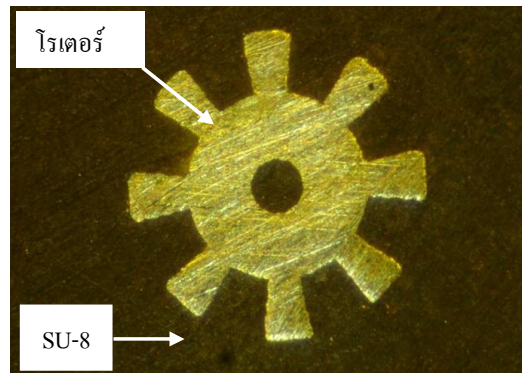
ช่องว่างสำหรับเดมิติกเกิด

SU-8



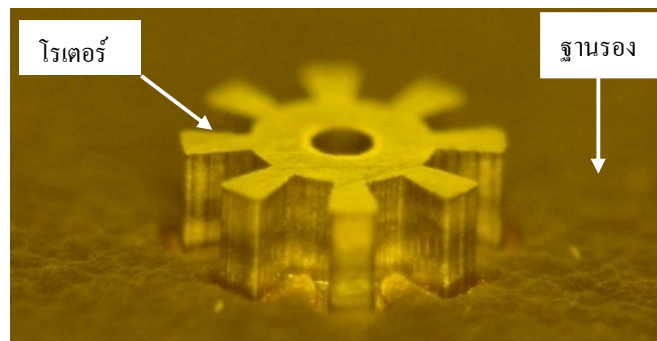
รูปที่ 5.13 หลังฉายรังสีเอ็กซ์และล้างสารไวแสงของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

4. ซุปโลหะนิกเกิลลงในช่องว่างด้วยความเข้มข้นกระแส  $1\ \text{mA}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 20 นาที ที่กระแส  $2\ \text{mA}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และเพิ่มความเข้มข้นกระแสอีกครั้งเป็น  $10\ \text{mA}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 15 ชั่วโมงจนล้น แล้วทำการขัดเรียบได้ความหนาเท่ากับ  $300\ \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 5.14



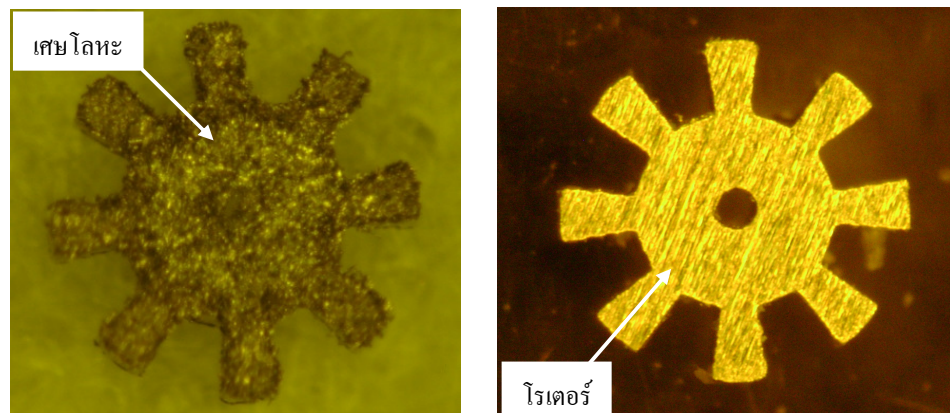
รูปที่ 5.14 หลังชุบโลหะนิกเกิลของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

5. ทำการสกัดสารไวแสงด้านข้างออกด้วยการพลาสมา โดยใช้แก๊สออกซิเจนกับ  $CF_4$  ที่กำลัง RF 200 W เป็นเวลา 50 ชั่วโมง ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 หลังสกัดสารไวแสงออกของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

6. สกัดไทเทเนียมชั้นล่างและทองแดงที่อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ด้านล่างของโรเตอร์ออกจนโครงสร้างโรเตอร์หลุดออกมา พบว่ายังมีเศษของโลหะคลุมผิวหน้าอยู่ จึงต้องทำการหยดสารไวแสง SU-8 บนฐานรองกระจก แล้วนำโรเตอร์ไปยึดบนกระจกดังกล่าว พร้อมกับให้ความร้อนจากนั้นขัดผิวหน้าให้เรียบ และทำยาล้างสารไวแสงในน้ำยา SU-8 developer ได้ผลดังรูปที่ 5.16



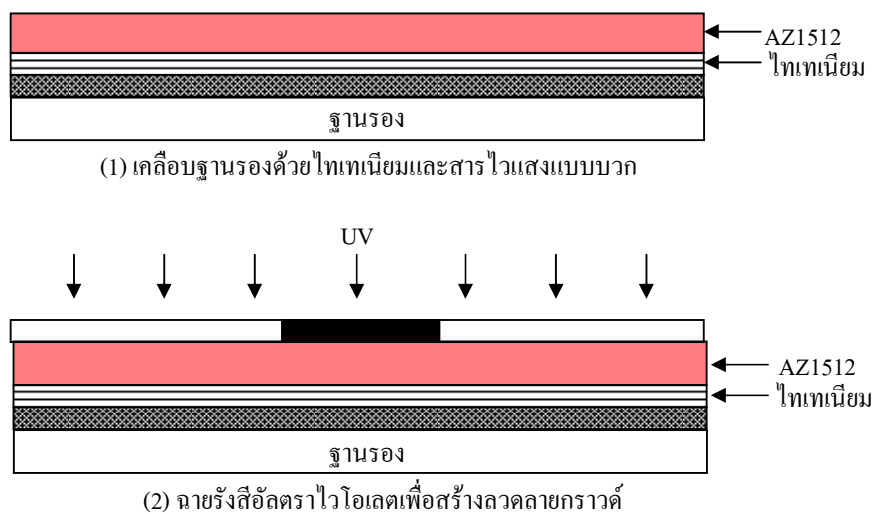
(ก) โรเตอร์ที่ถูกปกคลุมด้วยเศษโลหะ

(ข) หลังขัดเศษโลหะออก

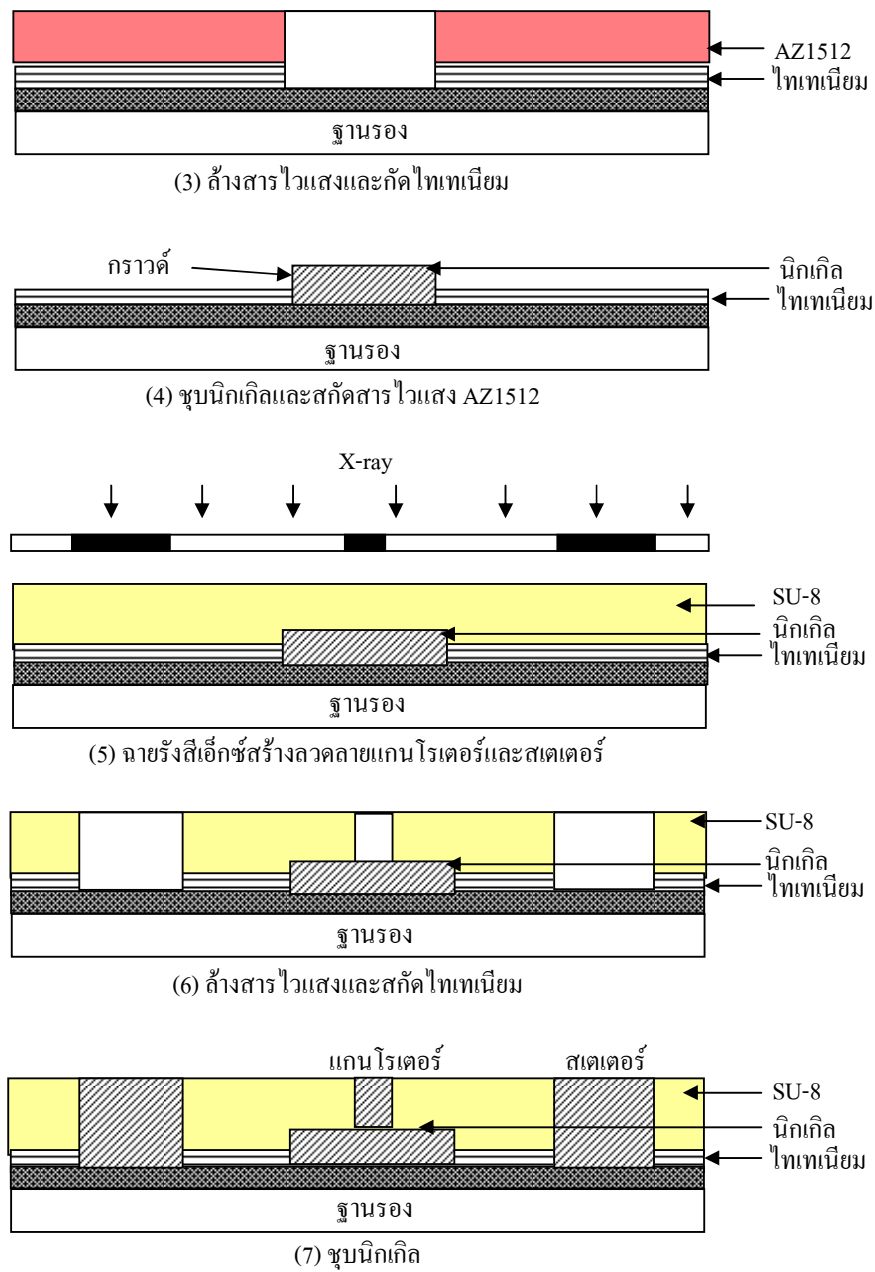
รูปที่ 5.16 หลังสกัดโลหะไทเทเนียมและทองแดงของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

### 5.2.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

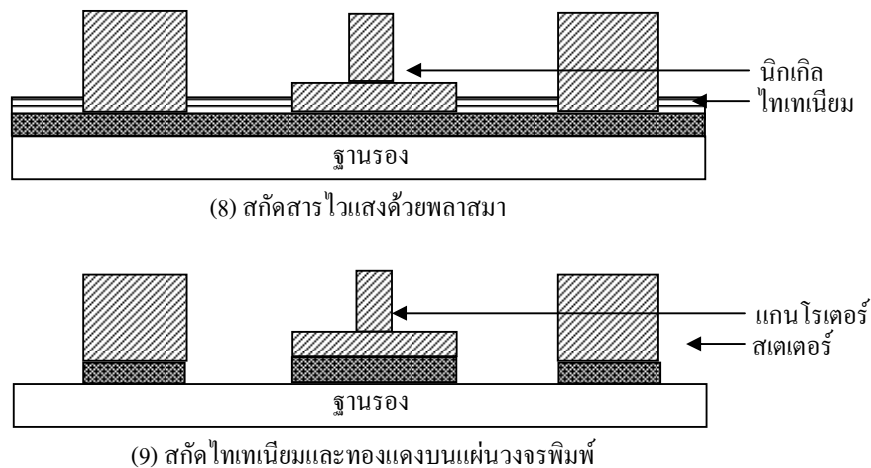
หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะแล้วกระบวนการต่อมาคือการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างโลหะมีขั้นตอนการสร้างดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 กระบวนการสร้างสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน



รูปที่ 5.17 กระบวนการสร้างสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน (ต่อ)

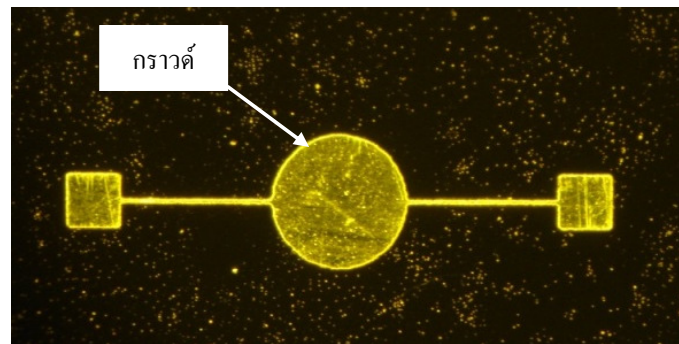


รูปที่ 5.17 กระบวนการสร้างสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน (ต่อ)

กระบวนการสร้างสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างแบบแยกส่วนสามารถอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

1. หมุนเคลือบ AZ1512 ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เคลือบโลหะไทเทเนียม ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 1500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ ได้ความหนา 10  $\mu\text{m}$  อบที่อุณหภูมิ 95°C 3 นาที บนแผ่นความร้อน
2. ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อสร้างกราวด์ ที่ค่าความเข้มแสง 22.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$  เป็นเวลา 3 วินาที ได้พลังงานเท่ากับ 62.6  $\text{mJ}/\text{cm}^2$
3. ล้างสารไวแสงด้วย KOH :  $\text{H}_3\text{BO}_3$  :  $\text{H}_2\text{O}$  อัตราส่วน 4 g : 1 g : 200 ml เป็นเวลา 45 วินาที แล้วสกัดไทเทเนียมชั้นบนออกด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 5% จะพบทองแดงที่อยู่ด้านล่าง แล้วทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
4. ชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความเข้มกระแสเป็น 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  ประมาณ 5 นาที แล้วขัดเรียบให้ได้ความหนาประมาณ 5  $\mu\text{m}$  จากนั้นสกัดสารไวแสงทิ้งด้วยอะซิโตนทิ้งดังรูปที่ 5.18





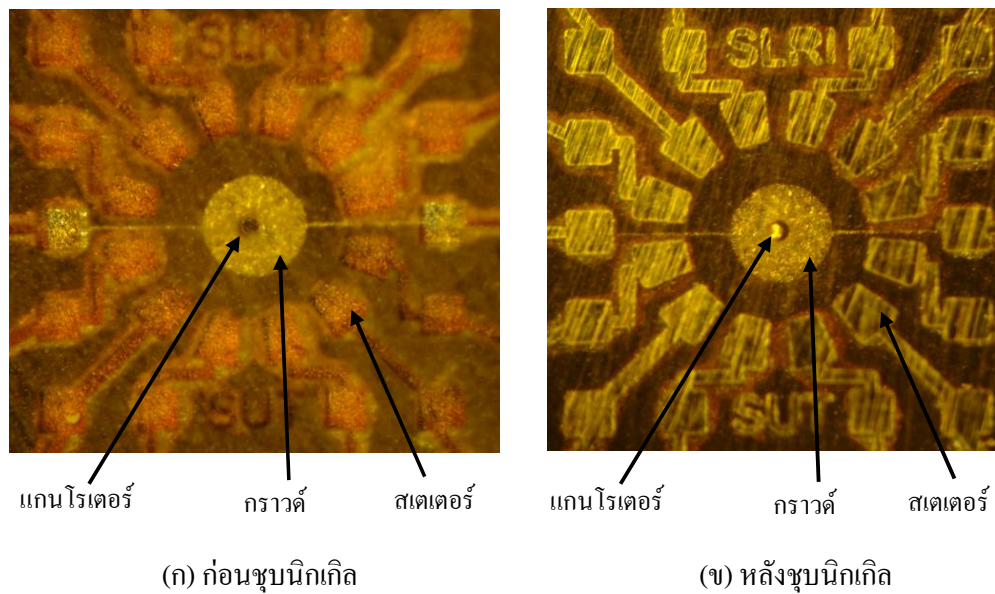
รูปที่ 5.18 กราวด์หลังชุบนิกเกิลของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

5. หล่อสารไวแสง SU-8 ผงแห้ง ลงบนกระจกบนฐานรองที่มีลวดลายของกราวด์อยู่แล้ว จากนั้นขัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 300  $\mu\text{m}$  ฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์ โดยจัดแนวฉายแสงให้ตรงกับลวดลายของกราวด์ด้านล่าง ที่กระแสลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 104.4 mA พลังงานเท่ากับ 13612 Dose (Bottom dose) เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดัน 0.35 torr แล้วอบที่อุณหภูมิ 95°C บนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 15 นาที

6. ล้างสารไวแสงออกด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที แล้วพลาสมาเพื่อทำความสะอาดที่กำลัง RF 100 W เป็นเวลา 3 นาที ด้วยแก๊สออกซิเจน สกัดไทเทเนียมด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 5% และทำความสะอาดด้วย HCl ความเข้มข้น 10% ตามด้วยน้ำป้อนแล้วเป่าแห้ง

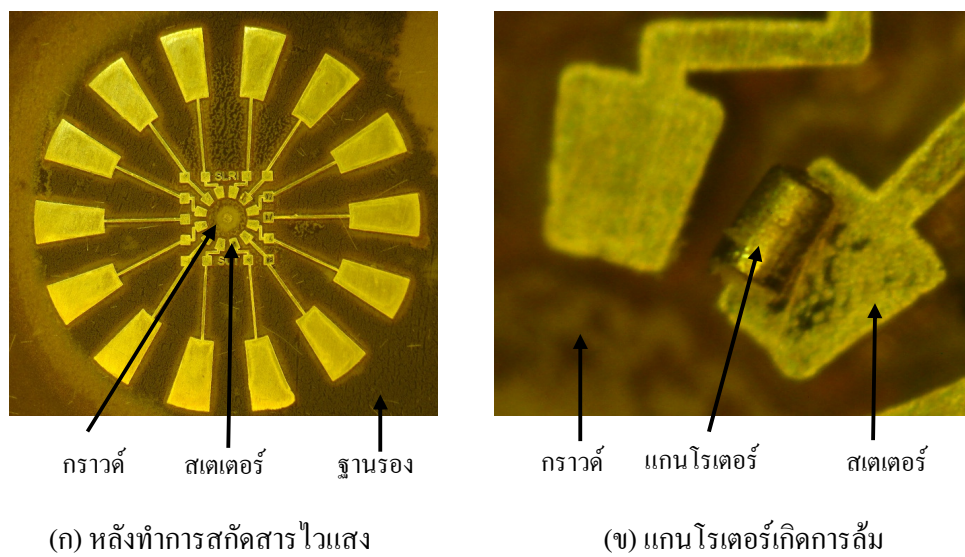
7. ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความเข้มกระแส 1 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และกระแส 1.25 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มความเข้มกระแสเป็น 6 mA/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 10 ชั่วโมงจนล้น แล้วทำการขัดเรียบ ดังรูป 5.19





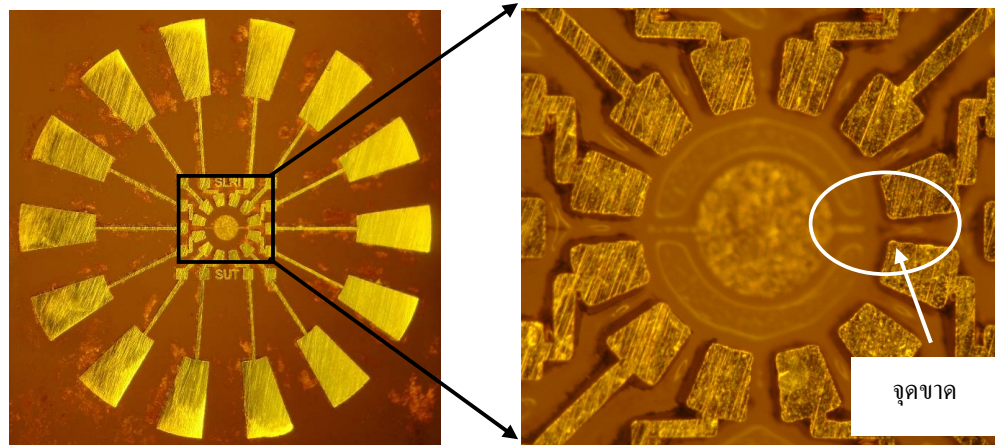
รูปที่ 5.19 หลังชุบนิกเกิลและจัดเรียงของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

8. พลาสมาสกัดสารไวแสงที่กำลัง RF 200 W ด้วย แก๊สออกซิเจน กับ  $CF_4$  เป็นเวลา 45 ชั่วโมง ได้ผลดังรูป 5.20 จะพบว่าแกนโรเตอร์ลึกลงเนื่องจากเกิดแรงจากภายนอก จากนั้นพลาสมาด้วยแก๊สดังกล่าวที่กำลัง RF 200 W เพิ่มอีกจนสกัดสารไวแสงได้หมด

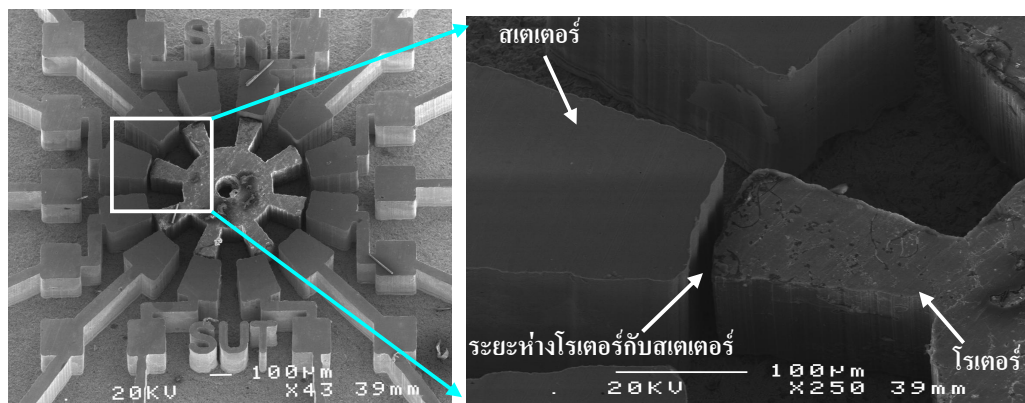


รูปที่ 5.20 หลังสกัดสารไวแสงของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วนด้วยการพลาสมา

9. สกัดทองแดงออกเพื่อให้สเตเตอร์แยกออกจากกราวด์ แต่เนื่องจากกราวด์บางเกินไปจึงทำให้ขาดหายไปดังรูปที่ 5.21 (ก) แล้วจึงได้การทดสอบสวมโรเตอร์เข้ากับสเตเตอร์ได้ดังรูปที่ 5.21 (ข)



(ก) หลังสกัดโลหะทองแดงและเกิดรอยขาด



(ข) ภาพ SEM (Scanning electron microscope) ของโรเตอร์กับสเตเตอร์

รูปที่ 5.21 หลังสกัดโลหะทองแดงสำหรับโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วน

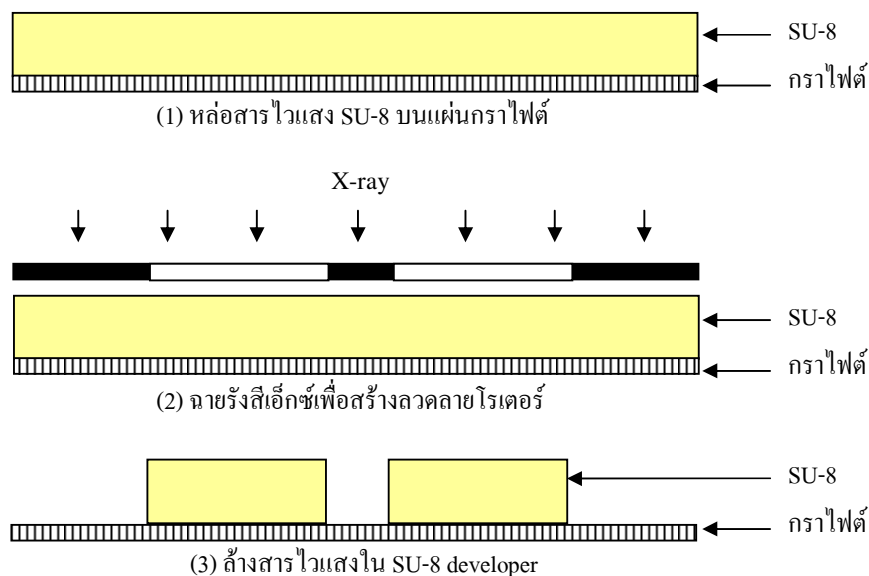
จากกระบวนการที่ผ่านมาพบว่าเป็นวิธีที่ใช้การทำนานเกินไป เริ่มตั้งแต่การฉายรังสีเอ็กซ์ การล้างสารไวแสง การขึ้นรูปด้วยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และสกัดสารไวแสงกับโลหะ พบว่าการสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาซึ่งใช้เวลายาวนาน และเมื่อทำการสกัดสารโลหะบางประเภททิ้ง โลหะบริเวณข้างเคียงกับได้รับความเสียหายไปด้วย จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนแนวทางและวิธีการสร้างใหม่ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

### 5.3 การสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

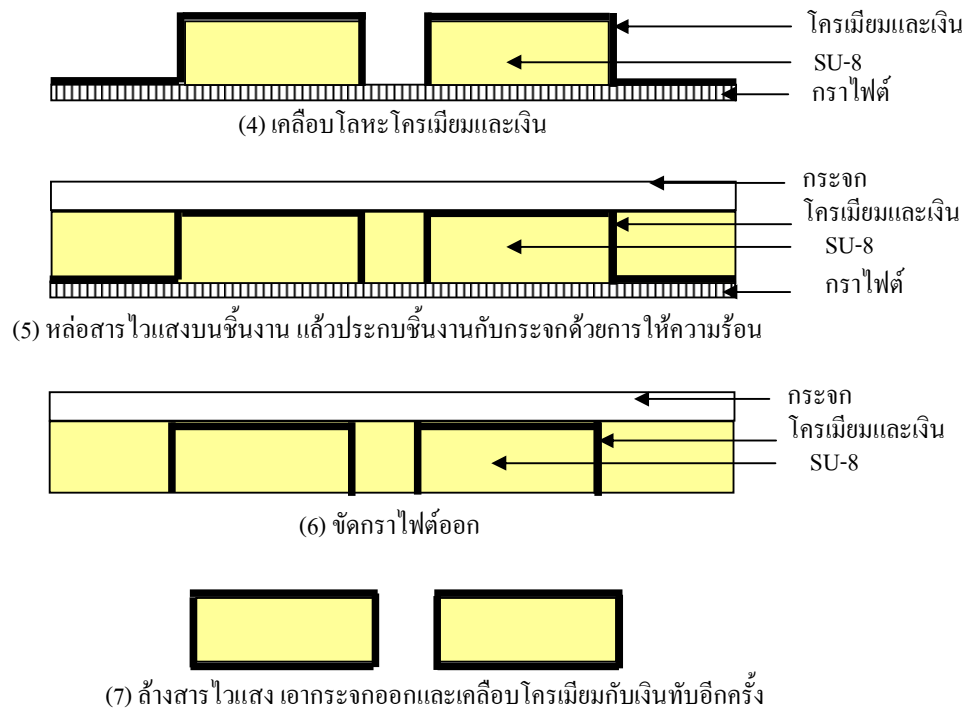
หลังจากพบปัญหาของการใช้โลหะนิกเกิลขึ้นรูปโครงสร้างของมอเตอร์จุลภาค โดยการชุบด้วยไฟฟ้า การสกัดสารไวแสงที่ตกค้างต้องใช้เวลาานและอีกปัญหาคือการสกัดโลหะที่เป็นใช้เป็นฐานรองทิ้ง ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายในระยะสุดท้ายของกระบวนการสร้าง เป็นเหตุให้ต้องดำเนินการคิดและวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางแก้ไขกระบวนการผลิตและการพัฒนาแบบใหม่ เพื่อสร้างโครงสร้างมอเตอร์จุลภาค พบว่าหากทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการใช้โครงสร้างพอลิเมอร์หรือสารไวแสงแบบลบ SU-8 ที่ผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์จนได้ลวดลายโครงสร้าง แล้วทำการเคลือบโลหะนำไฟฟ้าแทนการขึ้นรูปด้วยวิธีชุบโลหะนิกเกิล จะเป็นกระบวนการที่สามารถสร้างโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ลดเวลาสำหรับการชุบโลหะและการสกัดสารไวแสงทิ้งไป และข้อดีอีกประการคือโรเตอร์มีน้ำหนักเบาว่าโลหะทำให้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียคือไม่แข็งแรงและทนต่อการสึกหรอได้น้อย การสร้างมอเตอร์จุลภาควิธีนี้มีขนาดของโครงสร้างทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ยังคงเหมือนกับโครงสร้างของมอเตอร์จุลภาคโครงสร้างโลหะแบบแยกส่วนเพียงแต่เปลี่ยนวิธีการและกระบวนการสร้างเท่านั้น

#### 5.3.1 การสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

กระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้ามีวิธีและกระบวนการสร้างดังรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 กระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

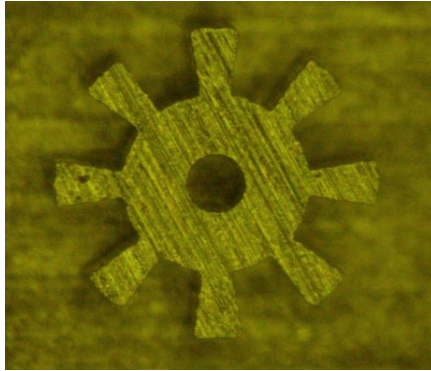


รูปที่ 5.22 กระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า (ต่อ)

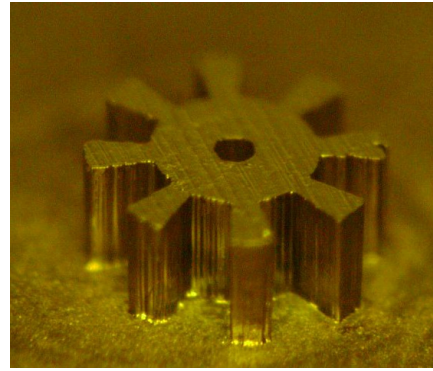
กระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.22 ดังนี้

1. ทำความสะอาดฐานรองกราไฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำปอดไอออนเป็นเวลา 30 นาที แล้วหล่อสารไวแสงแบบลบ SU-8 ผงแห้ง ลงบนฐานรองกราไฟต์ จากนั้นจัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ  $300 \mu\text{m}$
2. ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากเงินคูดซ์รังสีเพื่อสร้างลวดลายของโรเตอร์ที่กระแสค่าอเล็กตรอน  $103.7 \text{ mA}$  ด้วยพลังงาน  $18024 \text{ mJ/cm}^3$  (Acc.BottomBright) เป็นเวลา 3 นาที ที่ความดัน  $0.011 \text{ torr}$  แล้วอบที่อุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาทีบนแผ่นความร้อน
3. ทำการล้างสารไวแสงออกด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที แล้วฉีดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพื่อทดสอบสารไวแสงที่ยังหลงเหลือในชั้นงาน เมื่อสารไวแสงถูกล้างออกจนหมดจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

4. เคลือบโลหะโครเมียมลงไปบนโรเตอร์ด้วยเครื่องสปัตเตอริงเพื่อให้สารไวแสง บริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้าที่ค่ากำลัง 100 W เป็นเวลา 10 นาที ด้วยอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 10 SCCM และความดัน  $1.32 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนาประมาณ  $0.08 \mu\text{m}$  แล้วเคลือบโลหะ เงินทับอีกครั้ง ด้วยกำลัง 150 W เป็นเวลา 5 นาที ได้ความหนาประมาณ  $0.03 \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 5.23



(ก) ก่อนเคลือบโลหะ



(ข) หลังเคลือบโลหะ

รูปที่ 5.23 โรเตอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

5. หล่อสารไวแสงบนชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบอีกครั้งได้ความหนา  $500 \mu\text{m}$  แล้ว นำมาขัดผิวหน้าให้เรียบจากนั้นนำมาประกบติดบนกระจกแล้วให้ความร้อน  $95^{\circ}\text{C}$  10 นาที

6. ขัดกราไฟต์ออกแสดงดังรูปที่ 5.24



(ก) ก่อนขัดกราไฟต์

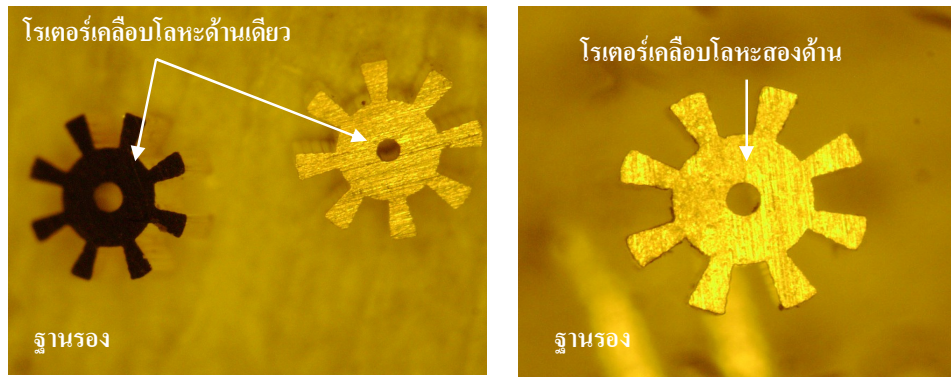


(ข) หลังขัดกราไฟต์

รูปที่ 5.24 ก่อนและหลังขัดกราไฟต์ของโรเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า



7. ล้างสารไวแสงออกพร้อมกับกระจกด้วย SU-8 developer ประมาณ 30 นาที แล้วกรองเอาโรเตอร์ที่หลุดมาซึ่งติดบนพอลิอิมิด์เทป จากนั้นนำไปเคลือบโลหะโครเมียมและเงิน บริเวณที่ไม่มีโลหะเคลือบอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้โรเตอร์นำไฟฟ้าทุกด้านดังรูปที่ 5.25



(ก) เคลือบโลหะด้านเดียว

(ข) เคลือบโลหะสองด้าน

รูปที่ 5.25 เคลือบโลหะครั้งที่สองบนโรเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า

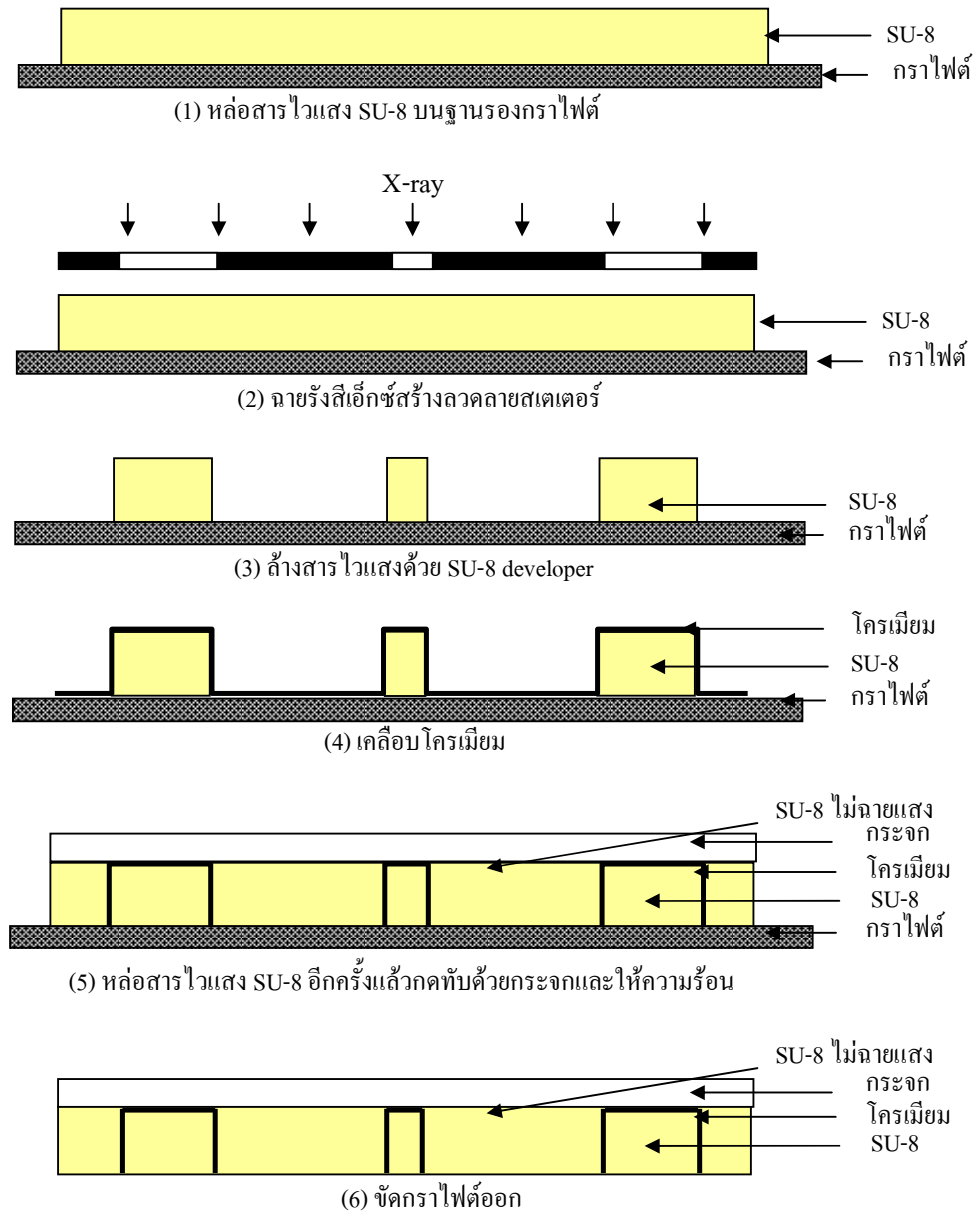
จากกระบวนการสร้างโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าที่ผ่านมาพบว่า การสร้างโรเตอร์ดังกล่าวสามารถนำไฟฟ้าได้ดีและเมื่อสิ้นสุดกระบวนการสร้างโรเตอร์แล้ว ต่อไปจะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ทำการเคลือบโลหะเพื่อให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า เป็นวิธีการผลิตที่คล้ายคลึงกับการสร้างโรเตอร์ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา แต่การดำเนินการจะซับซ้อนกว่าโรเตอร์มาก การสร้างสเตเตอร์ด้วยวิธีนี้แบ่งออกได้หลายกระบวนการ ทั้งนี้เพื่อหาแนวทางในการสร้างโครงสร้างมอเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้พร้อมกับลดระยะเวลาของการสร้างต่อไป

### 5.3.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

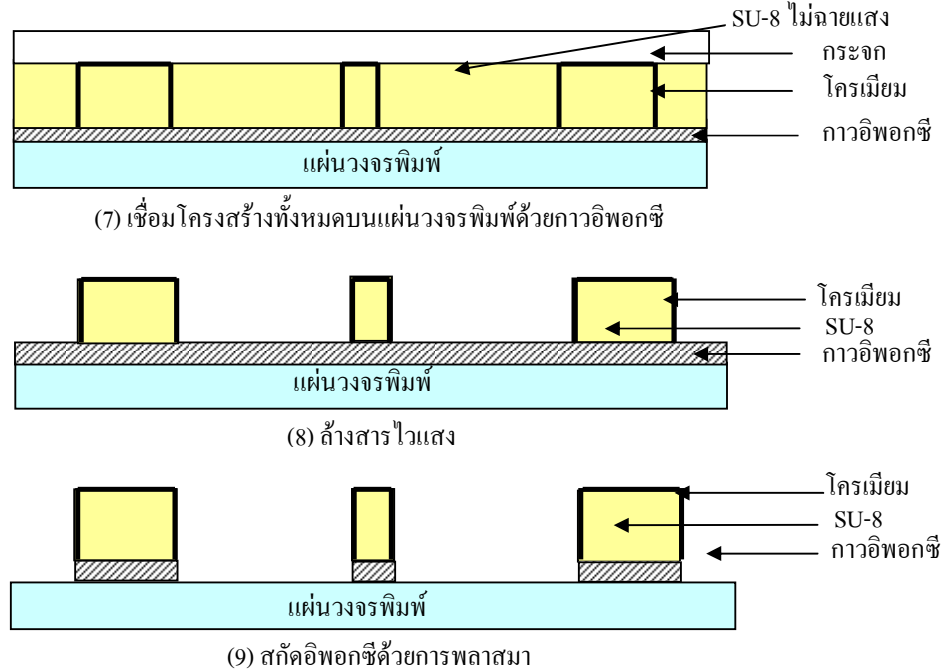
กระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างดังกล่าวได้ทำการทดสอบ สร้างโครงสร้างสเตเตอร์วางอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้กาวอีพอกซีเป็นตัวเชื่อมต่อ ซึ่งได้ทดสอบกับโลหะสองชนิดคือโลหะโครเมียมกับอลูมิเนียมเพื่อเปรียบเทียบความคงทนต่อการกัดกร่อนจากการสักรัดด้วยพลาสมาในกระบวนการขั้นสุดท้ายของการสร้างมอเตอร์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.2.1 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมแล้วยึดโครงสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวอีพอกซีเป็นไปตามกระบวนการสร้างในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี



รูปที่ 5.26 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์  
เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี (ต่อ)

การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซีสามารถอธิบายได้ดังกระบวนการต่อไปนี้

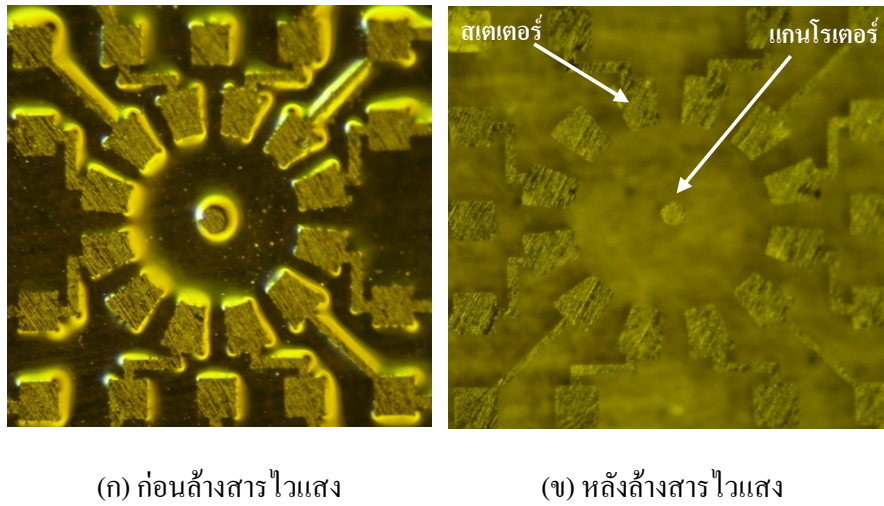
1. ทำความสะอาดฐานรองกราฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำสะอาดแล้ว หล่อสารไวแสงแบบลบ SU-8 บนแผ่นกราฟต์ขนาด 2x2 cm เป็นเวลา 120°C นาน 1 ชั่วโมงแล้วทำการจัดเรียบได้ความหนา 320  $\mu\text{m}$

2. นำชิ้นงานที่ทำการจัดเรียบแล้วฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากลูดซับรังสีเอ็กซ์ ที่พลังงาน 20500  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 89.46 mA ใช้เวลา 6 นาที แล้วทำการอบหลังฉายแสง 95°C เป็นเวลา 15 นาทีบนแผ่นความร้อน

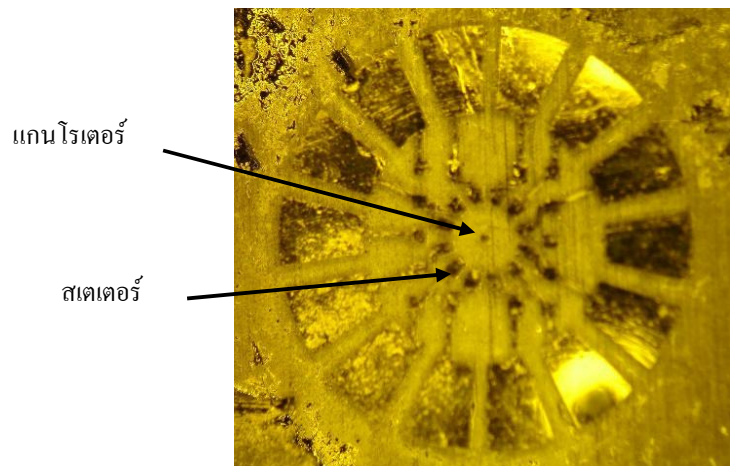
3. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที ด้วยเมกะโซนิค จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนอีกครั้งดังรูปที่ 5.27

4. เคลือบโลหะโครเมียมบนสเตเตอร์ด้วยเครื่องสปัตเตอริงเพื่อให้สารไวแสงบริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้าได้ ที่กำลัง 300 W อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 6.5 SCCM เป็นเวลา 5 นาที และความดัน  $1.32 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนา 0.2  $\mu\text{m}$  ดังรูปที่ 5.28



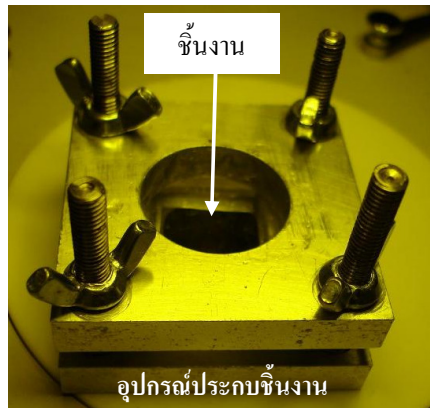


รูปที่ 5.27 ลวดลายสเตเตอร์ก่อนและหลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี



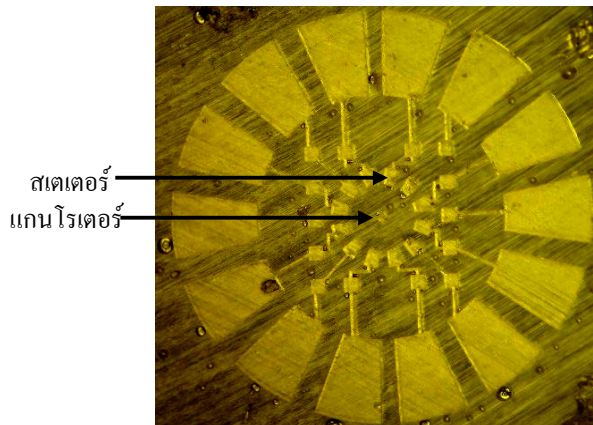
รูปที่ 5.28 หลังเคลือบโครเมียมบนสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

5. หลอม SU-8 บนกระจกสไลด์ในพื้นที่  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  ได้ความหนาประมาณ  $400 \text{ }\mu\text{m}$  ชัดผิวหน้าเรียบ ทำการประกบชิ้นงานลงบนสารไวแสงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  พร้อมกับกดทับด้วยอุปกรณ์สำหรับประกบชิ้นงาน และให้ความร้อน  $95^\circ\text{C}$  ต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 ประกบชั้นงานบนกระจกด้วย SU-8 โดยใช้อุปกรณ์ทับชั้นงานสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

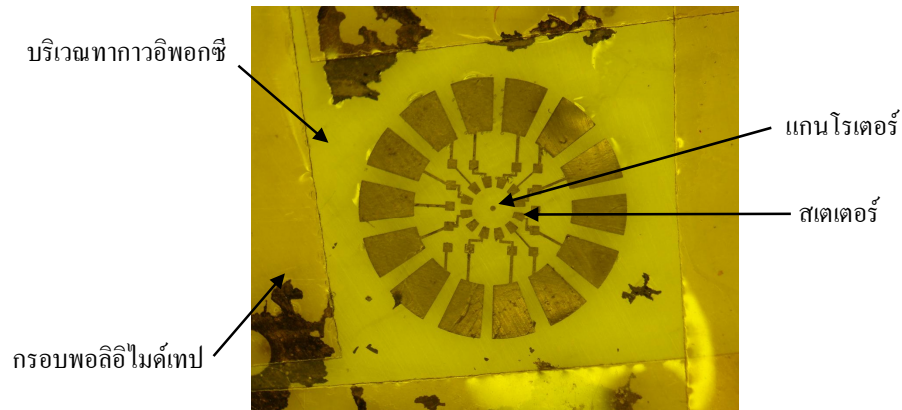
6. เอาที่ประกบชั้นงานออกแล้วขัดกราไฟต์ทิ้งด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1200 และ 2000 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 ชั้นงานหลังขัดกราไฟต์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

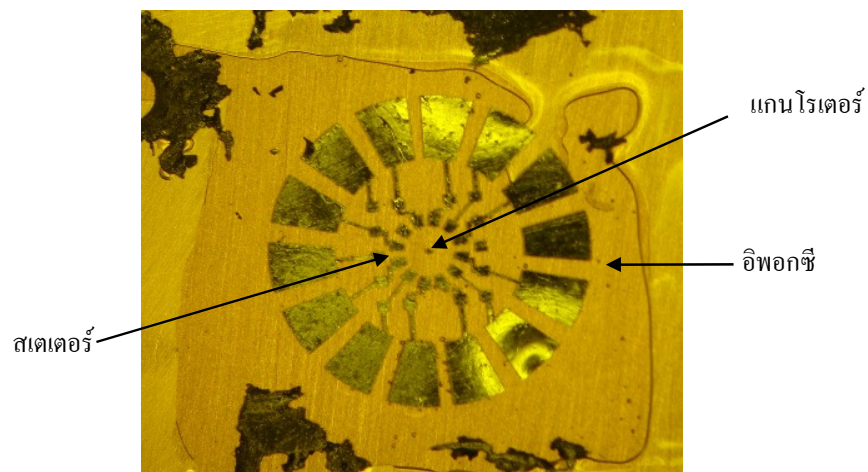
7. ตัดพอลิอิมิดเทปบริเวณข้าง ๆ ของชั้นงานเพื่อเป็นที่กั้นขอบสำหรับทาความหนา 50  $\mu\text{m}$  จากนั้นผสมกาวอีพอกซีแบบแห้งซ้ำ อัตราส่วน 1:1 แล้วทาบริเวณในกรอบของพอลิอิมิดเทป แล้วแกะออกจะเหลือเฉพาะกาวอีพอกซีตรงกลาง จากนั้นประกบชั้นงาน

ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ขัดเรียบและทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 5.31 จากนั้นให้ความร้อน  $50^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 5 ชั่วโมง เพื่อให้กาวเกิดการแข็งตัวอย่างช้า ๆ

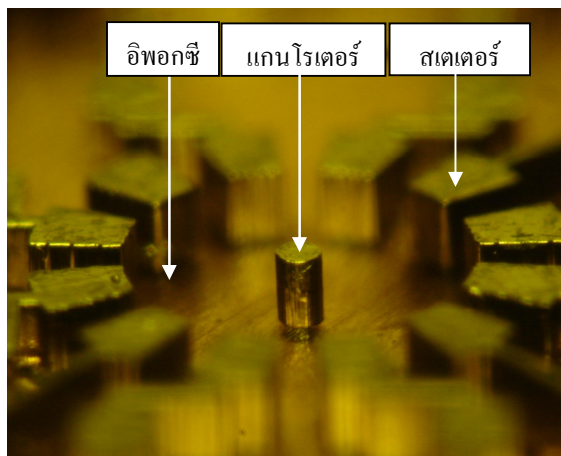


รูปที่ 5.31 การประกอบชิ้นงานบนกระจกด้วยการหล่อ SU-8 สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

8. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer พร้อมกับเมกกะโซนิคเพื่อให้สารไวแสงหลุดออกจากกระจกได้เร็วยิ่งขึ้น รวมระยะเวลาการล้างสารไวแสงจนกระจกหลุดออกมาใช้เวลา 2 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 5.32 จะพบกาวอีพอกซีอยู่ด้านล่างของสเตเตอร์



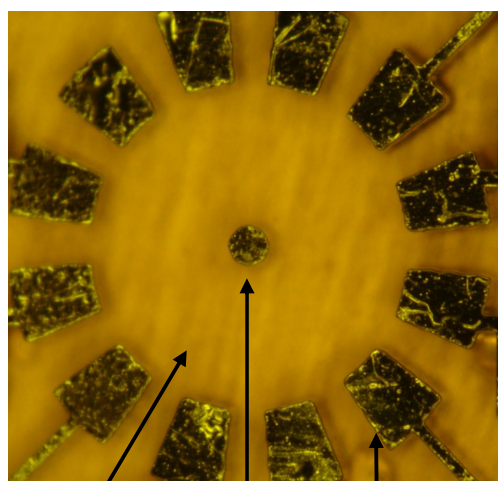
(ก) หลังล้างสารไวแสง



(ข) หลังล้างสารไวแสง

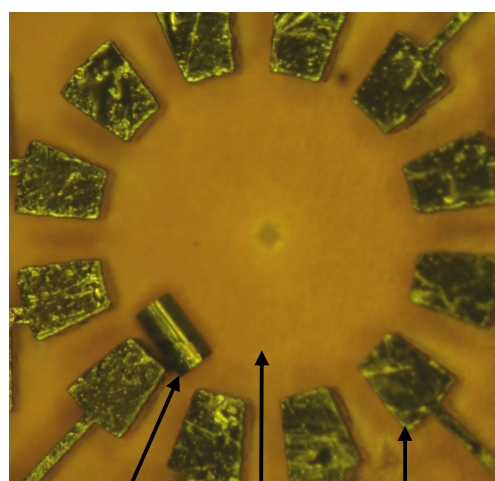
รูปที่ 5.32 หลังประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรมพิมพ์ของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรมพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอีพอกซี

9. ทำการสักรีดอีพอกซีด้วยการพลาสมาด้วยแก๊สออกซิเจน กับ  $CF_4$  ดังรูปที่ 5.33 (ก) ที่กำลัง RF เท่ากับ 100 W รวมเวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมง รูปที่ 5.33 (ข) ถึง (ค) ที่กำลัง RF เท่ากับ 200 W รวมเวลา 18 ชั่วโมง จนเสาสลิม รูปที่ 5.33 (ง) ที่กำลัง RF เท่ากับ 200 W รวมเวลาทั้งหมด 40 ชั่วโมง



อีพอกซี แกนโรเตอร์ สเตเตอร์

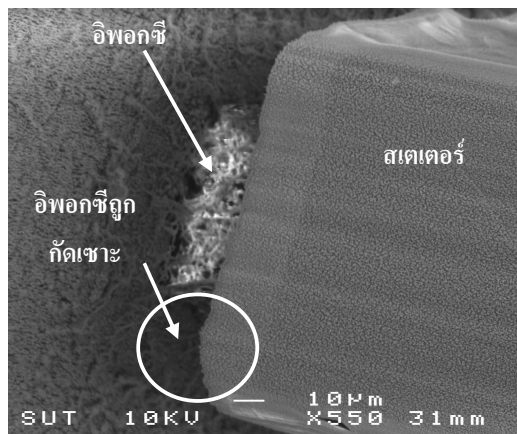
(ก) พลาสมา RF 100 W รวม 1 ชั่วโมง



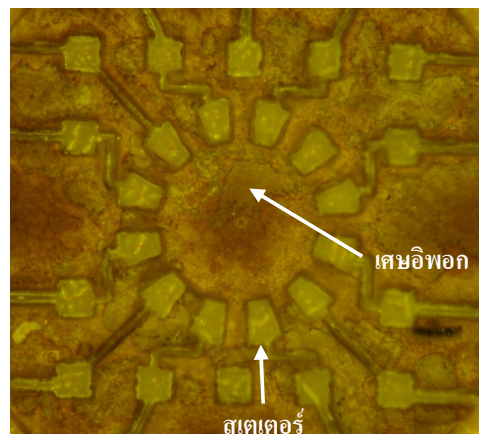
แกนโรเตอร์ อีพอกซี สเตเตอร์

(ข) พลาสมา RF 100 W รวม 18 ชั่วโมง





(ค) ภาพ SEM ของสเตเตอร์



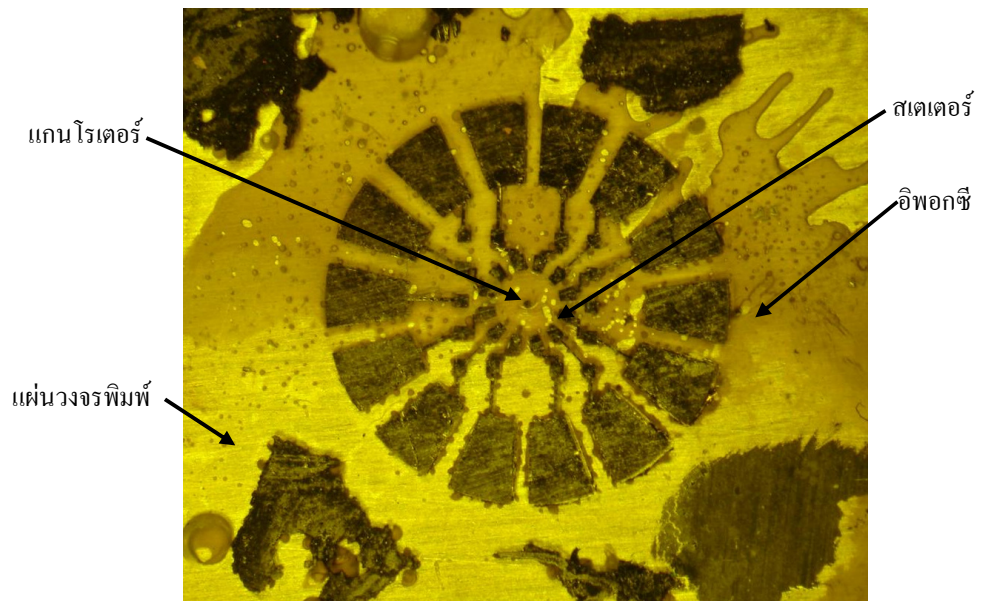
(ง) พลาสมา RF 100 W รวม 40 ชั่วโมง

รูปที่ 5.33 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิมพอกซี

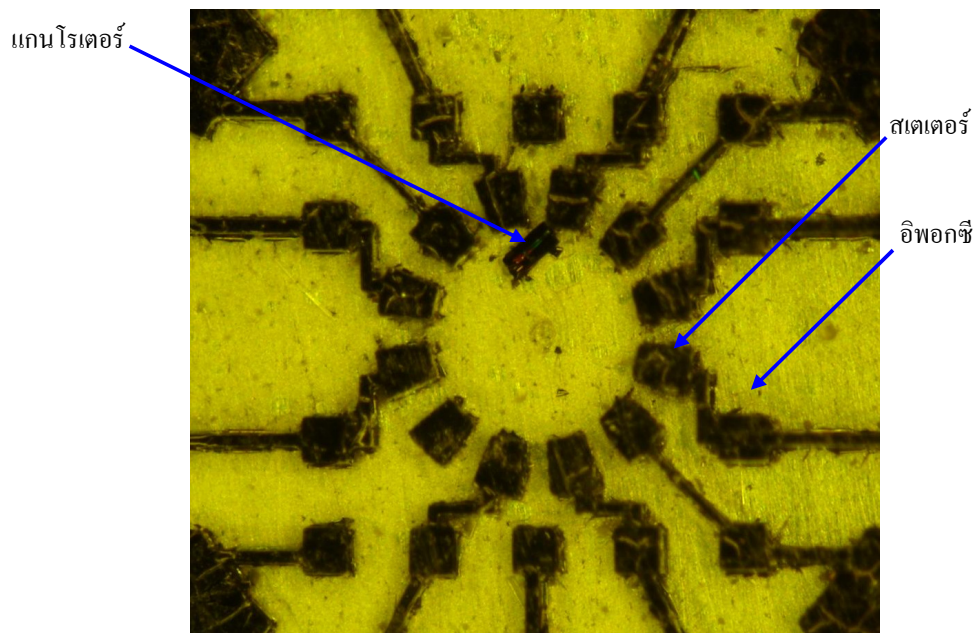
จากกระบวนการที่ผ่านมาจะเห็นว่าเมื่อทำการสกัดกาวอิมพอกซีด้วยการพลาสมา โลหะที่เคลือบผิวโครงสร้างของสเตเตอร์ถูกสกัดออกจนหมดในขณะที่อิมพอกซีที่ต้องการสกัดทิ้งยังมีเศษหลงเหลืออยู่บนฐานรองบนแผ่นวงจรพิมพ์เป็นจำนวนมาก จึงกล่าวได้ว่าการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์โดยใช้การเคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้วเชื่อมติดด้วยอิมพอกซีไม่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างสเตเตอร์จึงได้ทำการเปลี่ยนโลหะสำหรับเคลือบใหม่เป็นอลูมิเนียมมีรายละเอียดในหัวข้อย่อยถัดไป

#### 5.3.2.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิมพอกซี

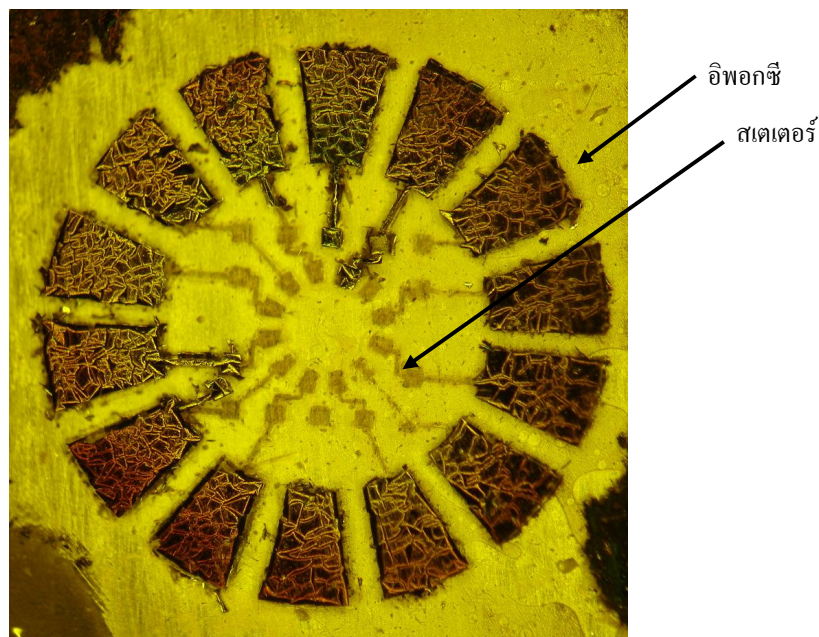
การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิมพอกซีมีกระบวนการสร้างเช่นเดียวกับหัวข้อย่อย 5.3.2.1 ต่างกันที่เปลี่ยนโลหะที่เคลือบจากโครเมียมเป็นอลูมิเนียมเท่านั้น ผลของการสร้างขั้นสุดท้ายคือการสกัดกาวอิมพอกซีด้วยการพลาสมา ได้ผลเป็นลักษณะเช่นเดียวกับการสร้างสเตเตอร์ด้วยการเคลือบโครเมียม แสดงดังรูปที่ 5.34



(ก) พลาสมาที่กำลัง RF 200 W รวมเวลา 3 ชั่วโมง



(ข) พลาสมาที่กำลัง RF เท่ากับ 200 W รวมเวลา 15 ชั่วโมง



(ก) พลาสมาที่ก่อดัง RF เท่ากับ 200 W รวมเวลา 35 ชั่วโมง

รูปที่ 5.34 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาของสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะอะลูมิเนียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิพอกซี

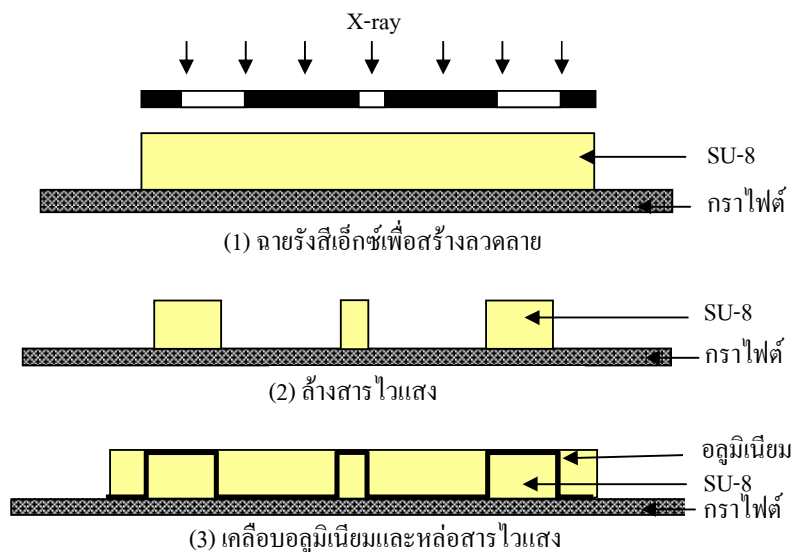
จากกระบวนการที่ผ่านมาพบว่าการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะโครเมียมบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิพอกซีได้ผลเช่นเดียวกับกับการใช้โลหะโครเมียมแต่อลูมิเนียมจะทนการกัดพลาสมาได้ดีกว่า เนื่องจากบางโครงสร้างของสเตเตอร์นั้นถูกสกัดจนหมด แต่ยังมีโลหะอะลูมิเนียมที่ผิวของโครงสร้างบางส่วนของที่ยังหลงเหลืออยู่ แสดงให้เห็นว่าอลูมิเนียมค่อนข้างทนการกัดกร่อนของการสกัดด้วยพลาสมาค่อนข้างดี แต่ท้ายที่สุดแล้วกระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยกาวอิพอกซีนั้น ไม่เหมาะกับการพัฒนามอเตอร์จุลภาคในครั้งนี้เพราะไม่สามารถสกัดกาวอิพอกซีที่อยู่บนฐานรองได้หมด ทำให้ไม่สามารถที่จะทำการป้อนแรงดัน และปัญหาที่สำคัญสำหรับกระบวนการนี้คือ แกนของโรเตอร์จะเกิดการลึ้มก่อนที่จะสกัดเอาเศษของพอลิเมอร์ออกจนหมด จึงไม่สามารถที่จะนำโรเตอร์มาสวมกับสเตเตอร์เพื่อทำการทดสอบได้ จึงต้องหาแนวทางสร้าง การแก้ไขปัญหาและการพัฒนาเพื่อให้ได้ซึ่งมอเตอร์จุลภาคที่มีโครงสร้างสมบูรณ์เพื่อทำการทดสอบต่อไป

### 5.3.3 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วย AZ1512

จากหัวข้อย่อยที่ผ่านมาพบปัญหาคือเมื่อทำการสกัดอิพอกซีที่ติดบนฐานรองออกด้วยพลาสมา ชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ถูกทำลายไปด้วย จึงได้ทำการหาแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการเชื่อมติดระหว่างชิ้นงานกับแผ่นวงจรพิมพ์โดยใช้ AZ1512 แทนกาวอิพอกซี เพื่อให้ง่ายต่อการสกัดทิ้งและก่อนที่จะทำการยึดชิ้นงานกับกระจกเพื่อทำการขัดคราไฟต์ ได้ทำการเพิ่มพอลิโอดีเทปกับกาวสองหน้าแบบบางกั้นไว้ระหว่างกระจกกับชิ้นงานเป็นจุดสัมผัสกับผิวของชิ้นงานแทน เพื่อให้การแกะกระจกออกง่ายและลดระยะเวลาในการล้างสารไวแสง เนื่องจากที่ผ่านมา น้ำยาล้างสารไวแสงจะเข้าไปล้างสารไวแสงบริเวณด้านข้างเพราะด้านบนถูกปิดกั้นด้วยกระจก หากไม่มีสิ่งกีดขวางด้านบนแล้วจะทำให้สามารถล้างสารไวแสงได้เร็วยิ่งขึ้น

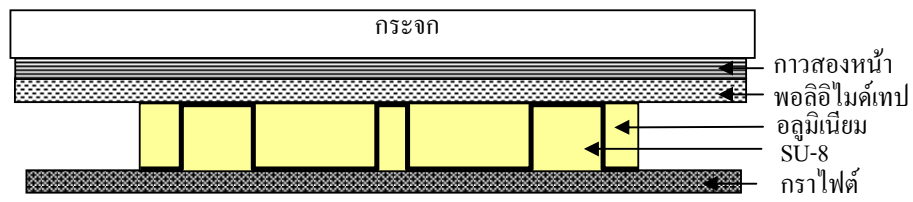
#### 5.3.3.1 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

กระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นได้แก่การเตรียมชิ้นบนและโครเมียมชั้นล่างแล้วประกบบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 มีลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 5.35

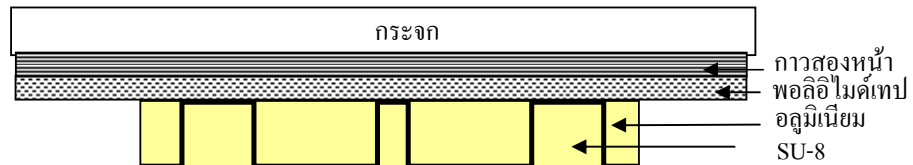


รูปที่ 5.35 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512





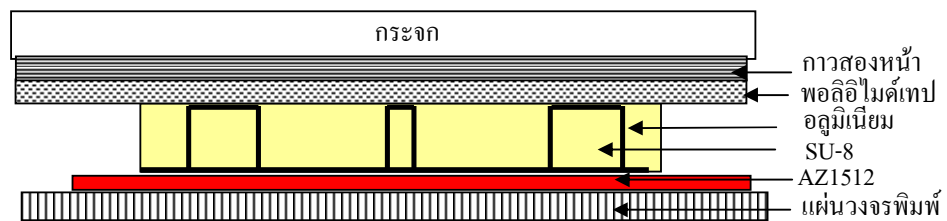
(4) ประกอบชิ้นงานบนฐานรองกระจกที่มีพอลิอิมิด์เทปกับกาวสองหน้า



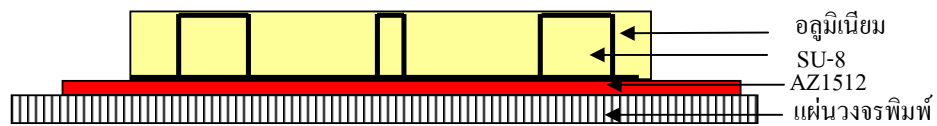
(5) ขัดกราฟไฟต์



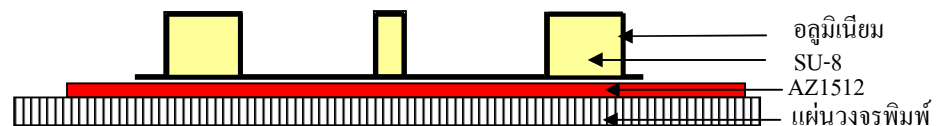
(6) เคลือบโครเมียมชั้นล่าง



(7) เชื่อมติดชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย AZ1512

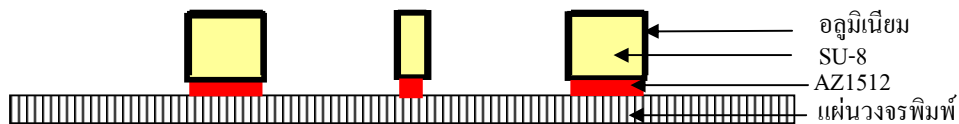


(8) แกะกระจกพร้อมกับกาวสองหน้าและพอลิอิมิด์เทป



(9) ดึงสารไวแสงออก

รูปที่ 5.35 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 (ต่อ)



(10) สกัดโครเมียมและ AZ1512 ด้วยพลาสมา

รูปที่ 5.35 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้น  
บนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 (ต่อ)

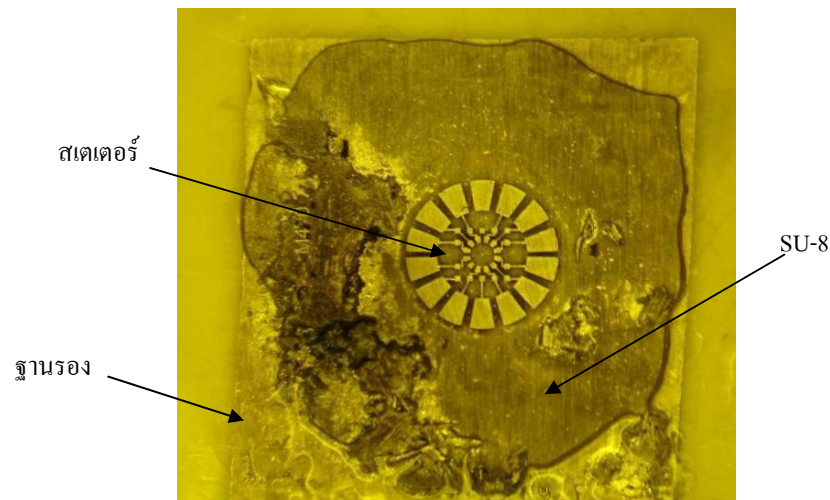
กระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 มีขั้นตอนการทำที่ละเอียดดังนี้

1. ทำความสะอาดฐานรองกราฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำปอดไอออนแล้วเคลือบอลูมิเนียมและหล่อสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนฐานรอง จากนั้นจัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 320  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการจัดเรียบแล้วฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากคูคซ์รังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 20014.30  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนขณะดำเนินการฉายแสง เท่ากับ 107.6800 mA ใช้เวลา 4 นาที 30 วินาที ที่ความดัน  $2.6 \times 10^{-3}$  torr แล้วทำการอบหลังฉายแสงที่ 95°C เป็นเวลา 15 นาทีบนแผ่นความร้อน

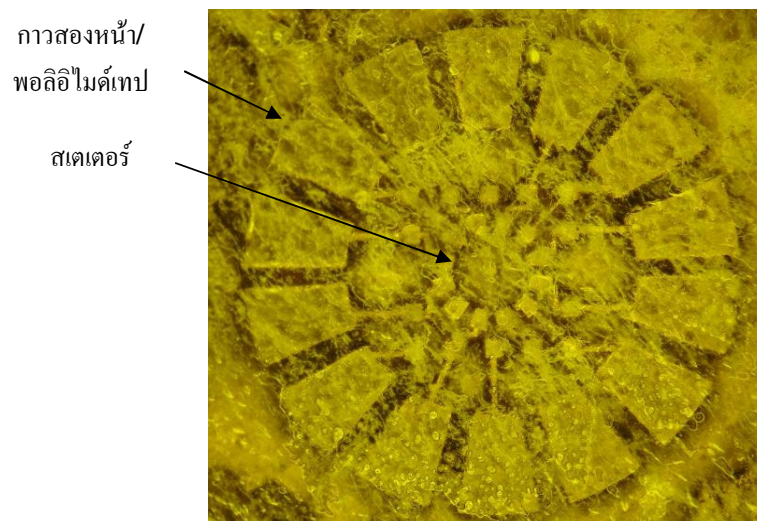
2. ทำการล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับเมกะโซนิค แล้วอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนอีกครั้ง

3. เคลือบโลหะอลูมิเนียมลงไปบนสเตเตอร์ด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริง เพื่อให้สารไวแสงนำไฟฟ้าที่กำลัง 150 W อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 15 นาที ความดัน  $1.32 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนา 0.08  $\mu\text{m}$  หล่อ SU-8 บนชิ้นงานในพื้นที่  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  น้ำหนัก 100 mg ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  แล้วจัดเรียบเหลือ 320  $\mu\text{m}$

4. ทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจกที่มีกาวสองหน้า และพอลิอิมิด์เทปตามลำดับบนลงล่าง แล้วทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C จากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงานและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C ต่อเป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 5.36



(ก) หลังเคลือบอลูมิเนียมและหล่อสารไวแสง

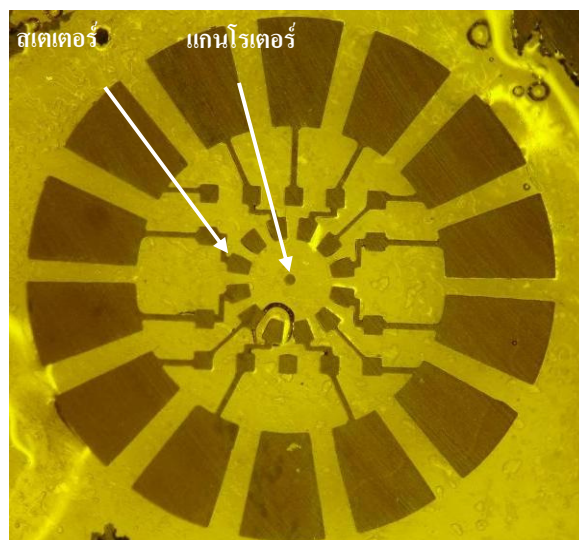


(ง) ประกอบชิ้นงานบนกาวสองหน้ากับพอลิอิมิด์เทปและกระจก

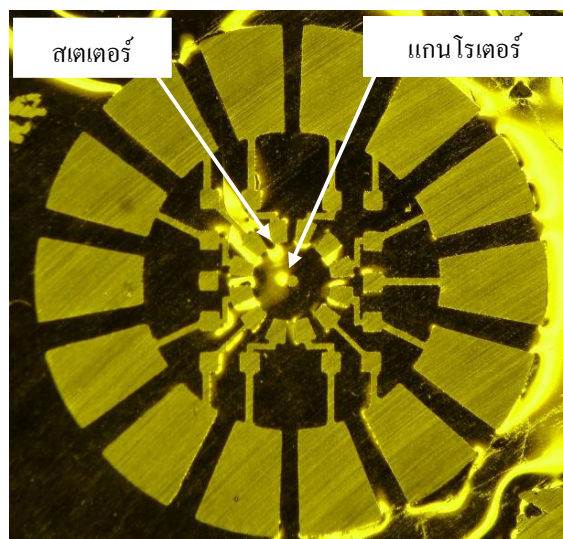
รูปที่ 5.36 หลังยึดชิ้นงานบนกาวสองหน้าและกระจกสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

5. จัดกรงไฟได้ออกด้วยกระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1200 และ 2000 ตามลำดับ จะพบลวดลายสเตเตอร์กับแกนโรเตอร์

6. เคลือบโลหะโครเมียมบนชิ้นงานอีกครั้งที่ 150 W อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 10 นาที ความดัน  $1.32 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนาประมาณ  $0.12 \mu\text{m}$  เพื่อเป็นจุดกำบังน้ำยา SU-8 ทำลาย AZ1512 ดังรูปที่ 5.37



(ก) หลังขัดกราไฟต์



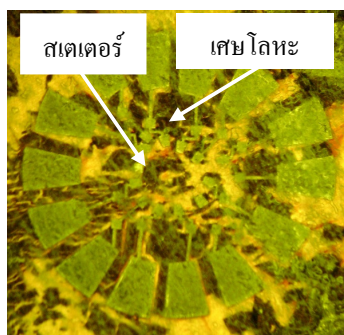
(ข) หลังเคลือบโลหะชั้นที่สอง

รูปที่ 5.37 หลังขัดกราไฟต์และเคลือบโครเมียมบนสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรมินิเชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

7. นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบโลหะแล้วประกบติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย AZ1512 หมุนเคลือบที่ความเร็ว 1000 rpm เป็นเวลา 15 วินาที ด้วยอุปกรณ์ประกบชิ้นงานแล้วให้ความร้อนประมาณ 60°C ดังรูปที่ 5.38



(ก) ประกบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์

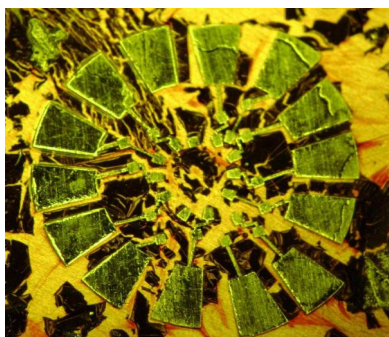


(ข) ให้ความร้อนกับชิ้นงาน

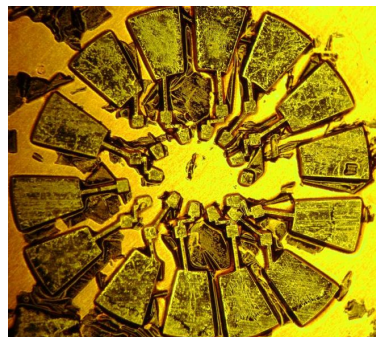
รูปที่ 5.38 ประกบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้น บนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

8. นำที่ประกบชิ้นงานออกแล้วทำการตัดกระจกออกจากชิ้นงาน เนื่องจากไม่สามารถแกะออกได้โดยตรง จึงใช้กระบวนการดังกล่าวเพื่อทำการล้างสาร ไวแสง

9. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 4 นาที ดังรูปที่ 5.39



(ก) ก่อนล้างสารไวแสง

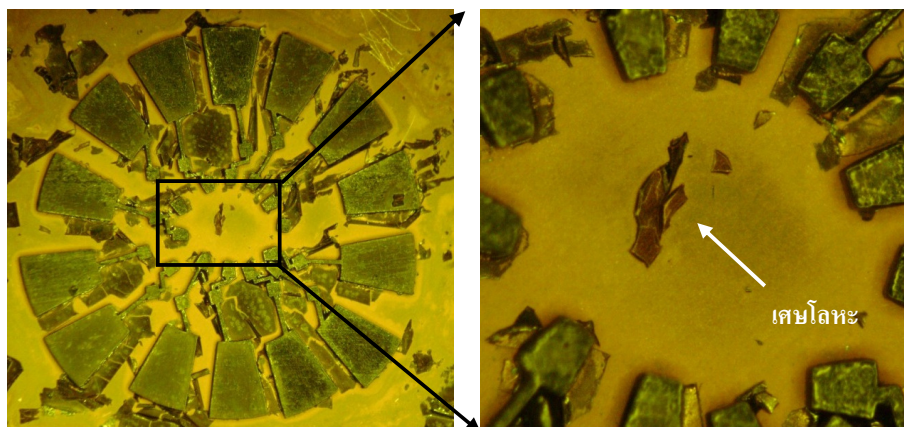


(ข) หลังล้างสารไวแสง

รูปที่ 5.39 หลังล้างสารไวแสงออกจากสเตเตอร์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้น บนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512



10. เนื่องจากชิ้นงานได้รับความเสียหายจากการตัดกระจกและล้างสารไวแสง จึงทดลองสกัดสารไวแสงทิ้งด้วยการพลาสมาเพื่อหาเวลาในการสกัดโลหะที่ปกคลุมผิวด้านล่าง ดังรูปที่ 5.40 เป็นผลจากการพลาสมาด้วยกำลัง RF 200 W เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แต่ยังพบว่า มีเศษโลหะด้านล่างยังไม่หลุดหรือถูกสกัดออกจากฐาน



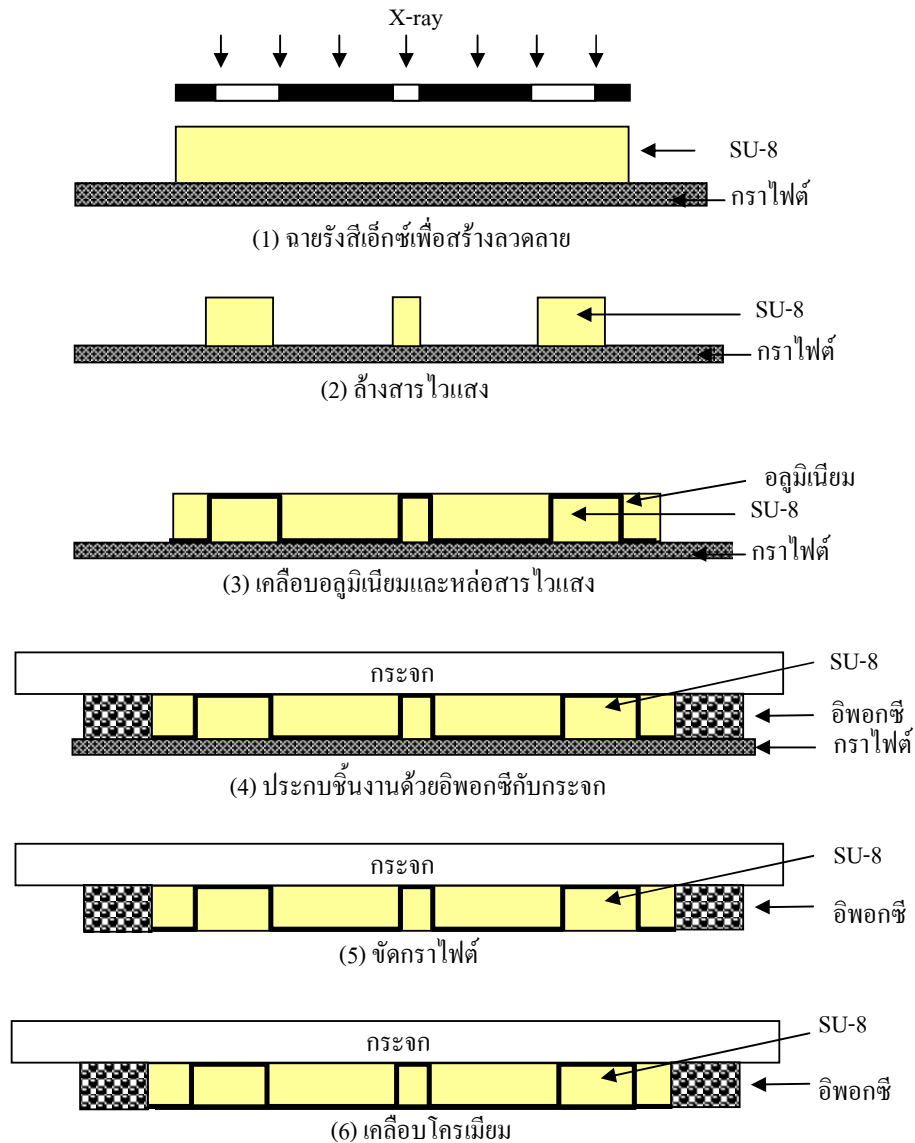
รูปที่ 5.40 หลังพลาสมาสกัดสารไวแสงออกจากสเตเตอร์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

จากกระบวนการที่ผ่านมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารไวแสงด้วยการเติมพอลิไมด์เทปพร้อมกับกาวสองหน้าลงไป เพื่อเป็นจุดสัมผัสผิวหน้าของชิ้นงานกับกระจกเพื่อให้แกะกระจกออกได้ง่าย จากนั้นทำการประกบชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบโลหะสองชั้น บนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย AZ1512 พร้อมกับดูดอากาศจนแห้งแล้วให้ความร้อนประมาณ 65°C พบขั้นตอนที่มีปัญหาคือการแกะกระจก พอลิไมด์เทปและกาวสองหน้าออก ต้องใช้วิธีตัดกระจกทีละน้อย เนื่องจากชิ้นงานยึดติดแน่นมาก ผลที่ได้คือสามารถแกะชิ้นงานออกได้แต่เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างชิ้นงาน วิธีการดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างมอเตอร์จูลภาค

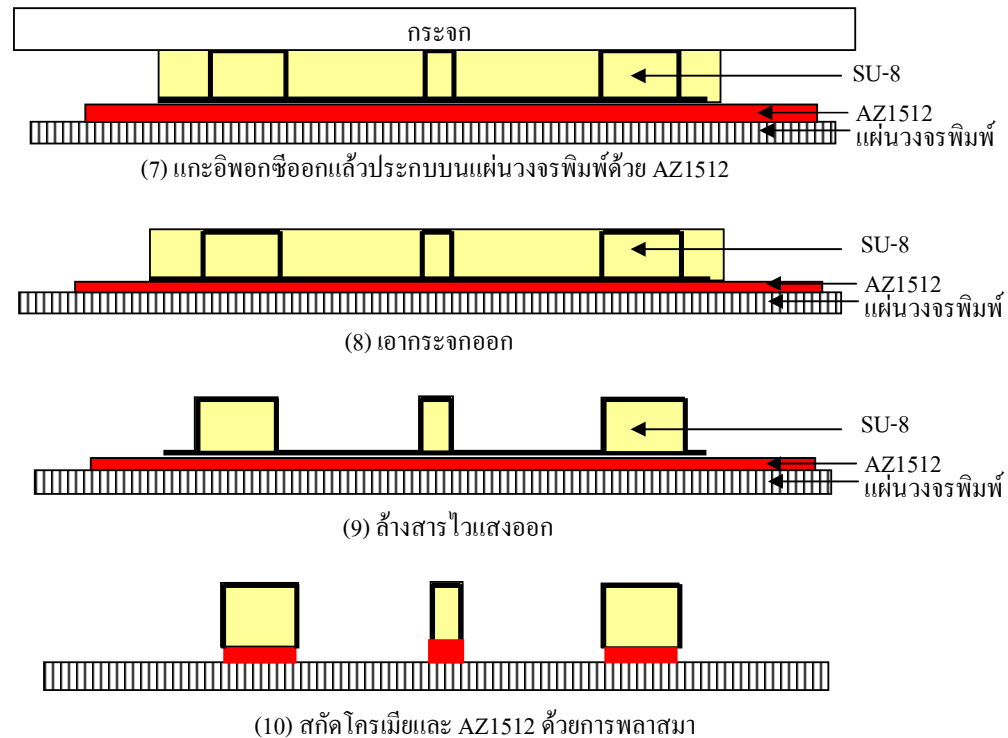
### 5.3.3.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

หลังจากพบหลากหลายปัญหาไม่ว่าจะเป็น การสกัดอีพอกซีหลังจากการถ่ายโอนโครงสร้างออกช้าเกินไป การแกะชิ้นงานจากฐานรอง แล้วทำการแก้ปัญหาดังกล่าวเรื่อยมา

จนพบวิธีที่คาดว่าจะสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยการยึดชิ้นงานด้วยอิพอกซีด้านข้าง บนกระจกแล้ว  
 ชัดกรไฟท์ทิ้ง ก่อนนำชิ้นงานไปยึดติดบนวงจรมพิมพ์ด้วย AZ1512 ดังกระบวนการในรูปที่ 5.41



รูปที่ 5.41 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจก  
 ด้วยอิพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512



รูปที่ 5.41 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซี ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 (ต่อ)

กระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

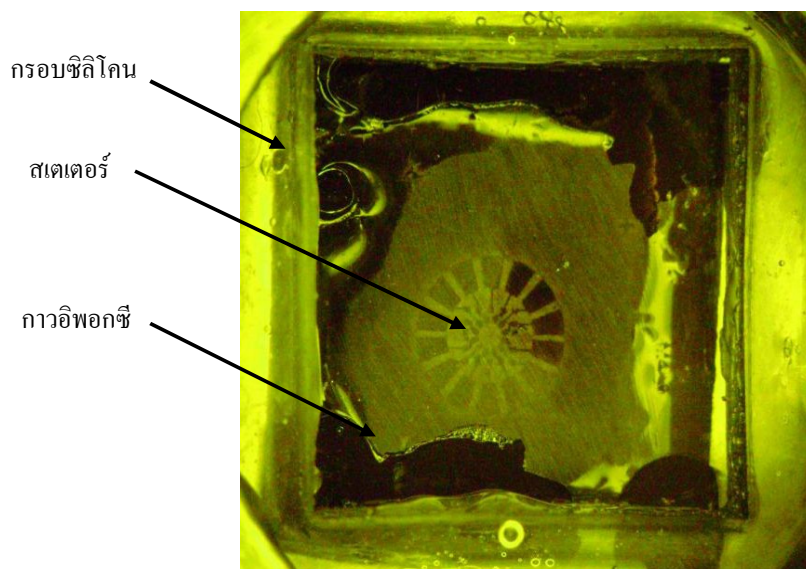
1. ทำความสะอาดฐานรองแผ่นกราฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำป्लอดไอออนแล้วเคลือบด้วยแล้ว หล่อสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนฐานรอง จากนั้นจัดเรียงให้ได้ด้วยความหนาประมาณ  $320\ \mu\text{m}$  จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการจัดเรียงแล้วฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากคูคซ์บรังสีเอ็กซ์ ได้รับค่าพลังงานประมาณ  $21441.63\ \text{mJ}/\text{cm}^3$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนขณะดำเนินการฉายแสง  $98.7630\ \text{mA}$  ใช้เวลา 4 นาที 48 วินาที ความดัน  $5.6 \times 10^{-3}\ \text{torr}$  แล้วทำการอบหลังฉายแสงที่  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน

2. ทำการล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับแกะโซนิคแล้วเป่าแห้งและอบที่อุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน



3. เคลือบโลหะอลูมิเนียมลงไบบนสเตเตอร์เพื่อให้สารไวแสงบริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้าที่ค่าพลังงาน 200 W อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 8 นาที มีความดัน  $1.3 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนาของโลหะ 0.12  $\mu\text{m}$  จากนั้นหล่อ SU-8 พงแห้งลงบนชิ้นงานภายในพื้นที่  $2 \times 2$   $\text{cm}^2$  ด้วยน้ำหนัก 100 mg ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  แล้วจัดเรียงให้เหลือความหนา 320  $\mu\text{m}$

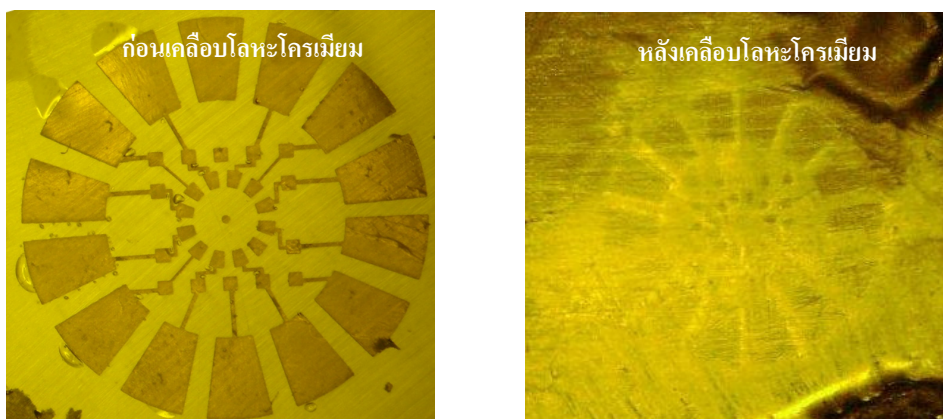
4. ทากาวอีพอกซีบริเวณขอบของชิ้นงานและทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจก จากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ประกบชิ้นงานที่  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กาวอีพอกซีแห้ง ดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 หลังยึดชิ้นงานด้วยอีพอกซีสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

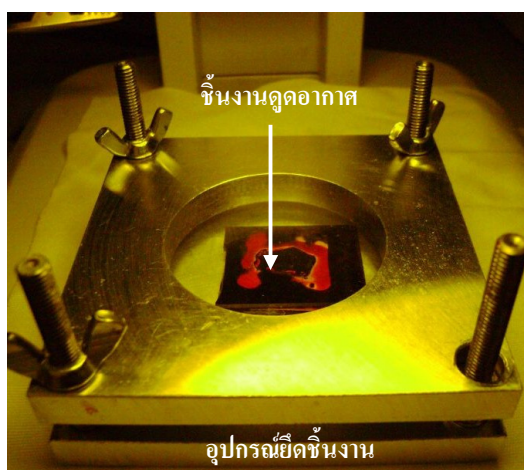
5. ทำการขจัดคราไฟต์ออกด้วยกระดาษทราย

6. แกะอีพอกซีที่อยู่ด้านข้างออกจากชิ้นงาน จากนั้นเคลือบโลหะโครเมียมครั้งที่สองด้วยเครื่องสปัตเตอริง ที่กำลัง 100 W รวมเวลา 10 นาที ได้ผลดังรูป 5.43



รูปที่ 5.43 หลังเคลือบโลหะสองชั้นสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจก ด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

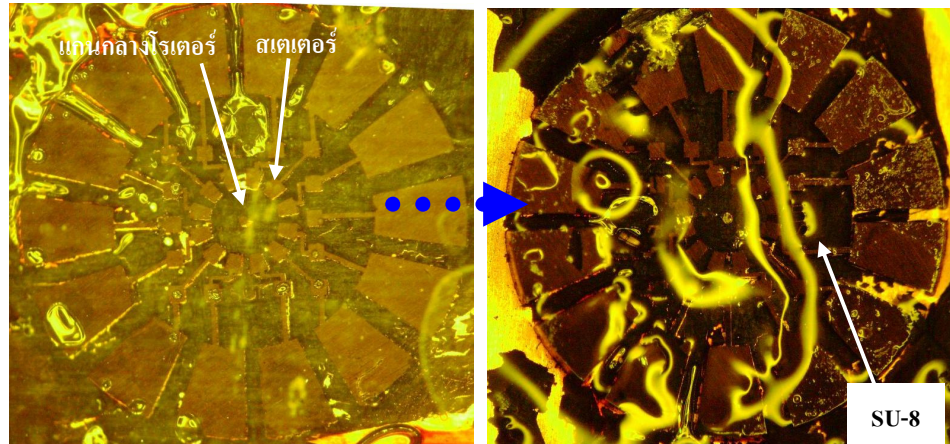
7. หยอดสารไวแสง AZ1512 บนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วประกบชิ้นงานทับลงไปพร้อมกับคู่อากาศเพื่อให้ชิ้นงานแห้งติดฐานรอง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ความดัน  $4.6 \times 10^{-6}$  torr ดังรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.44 หลังประกบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์ สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจกด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

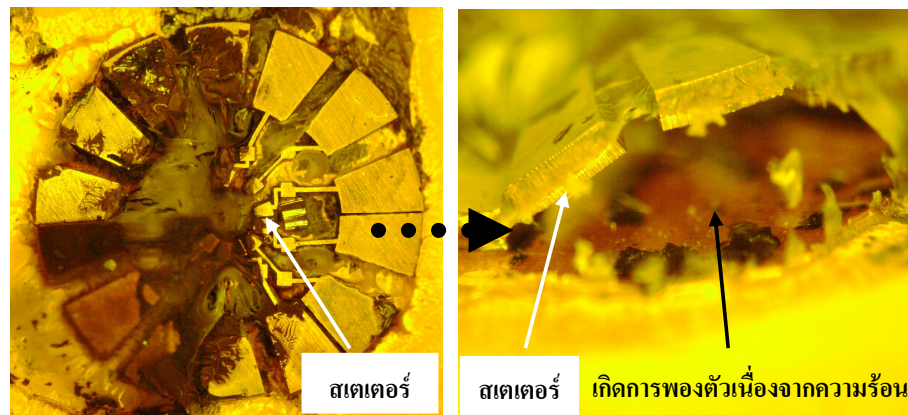
8. เอาที่ยึดชิ้นงานออกเพื่อดำเนินการกระบวนการถัดไป

9. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นแกะ  
กระจกออกดังรูปที่ 5.45 แล้วปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.45 หลังล้างสารไวแสงสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึดกับกระจก  
ด้วยอิมพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

10. ทำการพลาสมาสกัดสารไวแสงด้วยกำลัง 200 W เป็นเวลา 1 ชั่วโมง  
ดังรูปที่ 5.46 พบว่าสารไวแสงยังไม่แห้งดีพอทำให้เกิดความร้อน สารไวแสงจึงพองตัวทำให้ชิ้นงาน  
พังเสียหาย



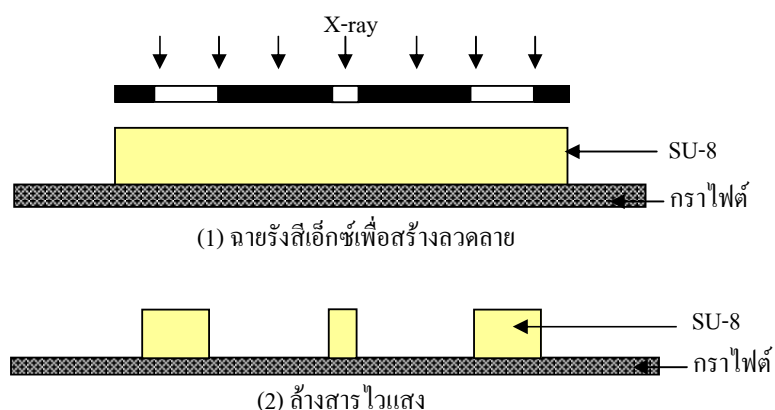
รูปที่ 5.46 หลังสกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาสำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะสองชั้นยึด  
กับกระจกด้วยอิมพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

หลังสิ้นกระบวนการดังกล่าว พบว่าก่อนที่จะแยกกระจกออกจากชิ้นงาน มีผิวหน้าของ SU-8 สัมผัสกับกระจกอยู่ทำให้เมื่อทำการดูดอากาศบริเวณดังกล่าวเกิดสัมผัสกันแน่น การแกะกระจกออกจึงทำด้วยความลำบากเพราะกระจกมีความแข็งไม่ยืดหยุ่นตัว และมีอีกหนึ่งปัญหาคือขณะขัดคราไฟต์ก็จะทำให้เนื้อของ SU-8 สัมผัสกับกระจกได้แน่นยิ่งขึ้นเช่นกัน เพราะเกิดแรงกระแทกกับแรงกดระหว่างหน้าสัมผัสทั้งสอง ส่งผลเสียต่อโครงสร้างสเตเตอร์ก่อนที่จะนำไปยึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วย AZ1512 นอกจากนี้ยังมีข้อเสียของการเคลือบโลหะสองด้านคือ หลังล้างสารไวแสงจะมีเศษโลหะตกค้างอยู่ที่ฐานรอง ไม่สามารถกำจัดด้วยการพลาสมาได้จึงต้องหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวด้วยแนวทางและกระบวนการสร้างแบบใหม่

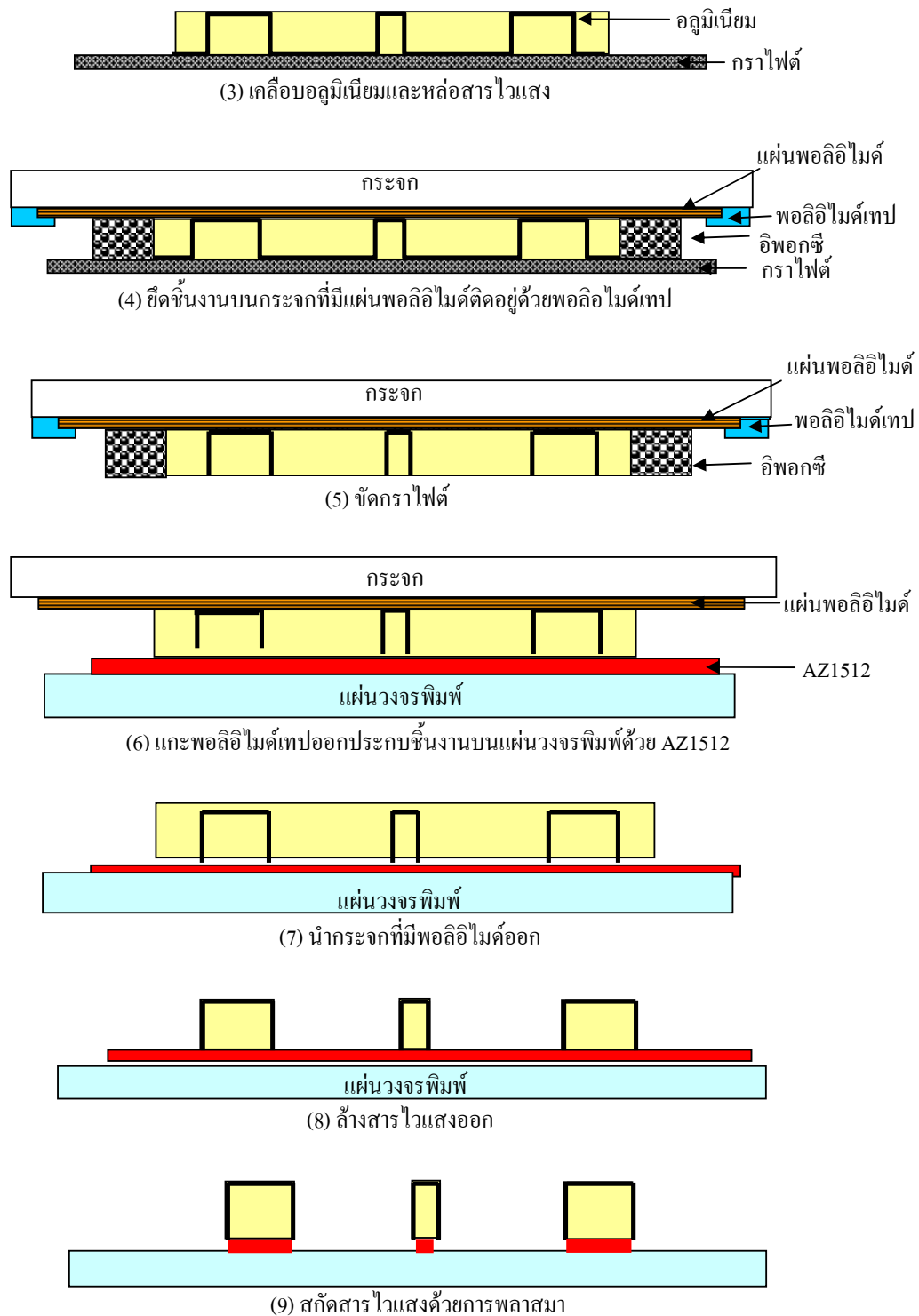
### 5.3.4 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าหนึ่งชั้นบนแผ่นวงจรพิมพ์เชื่อมติดด้วย AZ1512

#### 5.3.4.1 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิดด้วยอิมพอกซ์ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

จากปัญหาในงานที่ผ่านมาคือการเคลือบโลหะครั้งที่สองเพื่อเป็นการป้องกันน้ำยาล้างสารไวแสงของ SU-8 ลงไปถึง AZ1512 แต่กลับทำให้เกิดเศษโลหะตกค้าง เข้าไปยึดกับฐานรองทำให้ไม่สามารถสกัดด้วยพลาสมาได้ จึงต้องเปลี่ยนแนวการสร้างเพื่อปรับปรุงวิธีการเอากระจกที่มีผิวสัมผัสกับชิ้นงานหลังจากขัดคราไฟต์ออก จึงทดลองกระบวนการดังรูปที่ 5.47 ด้วยการเพิ่มพอลิอิมิดคั่นกลางระหว่างกระจกกับผิวของชิ้นงาน



รูปที่ 5.47 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิดด้วยอิมพอกซ์ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512



รูปที่ 5.47 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอไมด์ด้วยอีพอกซี ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 (ต่อ)



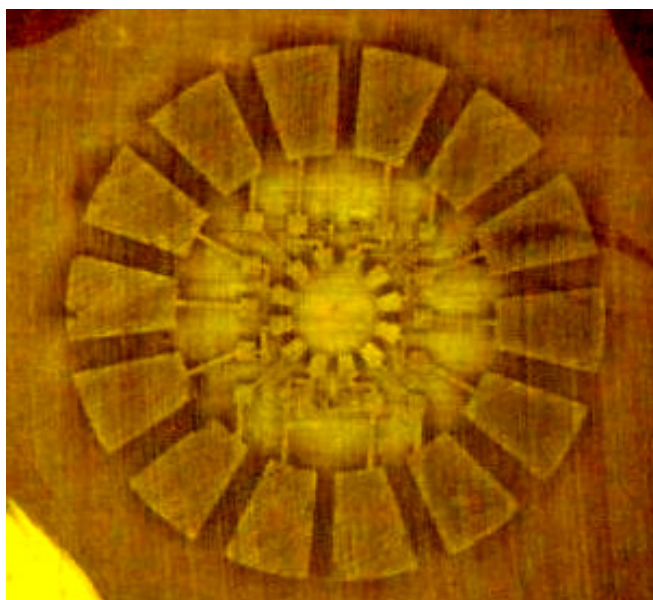
กระบวนการสร้างสเตเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าวมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดฐานรองกราฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำปลอดไอออนแล้วหล่อสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนฐานรอง จากนั้นจัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 320  $\mu\text{m}$  นำชิ้นงานที่ทำการจัดเรียบแล้วฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากดูดซับรังสีเอ็กซ์ ด้วยพลังงานเท่ากับ 18392  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนขณะดำเนินการฉายแสง 94.1150 mA ใช้เวลา 4 นาที กับ 19 วินาที ที่ความดัน  $1.2 \times 10^{-2}$  torr แล้วทำการอบหลังฉายแสงที่  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน

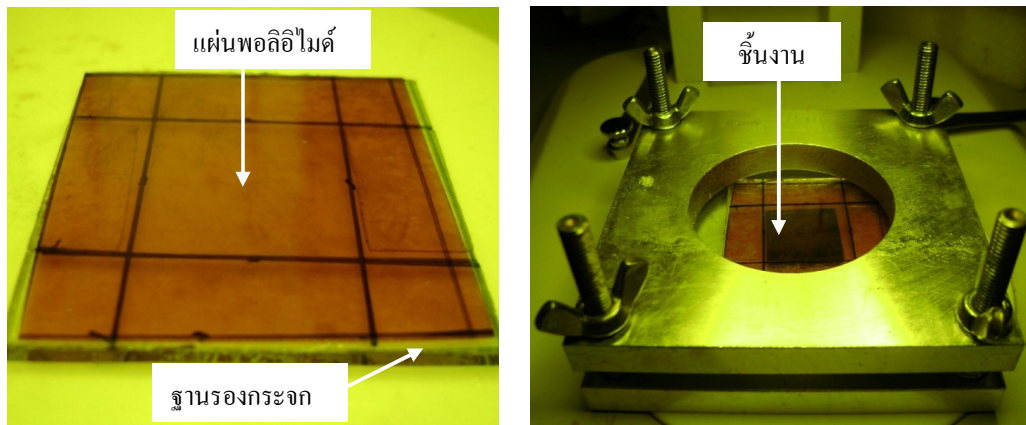
2. ทำการล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับเมกะโซนิค แล้วปล่อยให้แห้งและอบที่  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนอีกครั้ง

3. เคลือบโพลีเอทิลีนไปบนสเตเตอร์ด้วยเครื่องสปัตเตอร์เพื่อให้บริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้า ด้วยกำลัง 200 W อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 8 นาที ความดัน  $1.3 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนา 0.12  $\mu\text{m}$  หล่อ SU-8 บนชิ้นงานอีกครั้งในพื้นที่  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  น้ำหนัก 100 mg ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  แล้วจัดเรียบเหลือ 320  $\mu\text{m}$

4. ทากาวอีพอกซีบริเวณขอบของชิ้นงานและทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจก ที่มีแผ่นพอลิไมด์หนา 125  $\mu\text{m}$  ติดด้วยพอลิไมด์เทปรองรับอยู่ จากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงาน ต่อเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กาวแห้ง ดังรูปที่ 5.48



(ก) หลังเคลือบโพลีเอทิลีนและหล่อสารไวแสง SU-8

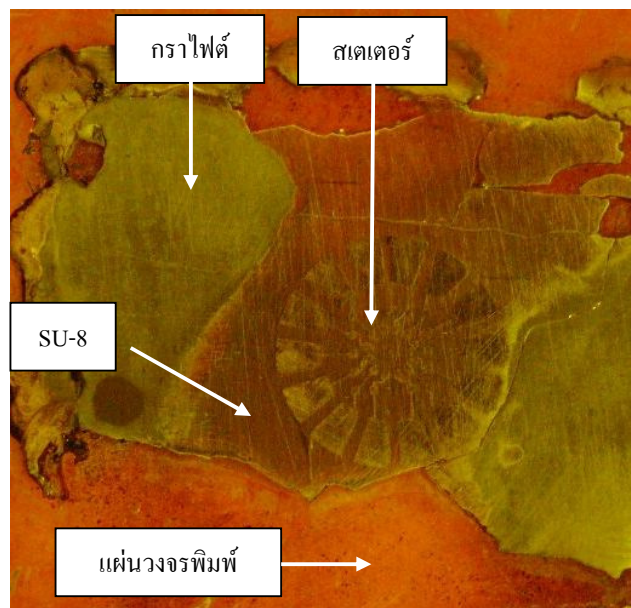


(ข) แผ่นพอลิอิมิด์บนกระฉก

(ค) ประกอบชิ้นงานเพื่อดูอากาศ

รูปที่ 5.48 หลังติดชิ้นงานบนพอลิอิมิด์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิด์ ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

5. ทำการขัดกราฟไฟต์ออกดังรูปที่ 5.49 แล้วแกะกาอ็อกซีออก

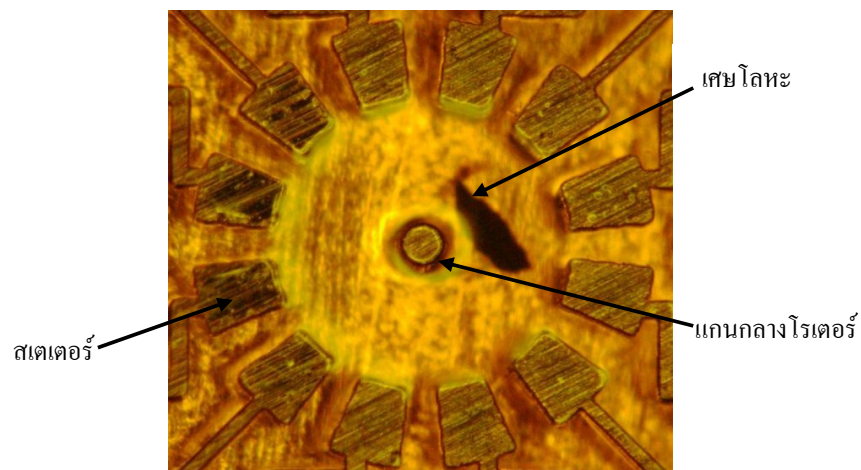


รูปที่ 5.49 หลังขัดกราฟไฟต์ออกสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิด์ ด้วยอ็อกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

6. หยอดสารไวแสง AZ1512 ลงบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์แล้วประกบชิ้นงานทับลงไป ดูดอากาศเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ความดัน  $4.6 \times 10^{-6}$  torr
7. นำที่ประกบชิ้นงานออกพร้อมกับกระจก
8. ล้างสารไวแสงด้วยน้ำยา SU-8 developer เป็นเวลา 5 นาที ได้ผลดังรูปที่ 5.50 แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง



(ก) ก่อนล้างสารไวแสง

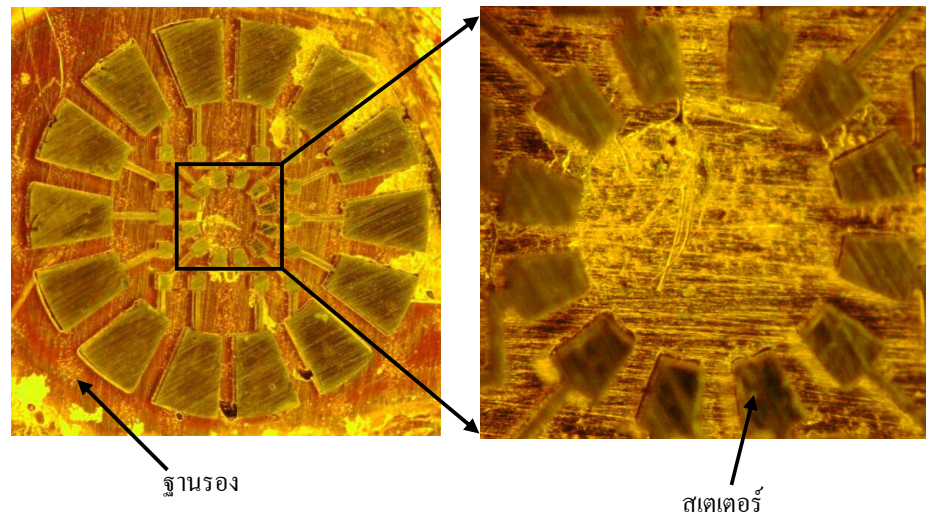


(ข) หลังล้างสารไวแสง

รูปที่ 5.50 ก่อนและหลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิด์ด้วยอิมพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512



9. สกัดสารไวแสงด้วยการพลาสมาที่กำลัง RF 200 W ด้วยแก๊สออกซิเจน และ  $CF_4$  เป็นเวลา 40 นาที ได้ผลดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 หลังการพลาสมาสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับพอลิอิมิดด้วยอิมพอกซี ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการดังกล่าวพบว่าวิธีนี้สามารถแก้ไขปัญหาการสัมผัสผิวหน้าของกระจกกับชิ้นงานทำให้สามารถแกะชิ้นงานออกจากกระจกได้เป็นอย่างดี แต่แผ่นพอลิอิมิดยังคงค่อนข้างแข็งอยู่ การถอดระหว่างที่ดึงออกจากบริเวณผิวสัมผัสกับชิ้นงานได้ไม่ดี หากใช้วัสดุที่อ่อนตัวกว่าพอลิอิมิดจะช่วยให้สามารถแกะชิ้นงานหลังจากทำการขัดกราไฟต์ได้ดียิ่งขึ้นจึงได้ดำเนินการในหัวข้อถัดไป

#### 5.3.4.2 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอิมพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

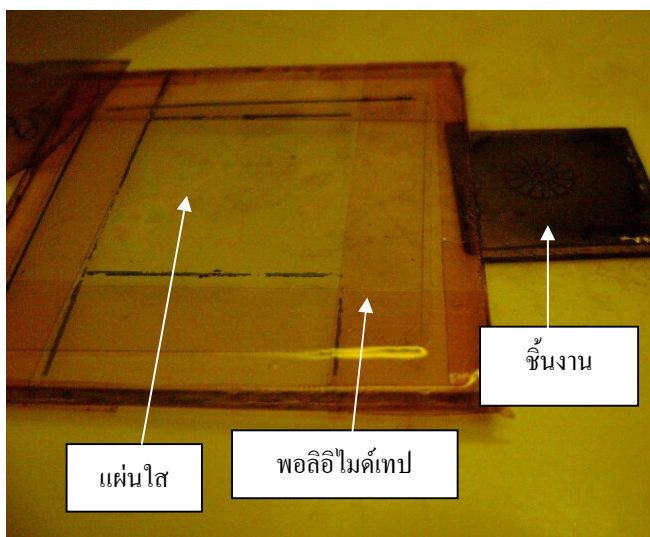
จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าการใช้แผ่นพอลิอิมิดเป็นตัวกั้นกลางระหว่างชิ้นงานกับกระจกทำให้แกะชิ้นงานออกจากกระจกเพื่อนำไปประกอบบนแผ่นวงจรพิมพ์ได้ แต่ยังไม่ดีพอ เนื่องจากแผ่นพอลิอิมิดยังคงค่อนข้างแข็งเกิดความเสียหายต่อสเตเตอร์จึงทำการเปลี่ยนมาใช้แผ่นใสซึ่งมีกระบวนการเดียวกับหัวข้อย่อยที่ 5.3.4.1 มีกระบวนการสร้างโดยละเอียดดังนี้

1. ทำความสะอาดฐานรองกราฟิต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำปอลดไอออนแล้ว หล่อสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนฐานรอง จากนั้นขัดเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 320  $\mu\text{m}$  นำชิ้นงานที่ทำการขัดเรียบแล้วฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากาคูดซ์รังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 19034.122  $\text{mJ}/\text{cm}^3$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนขณะดำเนินการฉายแสง 106.80 mA ใช้เวลา 3 นาที 51 วินาที ที่ความดัน  $3.3 \times 10^{-4}$  torr แล้วทำการอบหลังฉายแสงที่  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน

2. ทำการล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับเมกะโซนิคแล้วปล่อยให้แห้งจากนั้นอบที่อุณหภูมิ  $95^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนอีกครั้ง

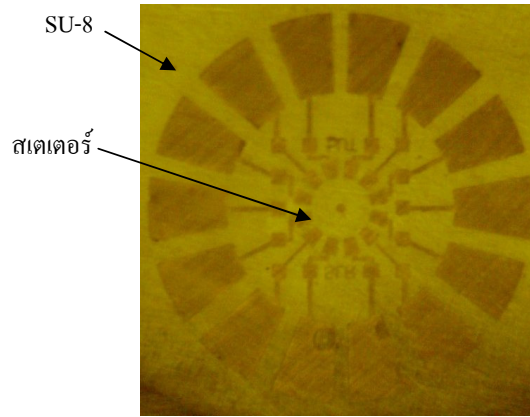
3. เคลือบโลหะอลูมิเนียมลงบนสเตเตอร์บริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้าที่กำลัง 200 W อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 8 นาที ความดัน  $1.3 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนา 0.12  $\mu\text{m}$  หลอม SU-8 บนชิ้นงานในพื้นที่  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  น้ำหนัก 100 mg ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  แล้วขัดเรียบให้ได้ความหนา 320  $\mu\text{m}$

4. ทากาวอีพอกซีบริเวณขอบของชิ้นงานและทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจกที่มีแผ่นใสยึดด้วยพอลิอิมิดเทปรองรับอยู่ จากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ประกบชิ้นงาน ต่อเป็นเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.52 หลังยึดชิ้นงานบนแผ่นใสสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรมพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

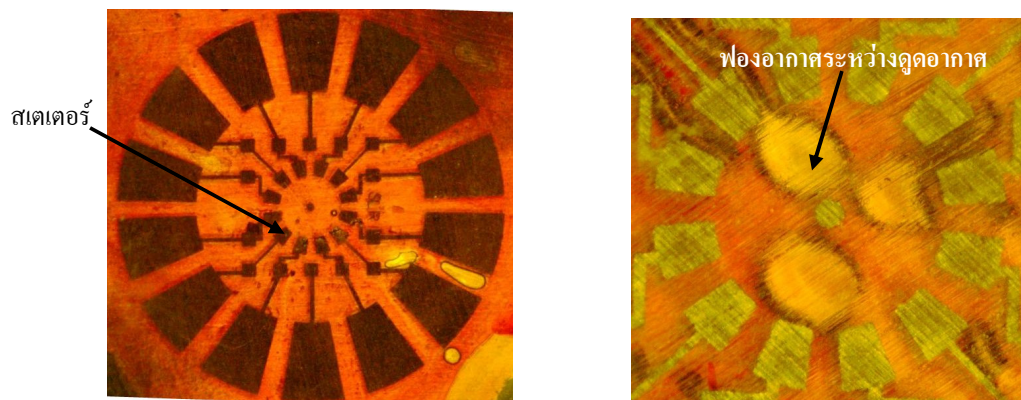
### 5. ทำการขัดกราไฟต์ออกดังรูปที่ 5.53



รูปที่ 5.53 หลังขัดกราไฟต์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอียอกซี ก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

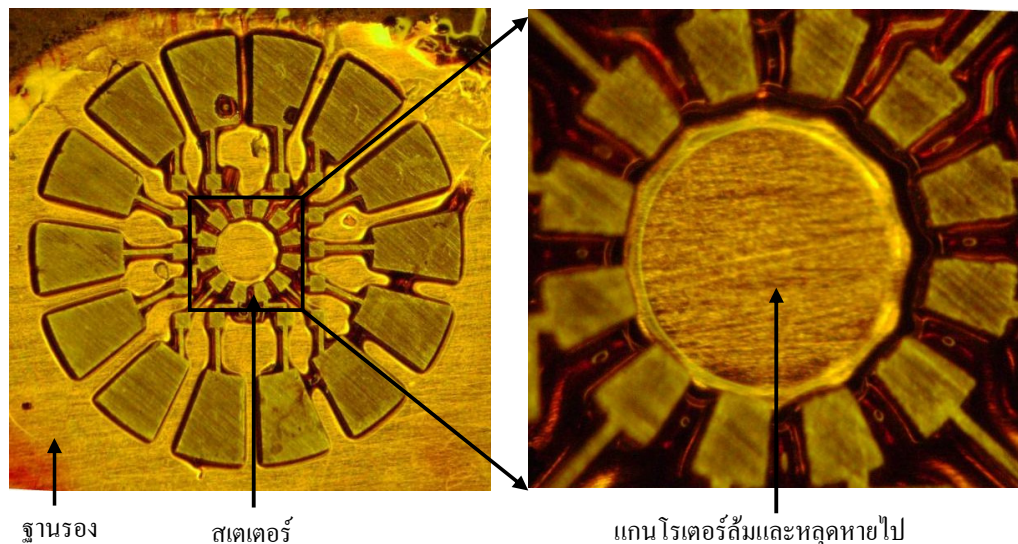
6. ทากาวอียอกซีบริเวณขอบของชิ้นงานและทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจกที่มีแผ่นใสยึดด้วยพอลิอิมิด์ที่ปรองรับอยู่ จากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ประกบ

7. หยดสารไวแสง AZ1512 บนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์แล้วประกบชิ้นงานลงไปด้วยอุปกรณ์ประกบชิ้นงานพร้อมกับดูดอากาศเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ความดัน  $4.6 \times 10^{-6}$  torr ดังรูปที่ 5.54



รูปที่ 5.54 หลังยึดชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอียอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสาร ไวแสง AZ1512

8. นำที่ประกบชิ้นงานออกพร้อมกับกระจก
9. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 3 นาที พร้อมกับเมกกะโซนิค แกนโรเตอร์เกิดลึกลงเป็นดังรูปที่ 5.55 จากนั้นปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 5.55 หลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอโฟกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512

จากกระบวนการสร้างดังกล่าวพบว่าแผ่นใสทำหน้าที่แทนแผ่นพอลิไมด์ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากขณะที่เอาแผ่นใสออกก่อนที่จะทำการล้างสารไวแสงแผ่นใสมีความอ่อนตัวมากกว่าทำให้สามารถแกะออกจากผิวสัมผัสกับชิ้นงานได้โดยง่าย เหมาะสำหรับนำมาเป็นฐานยึดติดของชิ้นงานก่อนขึ้นคราฟต์ แต่กระบวนการนี้ยังพบปัญหาเนื่องจากการล้างสารไวแสงคือหากใช้เวลานานเกินไปน้ำยาล้าง SU-8 จะเข้าไปทำลาย AZ1512 ซึ่งใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างชิ้นงานกับแผ่นวงจรพิมพ์ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการหาวิธีสำหรับการล้างสารไวแสงให้เหมาะสม เพราะแกนโรเตอร์มีขนาดเล็กและลึกลงได้โดยง่าย

#### 5.3.4.3 การสร้างสเตเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอโฟกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์

กระบวนการโดยละเอียด เหมือนกับกระบวนการในหัวข้อย่อย 5.3.4.2 ต่างกันตรงที่ได้เพิ่มขั้นตอนการล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



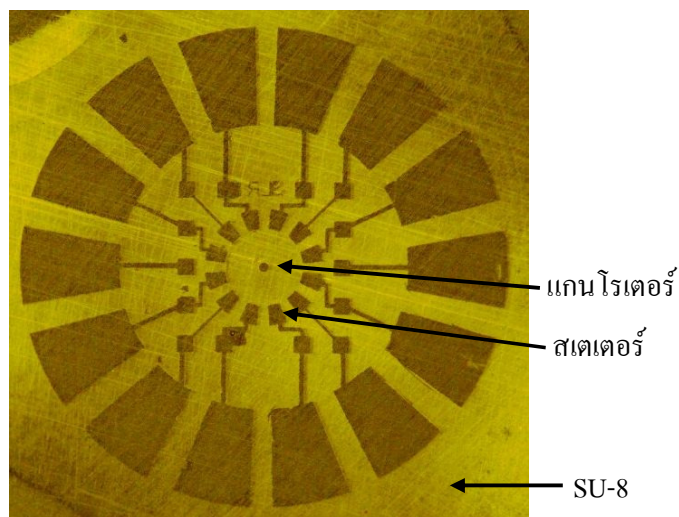
1. ทำความสะอาดฐานรองกราฟต์ด้วยการชุบเปอร์โซนิคในน้ำปอดไอออน หล่อสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนฐานรอง แล้วขัดผิวเรียบให้ได้ด้วยความหนาประมาณ 320  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการขัดเรียบแล้ว ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากเงินคูดซ์บรังสี ด้วยค่าพลังงานประมาณ 19000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (Acc.BottomBright) กระแสลำอิเล็กตรอนขณะดำเนินการฉายแสง 106.81 mA ใช้เวลาเท่ากับ 3 นาที 51 วินาที ที่ความดัน  $3.3 \times 10^{-4}$  torr แล้วทำการอบหลังฉายแสงที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อน

2. ทำการล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 20 นาที พร้อมกับเมกะโซนิค จากนั้นล้างสารไวแสง 95°C เป็นเวลา 15 นาที บนแผ่นความร้อนอีกครั้ง

3. เคลือบโลหะอลูมิเนียมลงไปบนสเตเตอร์เพื่อให้สารไวแสงบริเวณดังกล่าวนำไฟฟ้าที่กำลัง 200 W อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 SCCM เป็นเวลา 8 นาที ความดัน  $1.8 \times 10^{-2}$  torr ได้ความหนา 0.12  $\mu\text{m}$  หลอม SU-8 บนชิ้นงานในพื้นที่  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  น้ำหนัก 100 mg ได้ความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  แล้วขัดเรียบเหลือ 320  $\mu\text{m}$

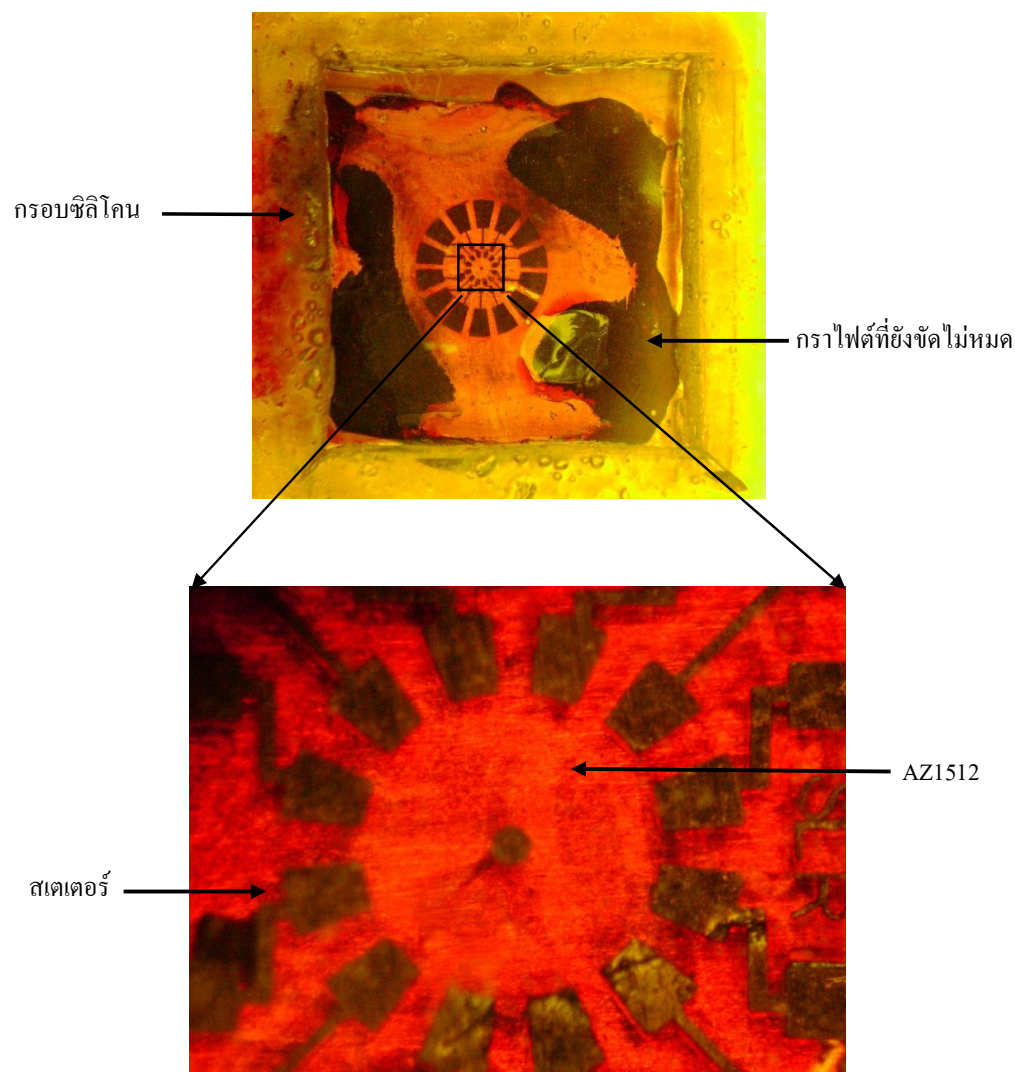
4. ทากาวอีพอกซีบริเวณขอบของชิ้นงานและทำการประกบชิ้นงานลงบนฐานรองกระจก ที่มีแผ่นพอลิอิมิด์ยึดด้วยพอลิอิมิด์เทปจากนั้นกดทับด้วยอุปกรณ์ยึดชิ้นงานต่อเป็นเวลา 30 นาที

5. ทำการขัดกราฟต์ออกได้ผลดังรูปที่ 5.56



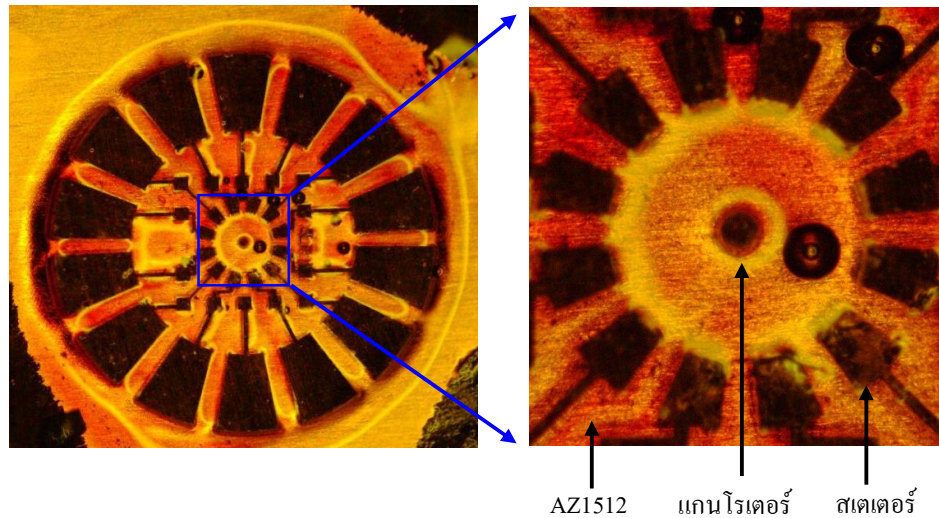
รูปที่ 5.56 หลังขัดกราฟต์สำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์

6. หยดสารไวแสง AZ1512 บนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วประกอบชิ้นงานทับลงไปพร้อมกับยึดด้วยอุปกรณ์ประกอบชิ้นงานแล้วดูอากาศเพื่อให้ชิ้นงานแห้ง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ที่ความดันประมาณ  $1.6 \times 10^{-6}$  torr ดังรูปที่ 5.57

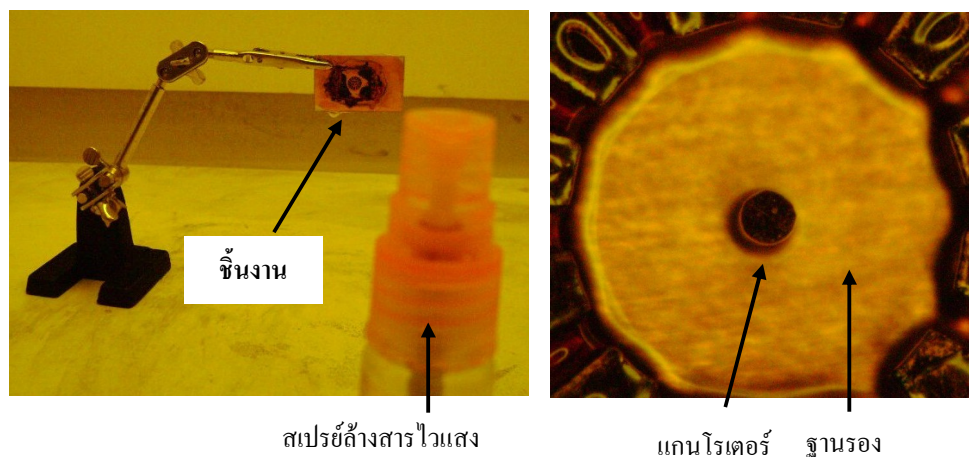


รูปที่ 5.57 ประกอบชิ้นงานบนแผ่นวงจรพิมพ์สำหรับ โครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วยกาวอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสง AZ1512 และล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์

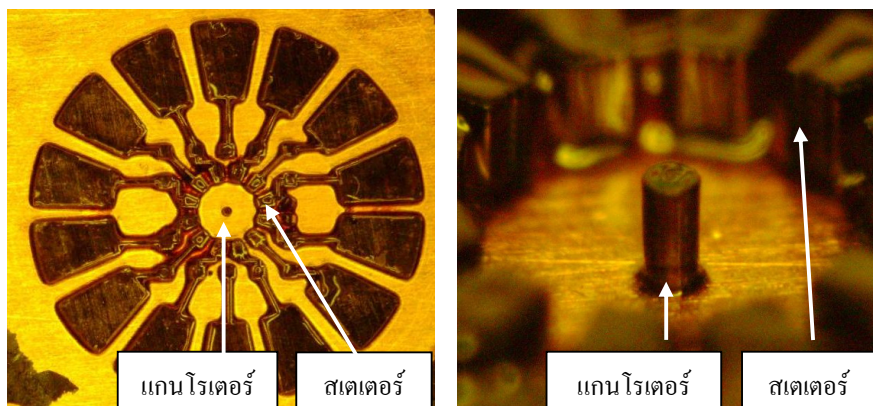
8. ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer เป็นเวลา 5 นาที ดังรูปที่ 5.58 (ก) แต่ SU-8 ยังไม่สามารถกำจัดหมดได้ จึงใช้น้ำล้างสารไวแสงที่เป็นสเปรย์พ่นอีก 2 นาที ปริมาตร 40 CC แล้วพักให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นอบ 65°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สลับกับการล้างสารไวแสงเช่นนี้ 2 ถึง 3 ครั้งหรือจนกว่าจะแน่ใจว่า SU-8 ไม่หลงเหลืออยู่พร้อมกับไม่ทำลาย AZ ที่เป็นตัวยึดกับฐานรองกับ โครงสร้างชิ้นงานทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.58 (ข) ถึง รูปที่ 5.58 (ค)



(ก) หลังล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer



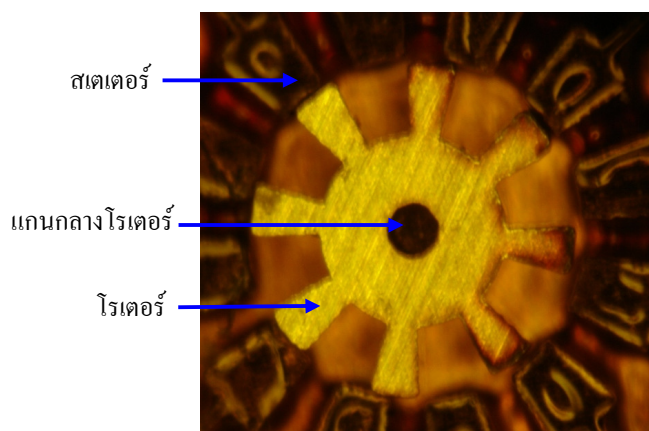
(ข) ล้างสารไวแสงด้วย SU-8 developer แบบสเปรย์



(ค) หลังล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์

รูปที่ 5.58 หลังล้างสารไวแสงสำหรับโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะยึดกับแผ่นใสด้วย กาวอีพอกซีก่อนวางบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เชื่อมติดด้วยสารไวแสงAZ1512 และ ล้างสารไวแสงด้วยสเปรย์

จากกระบวนการที่ผ่านมาพบว่า การแก้ปัญหาการล้างสารไวแสงได้ผลดี เมื่อใช้สเปรย์พ่นวิธีดังกล่าวจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการนำไปสร้างสเตเตอร์และเมื่อได้โรเตอร์กับ สเตเตอร์ที่สมบูรณ์แล้ว จากนั้นนำชิ้นส่วนทั้งสองสวมเข้ากันเพื่อทดสอบการทำงานต่อไป แสดงผล การสวมโรเตอร์กับสเตเตอร์ดังรูปที่ 5.59



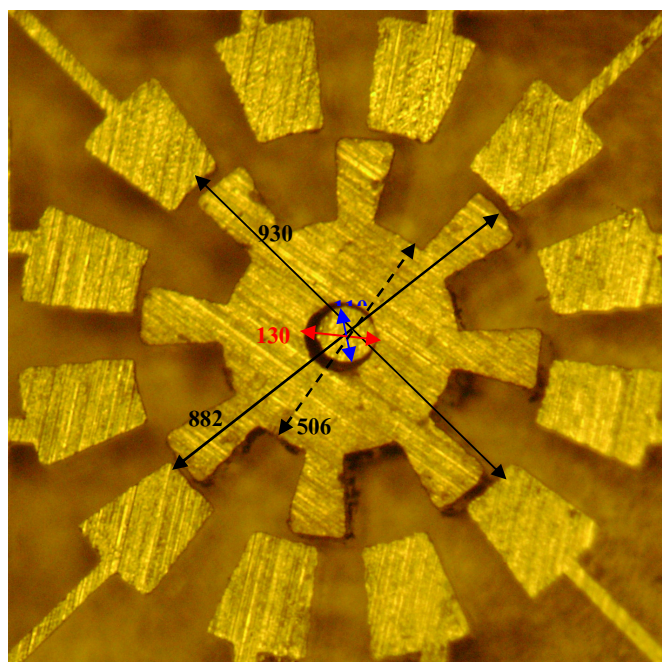
รูปที่ 5.59 การสวมสเตเตอร์กับโรเตอร์สำหรับการสร้างมอเตอร์จุลภาคด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบโลหะนำไฟฟ้า



หลังจากได้โครงสร้างของมอเตอร์จุลภาคที่สมบูรณ์แล้วได้ทำการวัดขนาดของจริงหลังจากสร้างเสร็จด้วยกล้อง JEM 2010 light microscope มีขนาดของพารามิเตอร์ที่ทำการวัดเป็นดังรูปที่ 5.60 และได้ขนาดพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.1

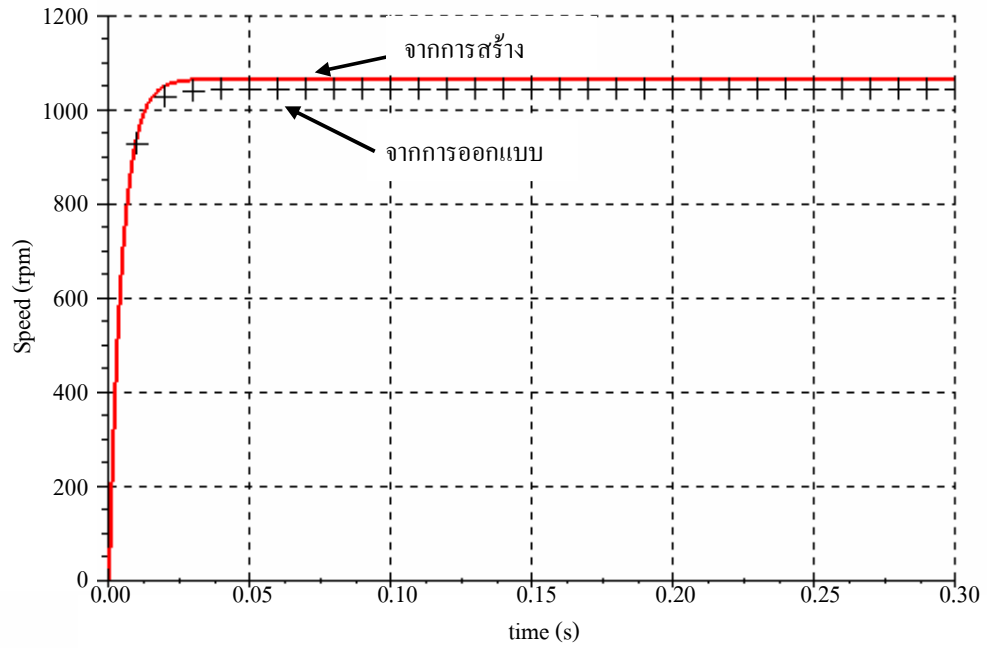
ตารางที่ 5.1 ขนาดพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ออกแบบและได้จากการวัด

พารามิเตอร์	$R_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_3$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_4$ ( $\mu\text{m}$ )	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	h ( $\mu\text{m}$ )
ขนาดออกแบบ	58	250	443	468	$18^\circ$	$12^\circ$	$27^\circ$	$18^\circ$	-
ขนาดจริง	65	253	441	465	$18^\circ$	$12^\circ$	$27^\circ$	$18^\circ$	300

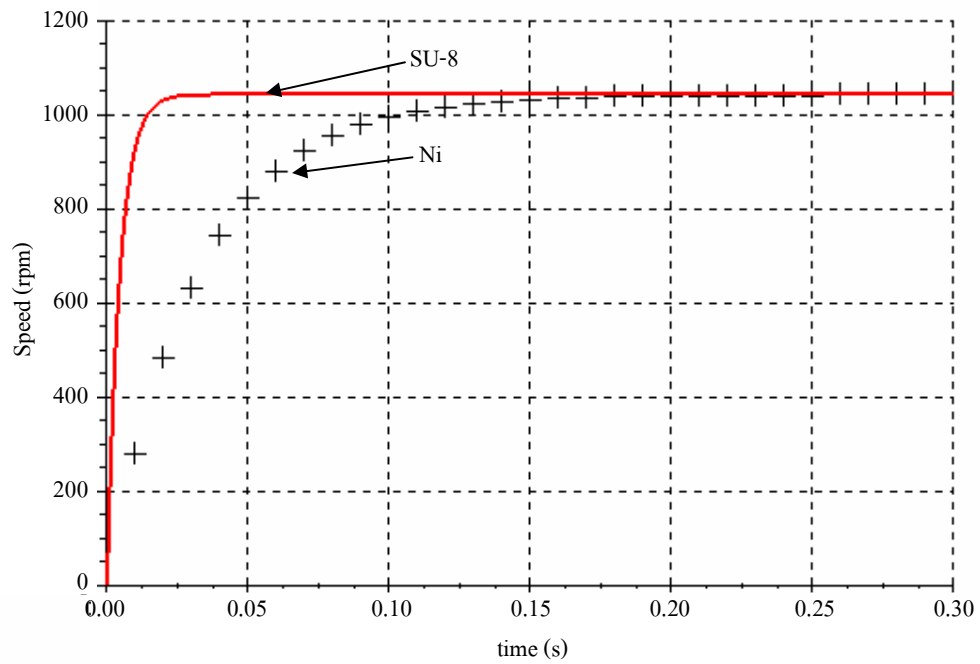


รูปที่ 5.60 ขนาดของมอเตอร์จุลภาคโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าที่สร้างเสร็จ

เมื่อได้ขนาดพารามิเตอร์ของมอเตอร์จุลภาคที่สมบูรณ์แล้วต่อไปเป็นการจำลองการตอบสนองต่อแรงดันอินพุต โดยเปรียบเทียบการจำลองผลการตอบสนองระหว่างโครงสร้างที่ออกแบบและโครงสร้างที่สร้างสำเร็จดังรูปที่ 5.61 ซึ่งโครงสร้างเป็น SU-8 และรูปที่ 5.62 เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างของนิกเกิลและ SU-8



รูปที่ 5.61 ผลการจำลองการตอบสนองของมอเตอร์จากโครงสร้างจริงกับ โครงสร้างที่ออกแบบ



รูปที่ 5.62 เปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของมอเตอร์ระหว่าง โครงสร้างนิกเกิลกับ SU-8

จากผลการจำลองพบว่าความเร็วของมอเตอร์ทั้งแบบโครงสร้างของมอเตอร์จูลภาคทั้งที่ได้จากการออกแบบและการสร้างจริงมีค่าห่างกันเล็กน้อยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการสร้างและการเปรียบเทียบผลการจำลองมอเตอร์จูลภาคโครงสร้างที่เป็นนิกเกิลและพอลิเมอร์พบว่ามีความเร็วเท่ากันแต่แตกต่างกันตรงที่เวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวโดยนิกเกิลจะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวช้ากว่าพอลิเมอร์ โดยโครงสร้างนิกเกิลมีระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว 0.16 วินาที และมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่า  $7.105 \times 10^{-14} \text{ kg-m}^2$  ส่วนโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์มีระยะเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวประมาณ 0.026 วินาที และมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่า  $1 \times 10^{-14} \text{ kg-m}^2$  เนื่องจากนิกเกิลมีความหนาแน่นมากกว่าพอลิเมอร์ประมาณ 7 เท่า

#### 5.4 สรุป

บทที่ 5 เป็นกระบวนการสร้างและการพัฒนามอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต แสดงให้เห็นถึงปัญหาและการแก้ไขปัญหาในรูปแบบต่าง ๆ เรื่อยมาจนกระทั่งได้ผลที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ถ้าหากแบ่งตามวัสดุการขึ้นรูปแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือการขึ้นรูปด้วยโครงสร้างที่เป็นโลหะและโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบ โลหะนำไฟฟ้าซึ่งพบว่า การสร้างมอเตอร์จูลภาคที่ขึ้นรูปด้วยโลหะนั้นจะเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยากในส่วนของ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าและการสกัดสารไวแสงที่ตกค้าง สิ้นเปลืองเวลามาก ส่วนโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์นั้นสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว น้ำหนักเบา แต่ก็ป็นสาเหตุที่ทำให้โครงสร้างไม่แข็งแรงและเสียหายง่ายเช่นกัน และสุดท้ายเป็นผลการจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของความเร็วที่ได้จากการสร้างและออกแบบ อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงสร้างที่เป็นนิกเกิลและพอลิเมอร์เคลือบ โลหะนำไฟฟ้า และในบทต่อไปจะเป็นการนำเสนอการควบคุม การทดสอบมอเตอร์จูลภาคในงานวิจัย

## บทที่ 6

### การทดสอบและผลการทดสอบ

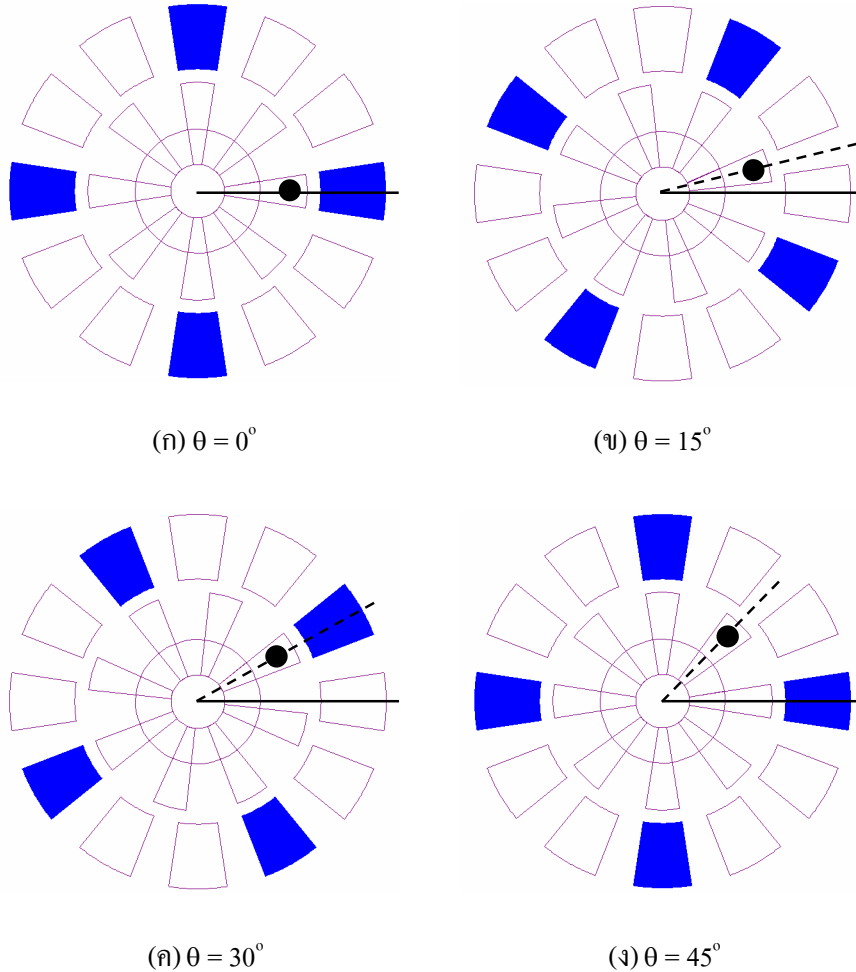
หลังจากได้ทำการสร้างและพัฒนากระบวนการผลิตมอเตอร์จุลภาค จนเสร็จสิ้นพร้อมกับการทำการจำลองผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบ ต่อไปจะเป็นการนำเสนอการทดสอบมอเตอร์จุลภาค ที่ได้จากการสร้าง การทดสอบจะเป็นการป้อนแรงดันสูงกระตุ้นที่ขั้วของสเตเตอร์เพื่อให้โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่จากแรงไฟฟ้าสถิต ด้วยการปรับขนาดของแรงดันและความถี่ ที่สามารถทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ ซึ่งต้องอาศัยการเชื่อมต่อสาย การสร้างวงจร และท้ายสุดเป็นการเขียนโปรแกรมควบคุม

#### 6.1 วงจรควบคุม

การควบคุมหรือการกระตุ้นอุปกรณ์ประเภทไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปแล้วแรงดันสำหรับควบคุมมีค่าสูงอยู่ในช่วงประมาณ 0 V-1000 V กระแสมีค่าต่ำอยู่ในช่วง 1  $\mu$ A-5 mA โดยมากแล้วจะมีโพลเป็นลักษณะตัวเก็บประจุ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 1 pF-50 pF การทดสอบการทำงานของมอเตอร์จะเป็นการทดสอบป้อนแรงดันให้แก่ขั้วสเตเตอร์ ซึ่ง 1 เฟส มีจำนวน 4 ขั้ว การควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้จะมีสัญญาณควบคุมคล้ายกับการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ ที่ป้อนความถี่สลับเฟสกันไปเรื่อย ๆ ในรูปที่ 6.1 แทนขั้วของสเตเตอร์ที่มีสี่ขั้ว คือขั้วที่ได้รับการกระตุ้นแรงดัน ส่วนที่เป็นจุดวงกลมบน โรเตอร์คือตำแหน่งของโรเตอร์ การควบคุมการหมุนของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะเป็นลักษณะการควบคุมแบบวงเปิด (Open loop) เนื่องจากการควบคุมดังกล่าวง่ายต่อการควบคุมและหากควบคุมแบบวงรอบปิด (Close loop) จะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเร็วได้ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่มีอุปกรณ์ดังกล่าว การควบคุมการหมุนจึงทำได้โดยการป้อนแรงดันให้กับสเตเตอร์สลับกันไปทีละเฟส หากต้องการให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา ทำได้โดยการป้อนแรงดันที่เฟส 1 เฟสที่ 2 และเฟส 3 ตามลำดับ และหากต้องการให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาทำการสลับทิศทางเดิม การทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ได้ 1 รอบหรือ 360° ต้องทำการป้อนสัญญาณพัลส์จำนวน 24 สเต็ป หรือ 8 คาบ เนื่องจากโรเตอร์หมุนสเต็ปละ 15° ยกตัวอย่าง เช่น หากป้อนแรงดันด้วยความถี่ 1 Hz หมายความว่าโรเตอร์จะหมุน 1/8 rps (รอบต่อวินาที) หรือ 7.5 rpm จึงสามารถสร้างสมการความเร็วที่สัมพันธ์กับความถี่ได้ดังสมการที่ (6.1) ทั้งนี้ความเร็วของมอเตอร์ยังขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตด้วยเพราะแรงดันจะเป็นตัวที่สร้างสนามไฟฟ้าระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณดังกล่าว มอเตอร์จึงจะสามารถเคลื่อนที่ได้ซึ่งความเร็วนั้นได้จากการจำลองผลทางระบบพลวัต

$$N_r = 7.5 f \quad (6.1)$$

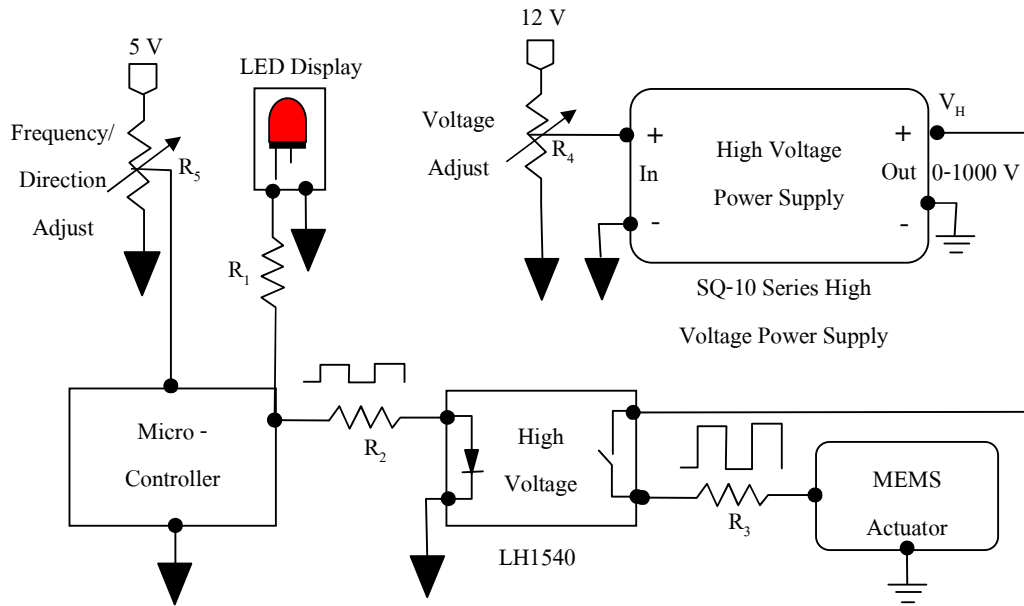
เมื่อ  $N_r$  คือ ความเร็วของโรเตอร์ (rpm)  
 $f$  คือ ความถี่ (Hz) ของแรงดัน



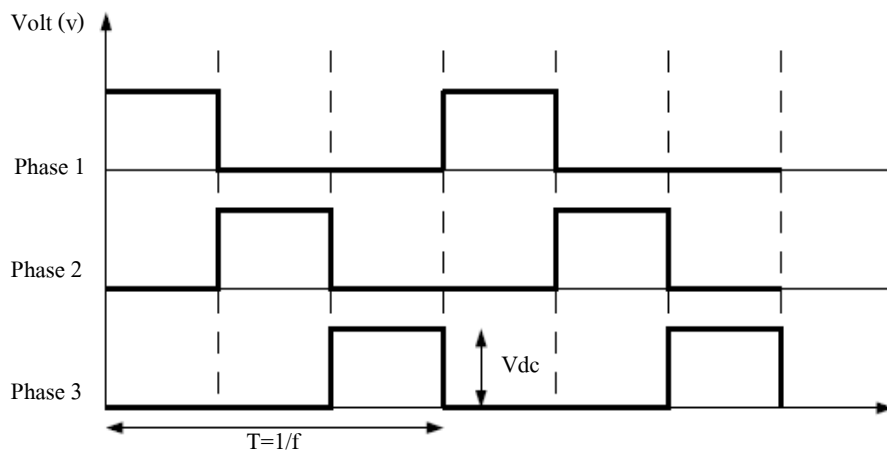
รูปที่ 6.1 การเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้น

วงจรขับมอเตอร์จุลภาคต้องเป็นวงจรที่สามารถสร้างแรงดันสูงและสามารถสร้างความถี่ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรที่สามารถจ่ายแรงดันตั้งแต่ 0-1000 V พร้อมกับปรับความถี่ ด้วยการ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างสัญญาณเพื่อเป็นสวิทช์ให้กับ โซลิดสเตตรีเลย์ชนิดแรงดันสูง (High voltage solid state relay) วงจรที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 6.2 (ก) ชุดขับ

มอเตอร์ประกอบด้วย แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง โปรแกรมควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์แสดงผลและโหลดซึ่งก็คือตัวขับเร้าหรือมอเตอร์จูลภาคนั่นเอง วงจรดังกล่าวเมื่อทำการทดสอบสร้างสัญญาณแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นลักษณะในรูปที่ 6.2 (ข)



(ก) แผนผังวงจรขับ



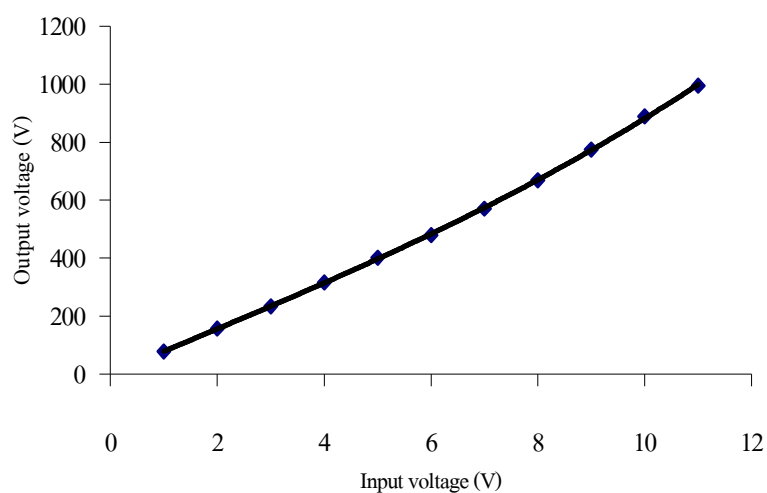
(ข) สัญญาณเอาต์พุต

รูปที่ 6.2 ชุดขับมอเตอร์จูลภาคนในงานวิจัย

เมื่อทำการทดสอบชุดแรงดันสูงได้ผลดังตารางที่ 6.1 และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตดังกล่าวเป็นดังรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบแรงดันอินพุตและเอาต์พุตของแหล่งจ่ายแรงดันสูง

แรงดันอินพุต	แรงดันเอาต์พุต			แรงดันเอาต์พุตเฉลี่ย
	ทดสอบครั้งที่ 1	ทดสอบครั้งที่ 2	ทดสอบครั้งที่ 3	
1	77.7	77.5	77.5	77.56
2	156.3	156.9	156.6	156.6
3	233.2	233	233.4	233.2
4	315.1	316.6	316.2	315.9
5	401.7	401.1	401.4	401.4
6	478.6	479.5	479.3	479.1
7	570.4	571.4	571.5	571.1
8	668	669	668	668.3
9	775	774	774	774.3
10	889	888	888	888.3
11	996	994	995	995



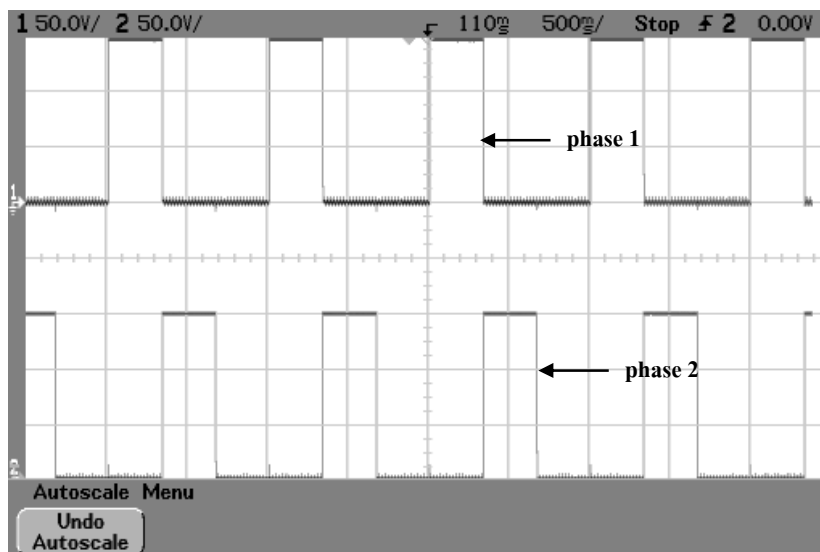
รูปที่ 6.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของชุดขับ

จากรูปที่ 6.2 ชุดขับแรงดันสูงสามารถอธิบายวงจรได้ดังนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่รับแรงดันอินพุตจากความต้านทานปรับค่าได้แล้วแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสัญญาณความถี่และทิศทางการหมุน แล้วส่งสัญญาณความถี่และทิศทางไปที่ตัวขับแรงดันสูง (LH1540) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อขับตัวขับเร้าจุลภาค โดยรับแรงดันสูงจากชุดแหล่งจ่ายแรงดันสูง (SQ-10 series high voltage power supply) มีแรงดันเอาต์พุตตั้งแต่ 0-1000 V ขนาดกำลัง 1 W และแรงดันอินพุตของชุดแหล่งจ่ายแรงดันสูงมีค่าตั้งแต่ 0-12 V ซึ่งใช้ความต้านทานปรับค่าได้เป็นตัวปรับแรงดันเช่นกัน จากการทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตเป็น

$$V_{out} = 0.1452V_{in}^3 - 0.3979V_{in}^2 + 77.527V_{in} + 1.1864 \quad (6.2)$$

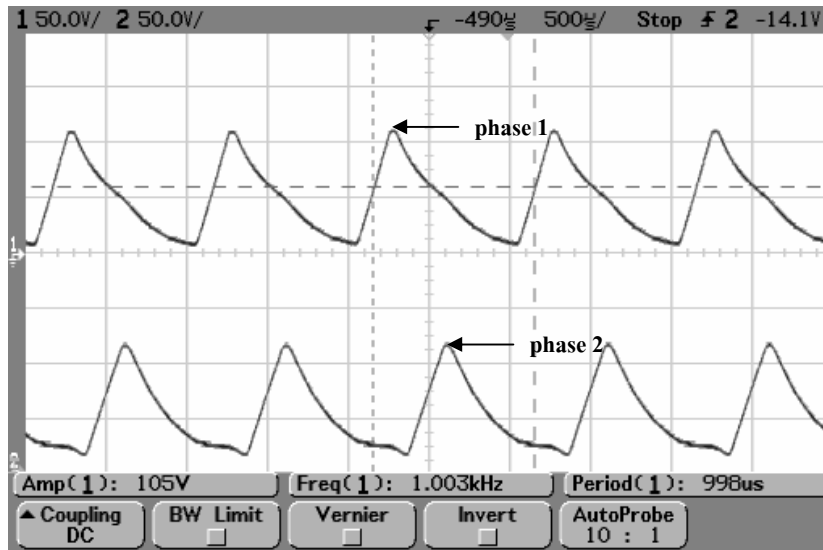
เมื่อ  $V_{in}$  คือ แรงดันอินพุต  
 $V_{out}$  คือ แรงดันเอาต์พุต

เมื่อได้ความสัมพันธ์แล้วจากนั้นทำการทดสอบและจับสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคปได้สัญญาณดังรูปที่ 6.4 มีขนาด 150 V



(ก) ความถี่ 1Hz





(ข) ความถี่ 1000 Hz

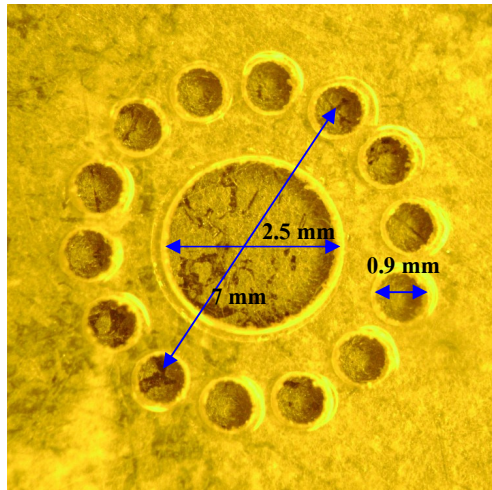
รูปที่ 6.4 สัญญาณแรงดันที่ได้จากชุดขับมอเตอร์อุตสาหกรรม

จากการทดสอบสร้างสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ เริ่มตั้งแต่ 1 Hz-1000 Hz ด้วยขนาดแรงดัน 150 V จะพบว่าที่ความถี่สูงมากกว่า 400 Hz ขึ้นไป ได้รูปสัญญาณที่มีความบิดเบี้ยวจนไม่สามารถที่จะคงค่าแรงดันไว้ที่ 150 V ได้ ดังนั้นชุดขับมอเตอร์นี้จึงเลือกใช้งานความถี่ได้เฉพาะช่วง 0-400 Hz หรือสามารถสร้างความเร็วมอเตอร์สูงสุดเท่ากับ 3000 rpm

## 6.2 การเชื่อมต่อของชิ้นงาน

เมื่อทำการสร้างมอเตอร์กระแสจลน์และนำโรเตอร์กับสเตเตอร์มาประกอบกันแล้ว สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไปคือ การเชื่อมต่อสายระหว่างมอเตอร์กับวงจรเนื่องจากมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าและมีขนาดของจุดเชื่อมต่อค่อนข้างเล็ก หากจะทำการบัดกรีหรือใช้เครื่องเชื่อมสายนั้นค่อนข้างลำบาก อีกทั้งโครงสร้างไม่แข็งแรงนัก นอกจากนี้ยังมีสารไวแสง SU-8 เคลือบผิวบาง ๆ บริเวณจุดเชื่อมต่อ ทำให้เกิดความยุ่งยากเพิ่มขึ้นสำหรับการเชื่อมสายด้วยวิธีดังกล่าว จึงได้หาวิธีเชื่อมต่อวงจรจากมอเตอร์ไปยังวงจรขับแรงดันสูง โดยการกลึงอะคลิลิกหนา 1 mm เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 mm เป็นช่องว่างสำหรับสวมโรเตอร์ และมีจำนวนจุดเชื่อมต่อ 14 จุดเท่ากับจำนวนจุดเชื่อมต่อบนสเตเตอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแต่ละจุด

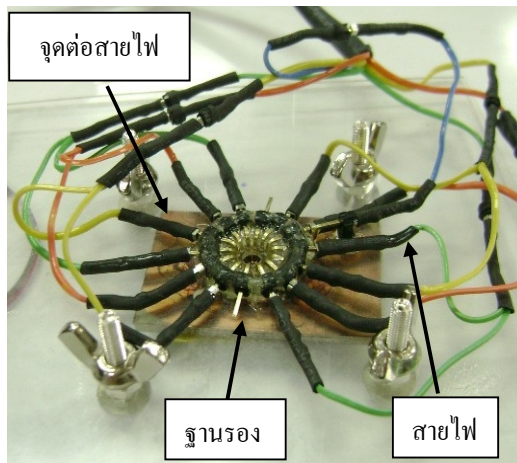
เท่ากับ 0.9 mm ดังรูปที่ 6.5 แล้วทำการกดทับอุปกรณ์ดังกล่าวให้แนบกับผิวจุดสัมผัส จากนั้นนำไป ประกอบเข้ากับวงจรจับในรูปที่ 6.6 เพื่อทำการป้อนแรงดันต่อไป



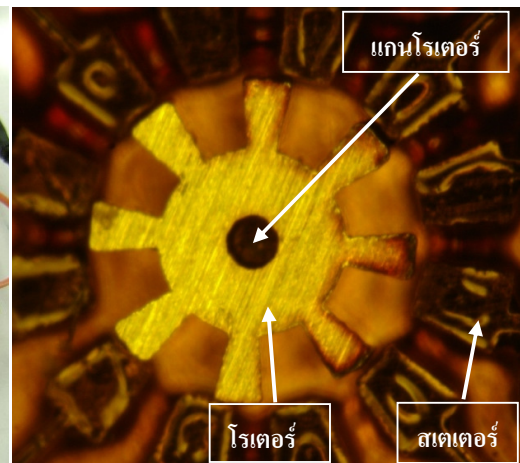
(ก) ก่อนลงขาเชื่อมจุดต่อ



(ข) หลังใส่จุดต่อสายไฟ

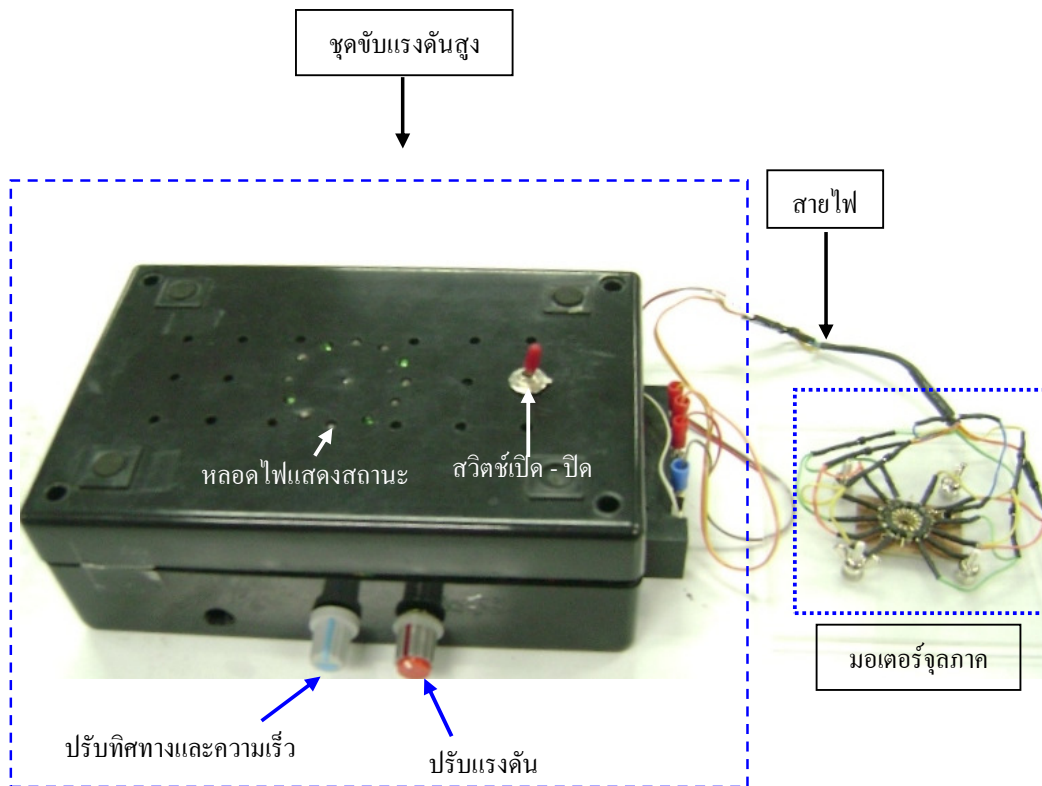


(ค) หลังเชื่อมต่อสายไฟ

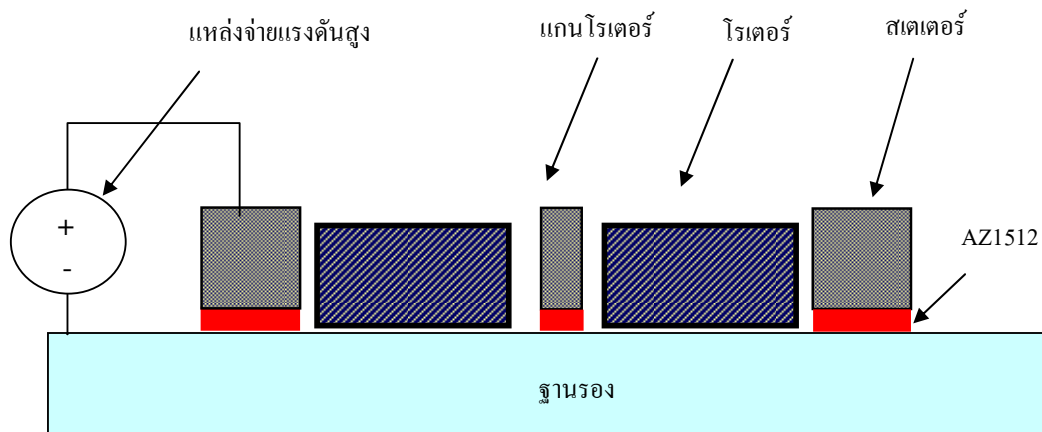


(ง) โรเตอร์สวมกับสเตเตอร์

รูปที่ 6.5 การเชื่อมต่อสายมอเตอร์จุลภาค



(ก) แหล่งจ่ายแรงดันสูงกับมอเตอร์จุลภาค



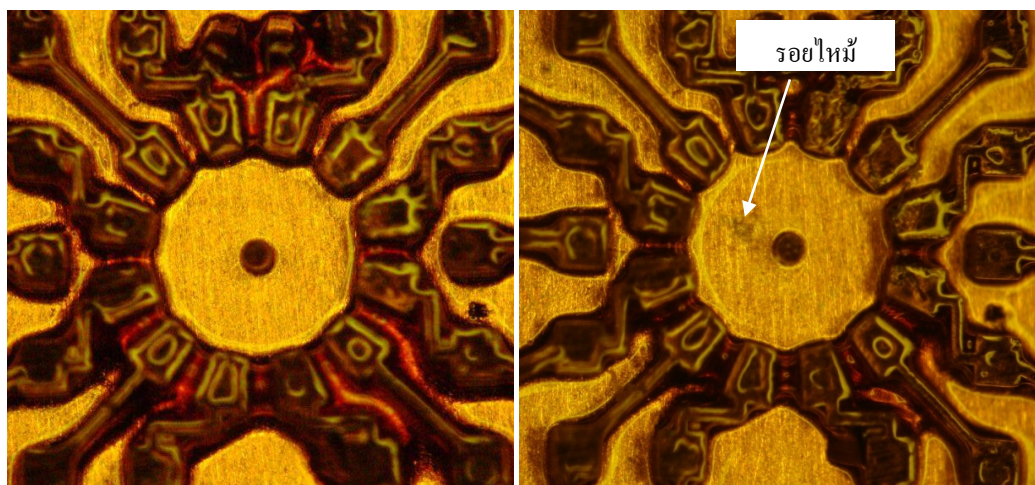
(ข) ภาพตัดขวางการต่อวงจร

รูปที่ 6.6 การเชื่อมสายมอเตอร์เข้ากับชุดขับแรงดันสูง

### 6.3 การทดสอบการเคลื่อนที่

การทดสอบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เบื้องต้นจะทำการทดสอบ โดยการป้อนแรงทางกล ด้วยการใส่กระดาษหรืออุปกรณ์ปลายแหลมสะกิดที่ใบพัดของโรเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนไปมาเพื่อสังเกตว่ามอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระไม่สัมผัสกับสเตเตอร์ด้านข้าง การทดสอบดังกล่าวพบว่าโรเตอร์สามารถหมุนได้อย่างอิสระ จากนั้นทำการทดสอบขั้นที่สองด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าที่ความดันประมาณ 1.5 psi สามารถทำให้มอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้

วิธีต่อมาเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดคือ การป้อนแรงดันแก่มอเตอร์จุลภาคเพื่อให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตที่ขั้วของโรเตอร์กับสเตเตอร์แล้วเกิดการเคลื่อนที่ โดยการป้อนแรงดันบวกเข้าที่ขั้วสเตเตอร์และแรงดันลบเข้าที่โรเตอร์ จากการทดลองทำการปรับแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึง 600 V ที่ความถี่ 2 Hz พบว่ามอเตอร์จุลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงรูปที่ 6.8 และยังพบว่าหลังจากที่ทำการป้อนแรงดันดังกล่าวพบว่าเกิดรอยไหม้ระหว่างโรเตอร์กับแผ่นฐานรองที่เป็นทองแดงดังรูป ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากการป้อนแรงดันมากเกินไป เนื่องจากบนแผ่นทองแดงยังมีเศษของสารไวแสง SU-8 ตกค้างอยู่บางส่วน เพราะกำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนากระบวนการสร้าง ทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างโรเตอร์กับแผ่นกราวด์มาก รวมทั้งโรเตอร์ยังไม่แนบสนิทกับพื้นกราวด์มากนักเนื่องจากยังมีเศษของพอลิเมอร์ดังกล่าวตกค้างอยู่ จึงต้องป้อนแรงดันมากกว่าปกติเพื่อให้โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้เป็นผลให้มีรอยไหม้ดังกล่าวขึ้น

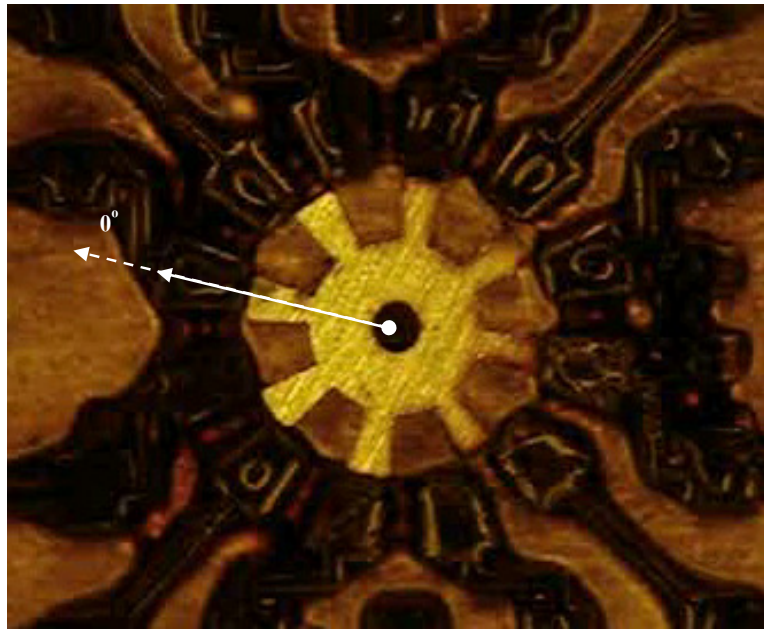


(ก) ก่อนป้อนแรงดัน

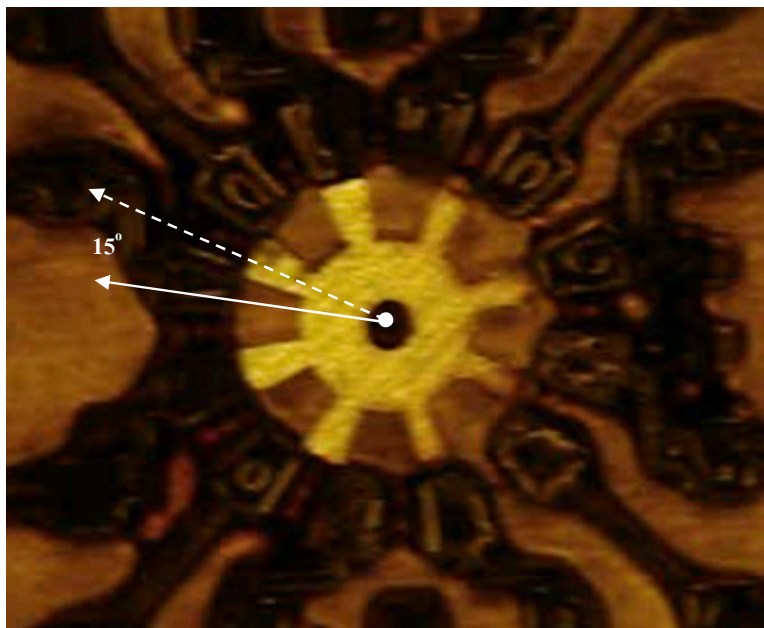
(ข) หลังป้อนแรงดัน

รูปที่ 6.7 กราวด์และสเตเตอร์ก่อนและหลังป้อนแรงดัน 600 V

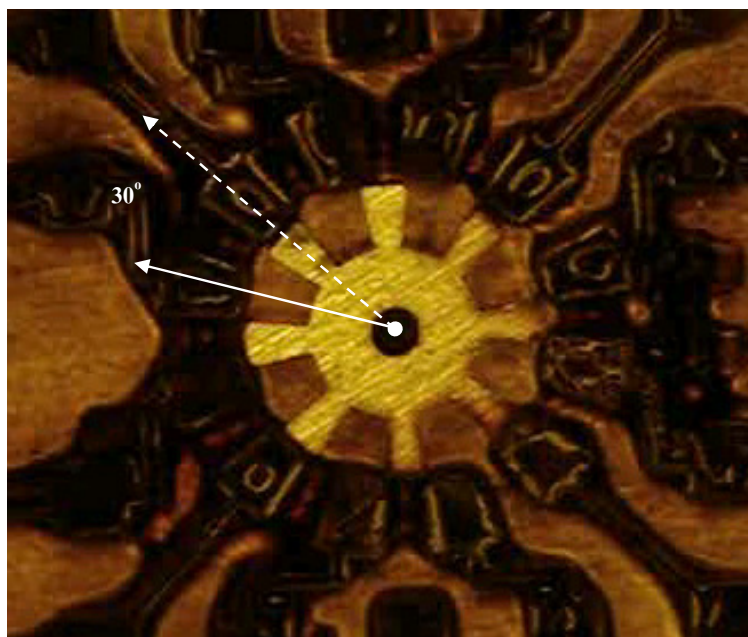




(n)  $\theta = 0^\circ$



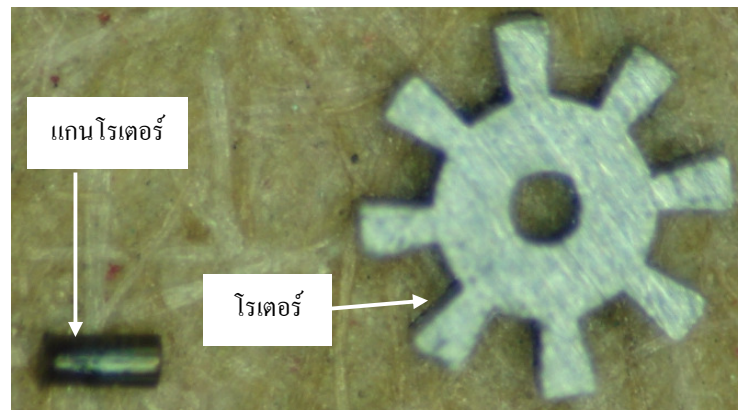
(v)  $\theta = 15^\circ$

(ค)  $\theta = 30^\circ$ 

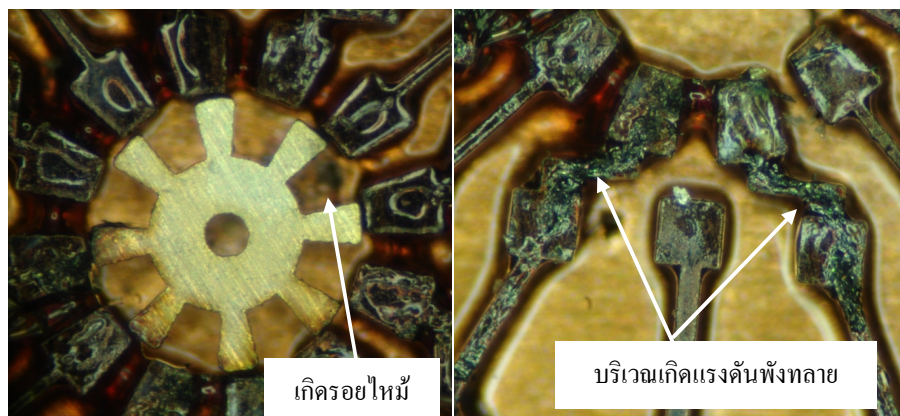
### รูปที่ 6.8 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อทำการป้อนแรงดัน 600 V ความถี่ 2 Hz

จากรูปที่ 6.8 เป็นการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อทำการตรวจสอบภาพพบว่าโรเตอร์เคลื่อนที่จาก  $0^\circ$ - $15^\circ$  ใช้เวลาประมาณ 0.16 วินาที และเคลื่อนที่จาก  $15^\circ$ - $30^\circ$  ใช้เวลาประมาณ 0.16 วินาที รวมระยะเวลาเคลื่อนที่จาก  $0^\circ$ - $30^\circ$  เป็นเวลาประมาณ 0.32 วินาที หากทำการคำนวณจะได้ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 1.636 rad/s หรือ 15.6 rpm และหากคำนวณความเร็วจากสมการที่ 6.1 ซึ่งมีความถี่เท่ากับ 2 Hz จะได้ความเร็วเท่ากับ 15 rpm ซึ่งพบว่าความเร็วจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วจากการทดสอบ

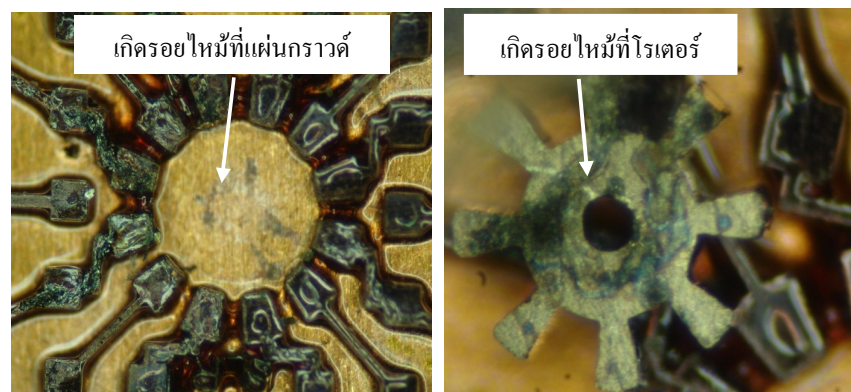
นอกจากทำการทดสอบชุดมอเตอร์ที่ประกอบด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์ดังกล่าวแล้ว ยังได้ทำการทดลองเปลี่ยนขนาดของโรเตอร์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ที่มีความหลากหลายเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้าง แต่เนื่องจากโรเตอร์ขนาดที่นำมาทดสอบนั้น มีขนาดช่องว่างสำหรับสวมกับแกนโรเตอร์ค่อนข้างเล็กและแน่นเกินไปเมื่อทดลองใช้วัสดุปลายแหลมสะกิดบริเวณใบพัดโรเตอร์ เพื่อทดสอบการหมุนด้วยแรงทางกล เป็นเหตุให้แกนโรเตอร์เกิดการล้มตัวลงดังรูปที่ 6.9 การทดลองที่สมบูรณ์จึงได้หยุดลง จึงทำการทดลองป้อนแรงดันเพื่อทดสอบว่าหากไม่มีแกนโรเตอร์แล้วจะยังสามารถเคลื่อนที่ได้หรือไม่ พบว่าโรเตอร์เกิดการขยับเล็กน้อยพร้อมกับเกิดแรงดันฟุ้งหลายระหว่างสเตเตอร์กับกราวด์พร้อมกับเกิดรอยไหม้



(ก) แกนกลางโรเตอร์เกิดการล้าเนื่องจากถูกการสัมผัส



(ข) เกิดแรงดันพังทลายรอยไหม้



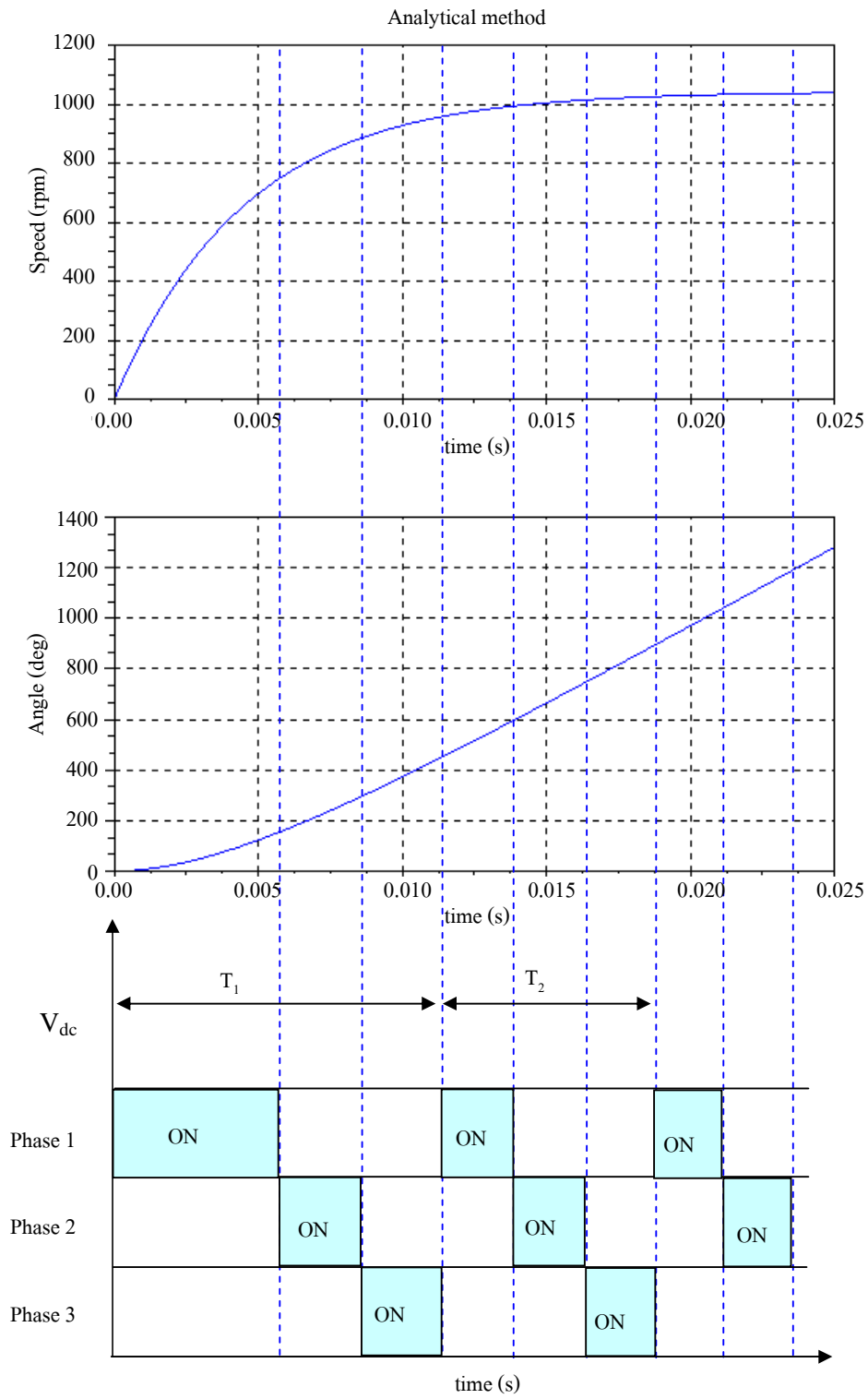
(ค) รอยไหม้ที่แผ่นกราวด์และรอยไหม้ที่โรเตอร์

รูปที่ 6.9 ความเสียหายต่อมอเตอร์จุลภาคหลังทำการป้อนแรงดัน 900 V ความถี่ 2 Hz

#### 6.4 แนวทางการควบคุมมอเตอร์จูลภาคให้หมุนต่อเนื่อง

เนื่องจากมอเตอร์จูลภาคมีการควบคุมแบบใช้สัญญาณความถี่ควบคุม ลักษณะเป็นเหมือนกับสแต็ปมอเตอร์ จากการจำลองผลการตอบสนองต่ออินพุตจนสามารถหาระยะเวลาที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้ ทำให้ทราบถึงวิธีการป้อนสัญญาณความถี่ที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้คงที่หรือหมุนแบบต่อเนื่องจากสถานะชั่วคราวจนเข้าสู่สถานะอยู่ตัว ทัวไปแล้วการควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้การประมาณว่ามอเตอร์มีระยะเวลาเคลื่อนที่อยู่ในสถานะชั่วคราวเป็นระยะเวลาสั้น ๆ จึงทำการปล่อยสัญญาณกระตุ้นเมื่อรู้พิกัดความเร็วให้กับมอเตอร์ด้วยความถี่คงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งมอเตอร์อาจจะมีการสั่นก่อนที่จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเพราะการจ่ายสัญญาณไม่ตรงเฟสอาจจะทำให้มอเตอร์ไม่เคลื่อนที่เลยก็เป็นได้ ถ้าหากสามารถควบคุมการป้อนสัญญาณให้แก่ระบบในสถานะชั่วคราวได้ จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้โดยไม่ติดขัด ทำได้ด้วยการคำนวณระยะเวลาที่มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ระยะมุมเท่ากับ  $15^\circ$  เนื่องจากเป็นระยะการเคลื่อนตำแหน่งที่ทำให้เกิดมุมเหลื่อมซ้อนกันพอดีระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ เมื่อทราบเวลาแล้วจากนั้นทำการปล่อยสัญญาณควบคุมออกมาเท่ากับระยะเวลาที่มอเตอร์เคลื่อนที่เหลื่อมซ้อนกันพอดี แล้วจึงทำการปล่อยสัญญาณถัดไป จนกระทั่งมอเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่สถานะอยู่ตัว จะได้ความถี่ที่ทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ความเร็วสูงสุดเป็นดังสมการที่ (6.1) และได้แสดงตัวอย่างการป้อนสัญญาณเพื่อให้มอเตอร์จูลภาคหมุนแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 6.10 เป็นตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ด้วยแรงดันอินพุต 50 V รูปดังกล่าวระยะเวลาเข้าสู่ตำแหน่งที่  $15^\circ$  เท่ากับ 5.7 มิลลิวินาที ด้วยความเร็วเท่ากับ 746 rpm ความเร็วเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1035 rpm ที่เวลา 22.6 มิลลิวินาที พบว่าการปล่อยสัญญาณความถี่ในช่วงที่เวลาที่มอเตอร์เข้าสู่สถานะชั่วคราวมีคาบเวลามากหรือน้อยไม่เท่ากัน วิธีการดังกล่าวเป็นแนวทางการควบคุมมอเตอร์จูลภาคแบบวงเปิด เพราะไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณเอาต์พุตสำหรับเปรียบเทียบความเร็ว และหากต้องการควบคุมให้มอเตอร์จูลภาคแบบวงปิด สามารถทำได้ด้วยการติดตั้งระบบวัดความเร็วรอบเพื่อใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตต่อไป จะทำให้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์จูลภาคมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น





รูปที่ 6.10 ตัวอย่างการป้อนสัญญาณอินพุตเพื่อให้มอเตอร์จุดภาคเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง

ในเบื้องต้นได้ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนไว้แล้วตัวอย่างข้างต้น เป็นการป้อนสัญญาณอินพุตเพื่อให้มอเตอร์เคลื่อนที่เข้าสู่สถานะอยู่ตัวได้อย่างต่อเนื่อง สังเกตเห็นว่าในช่วงแรกนั้นจะต้องปล่อยความถี่เข้าสู่ระบบด้วยคาบเวลาที่กว้างและเมื่อระบบเข้าที่หรือเข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้วคาบเวลาจะลดลงตามลำดับกระทั่งสัญญาณความถี่ถึงที่ตลอดไป จนกว่าจะหยุดการป้อนแรงดัน แต่ถ้าหากปล่อยสัญญาณความถี่ไม่เหมาะสมกับแรงดันอินพุต ถ้าหากปล่อยช้าเกินไปมอเตอร์จะหมุนแบบติดขัดหรือถ้าหากปล่อยเร็วเกินไปมอเตอร์ก็จะหมุนไม่ทันสัญญาณที่ป้อน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไม่ต่อเนื่องเช่นกัน

## 6.5 สรุป

บทที่ 6 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์จูลภาค มีการทดสอบการเคลื่อนที่ 3 วิธี คือทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ปลายแหลมสะกิดที่ใบพัดของโรเตอร์ และทดสอบโดยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป่า เพื่อให้เห็นว่าโรเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จากนั้นเป็นการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วของสเตเตอร์เพื่อดูลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ พบว่าเมื่อป้อนแรงดันสูงมอเตอร์จูลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ และท้ายสุดได้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วมอเตอร์จูลภาคให้เคลื่อนที่ได้แบบต่อเนื่องด้วยการควบคุมแบบวงเปิด

## บทที่ 7

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิตโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอ็กซ์ เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการสร้างองค์ความรู้ เพื่อพัฒนาและสร้างตัวขับเร้าแบบไฟฟ้าสถิตหรือแม้แต่อุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจูลภาคให้ดียิ่งขึ้น เริ่มตั้งแต่การศึกษาโครงสร้าง วัสดุและกระบวนการสร้างพร้อมทั้งทำการออกแบบและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากการสร้างมอเตอร์จูลภาคที่ผ่านมามีหลากหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งมอเตอร์จูลภาคที่สมบูรณ์แบบ วิธีแรก คือการสร้างมอเตอร์จูลภาคด้วยโครงสร้างที่ขึ้นรูปจากโลหะนิกเกิล วิธีนี้มีสองกระบวนการย่อยคือ ใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์เพียงครั้งเดียว ให้สามารถขึ้นรูปได้ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์พร้อมกัน โดยการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า แต่พบว่าเกิดปัญหาในเรื่องของการจัดแนวการฉายแสงให้ตรงกัน ซึ่งต้องใช้การฉายแสงอัลตราไวโอเลตหลายครั้งเพื่อสร้างโครงสร้างที่เป็นฐานล่าง ทำให้เกิดความผิดพลาดของลวดลาย อีกวิธีหนึ่งของการสร้างมอเตอร์จูลภาคที่เป็นโครงสร้างโลหะนิกเกิลเช่นกัน แต่การสร้างโรเตอร์และสเตเตอร์แยกส่วนกัน โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ทั้งสิ้น 2 ครั้ง เพื่อสร้างสเตเตอร์และโรเตอร์แยกกัน แล้วนำมาประกอบเข้ากันภายหลัง พบว่าการสร้างโครงสร้างด้วยโลหะนิกเกิลทั้ง 2 วิธี เป็นวิธีการที่ยู่ยากในตอนขึ้นรูป ซึ่งใช้กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ค่อนข้างนาน และอีกปัญหาหนึ่งคือหลังจากขึ้นรูปเสร็จแล้วต้องทำการสกัดสารไวแสงทิ้งด้วยการพลาสมาต้องใช้เวลาานเช่นกันและสุดท้ายต้องทำการสกัดโลหะบนฐานรองทิ้งไป ทำให้โครงสร้างที่เป็นฐานล่างโดยเฉพาะกรวดคู่ถูกทำลายด้วยเนื่องจากมีขนาดเล็กและบาง แต่วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถสร้างโรเตอร์ได้ครั้งละหลาย ๆ ตัวและมีความแข็งแรงทนทานเสียดสีได้ดี แต่ก็มีน้ำหนักมากเช่นกัน กระบวนการสร้างโครงสร้างของมอเตอร์ที่เป็นโลหะนิกเกิลดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างมอเตอร์จูลภาคที่มีเวลาอย่างจำกัดและอุปกรณ์ที่ไม่พร้อมเพียงเช่น เครื่องมือสำหรับสกัดสารไวแสงที่มีอัตราการกัดสูง

จากปัญหาที่ได้นำเสนอในข้างต้นจึงทำการแก้การขึ้นรูปโครงสร้างของมอเตอร์จูลภาคจากโลหะนิกเกิลเป็นพอลิเมอร์ไวแสงแล้วทำการเคลือบโลหะนำไฟฟ้าแทน วิธีนี้จะเป็นการสร้างชิ้นส่วนของโรเตอร์และสเตเตอร์แยกส่วนกัน มีขั้นตอนคือ ขั้นแรกทำการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบน

สารไวแสง SU-8 ที่มีฐานรองเป็นกราฟไฟต์เพื่อให้ได้ลวดลายโครงสร้างของโรเตอร์กับสเตเตอร์ จากนั้นทำการล้างสารไวแสงแล้วนำมาเคลือบโลหะนำไฟฟ้าทั้งสองชั้นส่วน แล้วทำการหล่อสารไวแสง SU-8 บนโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อที่จะทำการถ่ายทอดลวดลายลงแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ด้วยการขัดกราฟไฟต์ที่เป็นฐานรองทิ้งไป ในส่วนของโรเตอร์เมื่อขัดกราฟไฟต์จนหมดแล้ว จากนั้นทำการล้างสารไวแสงออก แล้วนำไปเคลือบโลหะอีกด้านหนึ่ง เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าได้ทุกด้าน ส่วนการสร้างสเตเตอร์นั้นหลังจากขัดกราฟไฟต์แล้วจะนำชิ้นส่วนดังกล่าวไปประกบติดบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวอีพอกซี จากนั้นทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงออก พบว่าโครงสร้างของของสเตเตอร์อยู่ครบถ้วนสมบูรณ์ และเมื่อทำการสกัดกาวอีพอกซีออกจากฐานรอง เพื่อให้ฐานรองนำไฟฟ้าและสำหรับสวมโรเตอร์ลงไป พบว่าโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะ จะเกิดเสียหายก่อนที่กาวอีพอกซีจะถูกกำจัดหมด ทำให้กระบวนการเชื่อมโครงสร้างดังกล่าวไม่เหมาะกับการสร้างโครงสร้างมอเตอร์จุลภาคในครั้งนี้ ต่อมาจึงเปลี่ยนแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการทดสอบใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ1512 เป็นตัวเชื่อมระหว่างโครงสร้างสเตเตอร์กับแผ่นวงจรพิมพ์แทนกาวอีพอกซี พบว่าเมื่อทำการล้างสารไวแสง เพื่อกำจัด SU-8 ทิ้งไป โครงสร้างของสเตเตอร์ยังอยู่ครบถ้วนสมบูรณ์เหมือนกับการถ่ายโอนลวดลายด้วยกาวอีพอกซี แต่ยังคงมีปัญหาคือสารไวแสง AZ1512 ถูกทำลายด้วยน้ำยาล้างสารไวแสงของ SU-8 ทำให้โครงสร้างที่ถ่ายโอนลงบนแผ่นวงจรพิมพ์เกิดความเสียหายเช่นกัน โดยเฉพาะแกนโรเตอร์ เนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็กและหลุดง่าย จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาล้างสารไวแสงหลังจากที่วางโครงสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วยการล้างสารไวแสงแบบสเปรย์ฉีดพ่นเพราะทำให้สามารถล้างชิ้นงานได้ที่ละน้อยและลดความเสียหายได้มาก ทำให้โครงสร้างยังอยู่ครบถ้วนสามารถนำชิ้นส่วนของมอเตอร์จุลภาคมาประกอบกันได้ค่อนข้างสมบูรณ์ กระบวนการหรือวิธีการที่กล่าวมา เป็นเทคนิคใหม่ของการสร้างมอเตอร์จุลภาคซึ่งเป็นพอลิเมอร์ให้เคลื่อนที่ได้ ข้อดีคือมีน้ำหนักเบา และสร้างได้รวดเร็วเพราะไม่ต้องสกัดสารไวแสงหรือชุบโลหะ แต่ข้อเสียคือโครงสร้างดังกล่าวยังไม่แข็งแรงและเกิดการสึกหรอได้ง่าย

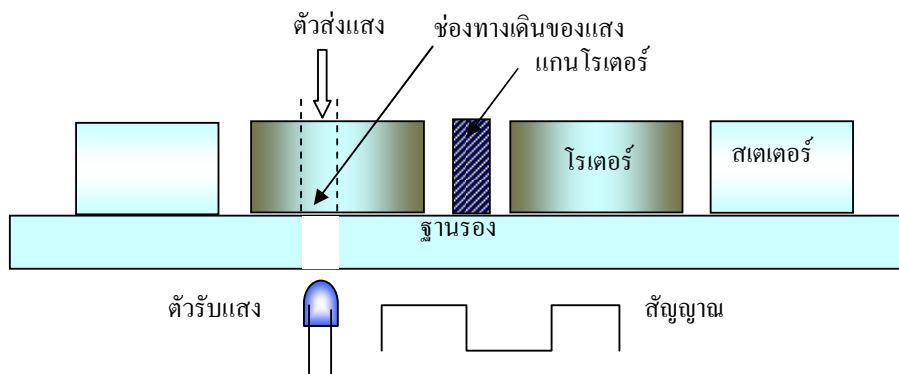
หลังจากสร้างสเตเตอร์กับโรเตอร์ด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าแล้ว จากนั้นนำชิ้นส่วนทั้งสองมาประกอบกันเพื่อทำการทดสอบ ในขั้นต้นด้วยการใช้อุปกรณ์ปลายแหลมสะกิดที่โรเตอร์ พบว่าโรเตอร์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ทำให้แกนกลางของมอเตอร์เสียหาย ต่อมาทดสอบขั้นที่สองด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป่า พบว่าโรเตอร์เคลื่อนที่ได้เช่นกันและท้ายสุดนำมอเตอร์จุลภาคมาเชื่อมต่อสายแล้วนำไปต่อกับชุดแหล่งจ่ายแรงดันสูง แล้วป้อนแรงดันเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่พบว่าเมื่อป้อนแรงดันจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ ทำให้มอเตอร์จุลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางหนึ่ง และก็หยุดไป เนื่องจากฐานรองซึ่งทำหน้าที่เป็นกราวด์และสเตเตอร์ยังมีเศษของสารไวแสงบางส่วนหลงเหลืออยู่ เพราะกระบวนการสร้างยัง

อยู่ในขั้นตอนการพัฒนาและอีกทั้งยังเป็นแนวทางใหม่ที่คิดค้นเพื่อสร้างมอเตอร์จูลภาคทำให้พบรูปแบบของปัญหาในลักษณะใหม่ ๆ ซึ่งต้องอาศัยแก้ไข การปรับปรุงและพัฒนา เพื่อให้ได้คุณลักษณะของมอเตอร์จูลภาคที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

มอเตอร์จูลภาคที่ทำการสร้างขึ้นนี้ยังมีปัญหาเรื่องของการล้างชิ้นงานยังไม่สะอาดทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ และ โรเตอร์กับกราวด์ การเคลื่อนที่จึงเกิดการติดขัด อีกทั้งโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้า ทำให้เกิดการสึกหรอได้ค่อนข้างง่าย การแก้ไขคือทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ต้องเคลือบให้มีความหนาแน่นมาก ๆ และหาแนวทางกำจัดสารไวแสงที่หลงเหลือบริเวณฐานรองเพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีหรือเกิดการติดขัดของโรเตอร์อันเป็นสาเหตุที่ทำให้โรเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแรงดันและความถี่ที่ทำการป้อน

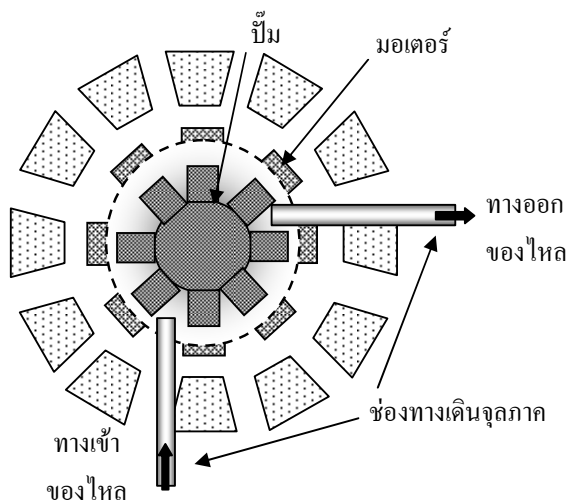
การควบคุมความเร็วของมอเตอร์จูลภาคในงานวิจัยนี้ยังเป็นการควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open loop) หากต้องการควบคุมความเร็วมอเตอร์จูลภาคด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feed back control system) หรือเรียกว่า ระบบควบคุมวงปิด (Closed loop control system) ทำได้โดยการติดตั้งตัวตรวจวัดความเร็วอาจจะเป็นกล้องความเร็วสูงหรือติดตั้งตัวตรวจรู้ความเร็วที่สามารถวางอยู่บนฐานรองของมอเตอร์จูลภาคได้ ซึ่งได้มีแนวคิดการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วดังรูปที่ 7.1 เป็นการติดตั้งตัวรับแสงเช่น โฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo transistor) หรือ โฟโตไดโอด (Photo diode) ที่ตำแหน่งด้านล่างของฐานรองแล้วทำการส่งแสงจากด้านบนลงผ่านช่องเปิดรับแสง เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์แสงจะตกกระทบบนที่ตัวรับแสง อุปกรณ์ดังกล่าวก็จะทำงานแล้วส่งสัญญาณดังกล่าวเข้าตัวควบคุม



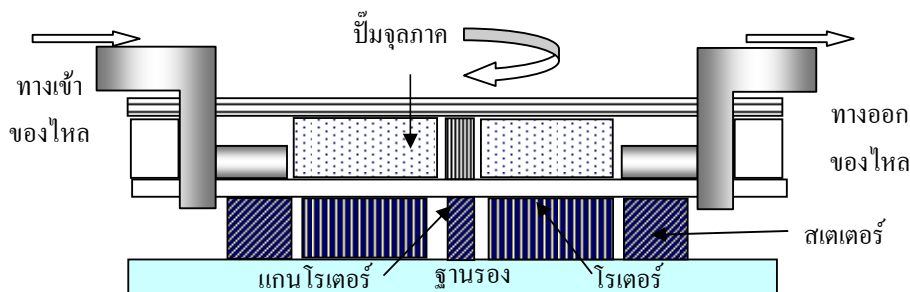
รูปที่ 7.1 แนวทางการติดตั้งตัวตรวจวัดความเร็วสำหรับควบคุมแบบป้อนกลับ

### 7.3 การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไปแล้วลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์จูลภาคดังกล่าวนั้นไม่สามารถที่จะทำงานตามลำพังด้วยตัวเองได้ แต่ต้องอาศัยการทำงานควบคู่ไปกับอุปกรณ์ชนิดอื่น เช่น การทำงานเป็นสวิตซ์ทางแสง มอเตอร์จูลภาคจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับกระจกสะท้อนแสงเพื่อปรับมุมเลี้ยวเบนของแสงไปยังจุดหมายที่ต้องการ ซึ่งอาจจะนำไปใช้งานในด้านสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ยังมีอีกทางด้านเกี่ยวกับการทดลองทางด้านของไหลซึ่งจะใช้เป็นตัวขับปั๊ม โดยสร้างปั๊มขึ้นมาที่มีใบพัดลักษณะคล้ายกับ โรเตอร์แต่วัสดุต้องสามารถติดกับ โรเตอร์ของมอเตอร์จูลภาคได้ เมื่อ โรเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ ใบพัดของปั๊มดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่ไปด้วยเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่ในการดูดสารละลายความแม่นยำสูง ดังรูปที่ 7.2



(ก) ภาพด้านบนของปั๊มจูลภาค



(ข) ภาพตัดขวางของปั๊มจูลภาค

รูปที่ 7.2 แนวทางการประยุกต์การใช้งานมอเตอร์จูลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

## รายการอ้างอิง

- นิรันดร์ คำประเสริฐ. (2551). **วิศวกรรมไฟฟ้าสถิต**. กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- สราวุฒิ สุจิตจร. (2546). **การควบคุมอัตโนมัติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- Bart, S.F., Mehregany, M., Tavrow, L.S., Lang, J.H., and. Senturia, S.D. (1992) Electrostatic micromotor dynamics. **IEEE Trans. On Electron Devices**. (Vol. 39, No 3,pp.566-575 ).
- Behjat, V. and Vahedi, A. (2007). Analysis and optimize of MEMS Electrostatic Micromotor **MEMSTECH'2007**, May 23-26 2007 ,Lviv-Polyana, UKRANE
- Emdemano, A., Fourniols, J. Y., Camon, H., Marchese, A., Muratet, S., Bony, F., Dunnigan, M., Desmuliez, M. P. Y., and Overton, G. (2003).VHDL– AMS modelling and simulation of a planarelectrostatic micromotor. **J.Micromech. Microeng.** 13: 580-590.
- Fan, L. S., Tai, Y. C., and Muller, R. S. (1988). IC-Processed Electrostatic Micro-motors. **IEEE Int. Elecrr. Devices Meeting**: 666-669.
- Hibbeler R.C. (2004). **Engineering mechanics dynamics 3 th ed**. Singapore, Prentice Hall.
- Iruday, S. S. and Emadi. A. (2005). Micromachines:principle of operation Dynamics and Control in **Proc. 2005 IEEE International Electric Machines and Drives Conference**, San Antonio, TX, May 2005:1109-1115.
- Jindal, A., Krishnamurthy M., and Fahimi , B. (2006). Modeling and Analysis of a MicroVariable Capacitance Electromechanical Energy Converter.**International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**: 33-38.
- Johansson, T. B., Dessel ., M. V., Belmans R. and Geysen W. (1994).Technique for Finding the Optimum Geometry of Electrostatic Micromotors. **IEEE Transactions on industry Applications**. 30(4): 912-919.
- Kreyzig, E. (1999) **Advance Engineering Mathematics**, (8<sup>th</sup> ed.) Singapro :John wilwy & Sons, Inc.

- Krishnamurthy, M., Jindal , A., and Fahimi, B. (2005). Operational Characteristics of Variable Capacitance Micromotor Drives: A Preliminary Investigation. **IEMDC Conference**: 1116-1121.
- Li, Z. J., Sun X.Q., and Liu, L. T. (1999). Method for the manufacture of IC-processed microelectro-static motors, **Patent Number** 5510,299.
- Maluf, N. and Williams, K. (2004). **An Introduction to microelectromechanical systems Engineering 2nd ed.** Norwood, ARTECH HOUSE.
- Mehregany, M., Senturia, S.D., Lang J.H., and Nagarkar, P. (1992). Micromotor fabrication. **Electron Devices**. 39(9): 2060-2069.
- Salam, A. and Napieralski, A. (1999). Simulation and Optimization of Variable Capacitance (VC) Micromotors, Using Modified Parallel-Plate Model. **Proc. Int. Conf. On modelling and simulation of Microsystems**. San Juan, Puerto Rico, USA 19-12 April.
- Strong, W., Skinner, J. L., Talin, A. A., Dentinger P. M., and Tien, N. C. (2006). Electrical Breakdown Response for Multiple-Gap MEMS Structures. **Reliability Physics Symposium Proceedings**: 421-426.
- Tai, Y. C., Fan, L. S., and Muller, R. S. (1989). IC-processed micro- motors:design, technology and testing. **In Proc. IEEE Micro ElectroMechanical Systems Workshop**. Salt Lake City, UT, February 1-5,1989:1-6.
- Takimotor, S, Kondo R, Suzuki K and Sugiyama S. (1999). Fabrication of micromotors using LIGA process. **In: Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics Human Science**. Nagoya, Japan: 221-226.
- Vinhais, H. F., Godoy, P. H., and Silva, E. C. N. (2006). Optimized Design of an Electrostatic Side-Drive Micromotor. **ABCN Syposium Series**. 2: 433-450.
- William, H. H., and John A. B. (2001). **Engineering Electromagnetics**,(6<sup>th</sup> ed.) McGraw-Hill.
- Yesseen, A. A., Mitchell, J. N., Klemic, J. F., Smith D. A., and Mehregany, M. (1999). A Rotary Electrostatic Micromotor 1x8 Optical Switch. **IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics**. 5(1): 26-32.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์

## โปรแกรมจำลองผลระบบพลวัตของมอเตอร์จุลภาคด้วยการคำนวณเชิงวิเคราะห์

```
//-----  
// 20091122_analytical.sce  
// Analytical dynamic micromotor  
//-----  
vgh=[50 25 300]; //ขนาดพารามิเตอร์  
V=vgh(1); //แรงดัน  
g=vgh(2)*1e-6; //ระยะห่างโรเตอร์กับสเตเตอร์  
h=vgh(3)*1e-6; //ความสูง  
E0 = 8.85e-12; //ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์  
Er = 1; //ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อากาศ  
Ep = E0*Er;  
//rho = 8500; //density Ni //ความหนาแน่นนิกเกิล  
rho = 1200; //density SU8 //ความหนาแน่น SU-8  
theta1 = 2*pi; //มุมของรัศมีโรเตอร์ด้านใน  
theta2 = (18*pi)/180; //มุมของรัศมีโรเตอร์ด้านนอก  
Rstator = 0.000468; //รัศมีของสเตเตอร์  
Rrotor = Rstator-g; //รัศมีสเตเตอร์  
R1 = 0.000058; //รัศมีโรเตอร์ด้านใน  
R2 = 0.00025; //รัศมีโรเตอร์ตรงกลาง  
R3 = Rrotor;  
I = (((1/4)*rho)*h)*(R2^4-R1^4)*theta1+(((2*rho)*h)*(R3^4-R2^4))*theta2;  
mass = (((1/2)*rho)*h)*(R2^2-R1^2)*theta1+(((4*rho)*h)*(R3^2-R2^2))*theta2;  
J = I; //โมเมนต์ความเฉื่อย  
gap = log((R3+g)/R3);  
Td = (((2*(V^2))*Ep)*h)/gap; //แรงบิดต่อเฟส  
n = 0.0000183; //viscosity of air (Kg/m.s) //สัมประสิทธิ์ความหนืดของอากาศ  
R = Rrotor;  
Hb = 0.000001; //ความสูงแบบริง  
B = ((pi*n)*(R^4))/Hb //ความหนืด
```

```

///parameter standard //พารามิเตอร์มาตรฐาน
C1 = 1.000000000D-13; //ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์
C2 = 1.000000000D-17; //ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์ที่เป็นฟังก์ชัน
//ของแรงคั้น

CV = C1+C2*(V^2);
Total_friction = B+CV; //ผลรวมแรงเสียดทาน
time1=.1; //เวลาจำลองผล
ta=0.0001;
t=0:ta:time1;
x_position=(J/B^2)*(Td-C1-C2*V^2)*( exp(-B/J*t)+B/J*t -1);
x_deg=x_position*180/%pi; //ตำแหน่งโรเตอร์ (deg)
x_speed1= (Td-C1-C2*V^2)*( 1-exp(-B/J*t) )/B;
x_speed_rad_sec=x_speed1;
x_speed=(x_speed_rad_sec*180/%pi)*(60/360); //ความเร็ว (rpm)
xset('window',1); //กราฟที่ 1
subplot(2,1,1);
plot(t,x_speed,style=5);xgrid() //แสดงกราฟเวลากับความเร็ว (rpm)
xlabel("Analytical method", " ", "rotor speed (rpm)");
chsteg=0.1; chgrans=1;
subplot(2,1,2);
plot(t,x_deg,style=5); //แสดงกราฟเวลากับตำแหน่ง (deg)
xgrid()
xlabel(" ", " time (s)", "Angle (deg)");
chsteg=0.1; chgrans=1;

```

โปรแกรมจำลองผลระบบพลวัตของมอเตอร์จุลภาคด้วยวิธีเชิงตัวเลข

```
//-----
// 20091122_numerical.sce
// Numerical dynamic micromotor
//-----

vgh=[50 25 300]; //ขนาดพารามิเตอร์
V=vgh(1); //แรงดัน
g=vgh(2)*1e-6; //ระยะห่างโรเตอร์กับสเตเตอร์
h=vgh(3)*1e-6; //ความสูง
E0 = 8.85e-12; //ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
Er = 1; //ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อากาศ
Ep = E0*Er;
//rho = 8500; //density Ni //ความหนาแน่นนิกเกิล
rho = 1200; //density SU8 //ความหนาแน่น SU-8
theta1 = 2*pi; //มุมของโรเตอร์ด้านใน
theta2 = (18*pi)/180; //มุมของโรเตอร์ด้านนอก
Rstator = 0.000468; //รัศมีของสเตเตอร์
Rrotor = Rstator-g; //รัศมีสเตเตอร์
R1 = 0.000058; //รัศมีโรเตอร์ด้านใน
R2 = 0.00025; //รัศมีโรเตอร์ตรงกลาง
R3 = Rrotor;
I = (((1/4)*rho)*h)*(R2^4-R1^4)*theta1+((2*rho)*h)*(R3^4-R2^4)*theta2;
mass = (((1/2)*rho)*h)*(R2^2-R1^2)*theta1+((4*rho)*h)*(R3^2-R2^2)*theta2;
J = I; //โมเมนต์ความเฉื่อย
gap = log((R3+g)/R3);
Td = (((2*(V^2))*Ep)*h)/gap ; //แรงบิดต่อเฟส
n = 0.0000183; // viscosity of air (Kg/m.s) //สัมประสิทธิ์ความหนืดของอากาศ
R = Rrotor;
Hb = 0.000001; //ความสูงแบร์ริง
B = ((pi*n)*(R^4))/Hb //ความหนืด
```

```

//parameter standard //พารามิเตอร์มาตรฐาน
C1 = 1.000000000D-13; //ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์
C2 = 1.000000000D-17; //ค่าคงที่แรงบิดเสียดทานจลน์ที่เป็นฟังก์ชัน
//ของแรงคั้น

CV = C1+C2*(V^2);
Total_friction = B+CV; //ผลรวมแรงเสียดทาน
// object function state space variable -----//
function [xdot]=Rotor(t,x); //ฟังก์ชันตัวแปรสถานะ
xdot(1)=x(2);
xdot(2)=1/J*( Td-B*x(2)-CV*sign(x(2)) );
endfunction
// initial //ใส่ค่าเริ่มต้น
x0(1)=0;x0(2)=0;t0=0;
time1=.1 //เวลาจำลองผล
t=0:0.0001:time1;
//----- The ode-command Numerical RK4-----
x=ode("rk4",x0,t0,t,Rotor); //จำลองผลด้วย RK-4
position=x(1,:); //ตำแหน่งโรเตอร์ (rad)
deg=position*180/%pi; //ตำแหน่งโรเตอร์ (deg)
speed_rad_sec=x(2,:); //ความเร็ว (rad/s)
speed=(speed_rad_sec*180/%pi)*60/360; //ความเร็ว (rpm)
subplot(2,1,1);
plot(t,speed,style=5); //แสดงกราฟเวลากับความเร็ว (rpm)
xgrid()
xlabel("Numerical method", "", "rotor speed (rpm)");
subplot(2,1,2);
plot(t,deg,style=5); //แสดงกราฟเวลากับตำแหน่ง (deg)
xgrid()
xlabel(" ", " time (s)", "Angle (deg)");
chsteg=0.1; chgrans=1; // Determines 'arrow-density' and limits

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมมอเตอร์

## โปรแกรมควบคุมมอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต

/\*\*\*\*\*\*

Micromotor control

Arduino-0016

uMotor 20091015

\*\*\*\*\*/

```
int LED_ON=13; //แสดงหลอดไฟทำงานด้วยขา13
int Phase1 =3; //เฟสที่หนึ่งแทนด้วยขา 3
int Phase2= 4; //เฟสที่สองแทนด้วยขา 4
int Phase3 = 5; //เฟสที่สามแทนด้วยขา 5
int stop=6; //แสดงการหยุดหมุนด้วยขา 6
int ADC0=0; //อ่านค่าแอนาล็อกช่อง 0
int dl; // ตัวแปรหน่วยเวลา
void CW_Step(void); // ฟังก์ชันหมุนตามเข็มนาฬิกา
void CCW_Step(void); // ฟังก์ชันหมุนทวนเข็มนาฬิกา
void setup() // เข้าสู่การตั้งค่าโปรแกรม
{
  pinMode(LED_ON, OUTPUT); //กำหนดให้ LED_ON เป็นเอาต์พุต
  pinMode(Phase1, OUTPUT); //กำหนดให้ Phase1 เป็นเอาต์พุต
  pinMode(Phase2, OUTPUT); //กำหนดให้ Phase2 เป็นเอาต์พุต
  pinMode(Phase3, OUTPUT); //กำหนดให้ Phase3 เป็นเอาต์พุต
  pinMode(stop, OUTPUT); //กำหนดให้ stop เป็นเอาต์พุต
  digitalWrite(LED_ON, HIGH); //แสดงการทำงานของโปรแกรม

  // setup motor
  digitalWrite(Phase1, LOW); //ให้ทุกเฟสหยุดการทำงาน
  digitalWrite(Phase2, LOW);
  digitalWrite(Phase3, LOW);
  delay(1000); //หน่วยเวลา 1000 วินาที
  digitalWrite(Phase1, HIGH); //ให้ทุกเฟสทำงาน
```

```

digitalWrite(Phase2, HIGH);
digitalWrite(Phase3, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(Phase1, LOW);           //ให้ทุกเฟสหยุดการทำงาน
digitalWrite(Phase2, LOW);
digitalWrite(Phase3, LOW);
}
void loop()                           //เข้าสู่การทำงานของโปรแกรม
{
  while(1)
  {
    digitalWrite(Phase1, LOW);        //เริ่มต้นทุกเฟสหยุดทำงาน
    digitalWrite(Phase2, LOW);
    digitalWrite(Phase3, LOW);
    int speed1=analogRead(ADC0);      //แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล
    if((speed1>=0)&(speed1<=412))     //ถ้าระดับสัญญาณอยู่ในช่วง 0-412
    {
      dl=(speed1)*5+1;                //หน่วงเวลาเท่ากับ dl
      CW_Step();                       //ให้หมุนตามเข็มนาฬิกา
    }
    else if((speed1>=613)&(speed1<=1023)) //ถ้าระดับสัญญาณอยู่ในช่วง 613-1024
    {
      dl=(1023-speed1)*5+1;          //หน่วงเวลาเท่ากับ dl
      CCW_Step();                     //ให้หมุนทวนเข็มนาฬิกา
    }
    else                               //ถ้าระดับสัญญาณอยู่นอกช่วง
    { digitalWrite(stop, HIGH);       //หยุดหมุน
    }
  }
}

```



```

void CW_Step(void) //ประกาศฟังก์ชันตามเข็มนาฬิกา
{ // step phase 1>>2>>3 //เฟส 1 2 3 ทำงานตามลำดับ
    digitalWrite(stop, LOW);
    digitalWrite(Phase3, LOW);
    digitalWrite(Phase1, HIGH);
    delay(dl);
    digitalWrite(Phase1, LOW);
    digitalWrite(Phase2, HIGH);
    delay(dl);
    digitalWrite(Phase2, LOW);
    digitalWrite(Phase3, HIGH);
    delay(dl);
}

void CCW_Step(void) //ประกาศฟังก์ชันทวนเข็มนาฬิกา
{ //step phase 3>>2>>1 //เฟส 3 2 1 ทำงานตามลำดับ
    digitalWrite(stop, LOW);
    digitalWrite(Phase1, LOW);
    digitalWrite(Phase3, HIGH);
    delay(dl);
    digitalWrite(Phase3, LOW);
    digitalWrite(Phase2, HIGH);
    delay(dl);
    digitalWrite(Phase2, LOW);
    digitalWrite(Phase1, HIGH);
    delay(dl);
}

```

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

P. Deekla, R. Phatthanakun, P. Songsiriritthigul, P. Klysubun, and N. Chomnawang, (2009). **Fabrication of High-Aspect-Ratio Complementary Micro Parts Based on Synchrotron X-ray Lithography and Release Etching of a Conformal Sacrificial Layer.** Proceedings of the International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2009), Khon Kaen, Thailand, July 23-24, pp. 227-230.



# Fabrication of High-Aspect-Ratio Complementary Micro Parts Based on Synchrotron X-ray Lithography and Release Etching of a Conformal Sacrificial Layer

Pittaya Deekla<sup>1,3</sup>, Rungrueang Phatthanakun<sup>1,3</sup>, Prayoon Songsiriritthigul<sup>2,3</sup>, Prapong  
Klysubun<sup>3</sup>, and Nimit Chomnawang<sup>1,3\*</sup>

1. School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,

2. School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology,  
Suranaree, Muang, Nakhonratchasima, Thailand 30000

3. Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Suranaree, Muang, Nakhonratchasima,  
Thailand 30000

\* Corresponding Author, Email: nimit.chomnawang@gmail.com

## Abstract

We present a novel method for fabrication of high-aspect-ratio complementary micro parts using synchrotron x-ray lithography processes. To demonstrate this new technique, a high-aspect-ratio metallic cylindrical-shape test structure is fabricated by printing a circular absorber pattern on an x-ray mask with a diameter of 1450 microns to a 300 micron-thick SU-8 photoresist, developing the photoresist mold, and filling the mold with electroplated nickel. After removal of the photoresist mold, another micro part which is a complement of the piston-shape nickel test structure is created by electrodeposition. Both micro parts are separated by a 10 micron-thick metallic sacrificial layer that has been conformally coated onto the surface of the first micro part by electroplating. The separation distance between both complementary micro parts can be adjusted by varying the thickness of the conformal sacrificial layer. Upon completion of the second micro part electroplating, the coupled micro parts are simultaneously planarized to a desired thickness by mechanical polishing. Finally, these micro parts are released from each other by wet chemical etching of the sacrificial layer. The new fabrication method of complementary micro parts reported in this paper can be applied for realization of micro sensors and actuators as well as various micro-electro-mechanical (MEMS) devices.

**Keywords:** Microfabrication, X-ray Lithography, Complementary Micro Parts, Conformal Sacrificial Layer, Release Etching

## 1. Introduction

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) are miniature devices that have been widely integrated in commercial electronic applications. With combination of integrated circuit (IC) and micromachining technologies, high performance MEMS actuators and sensors are resulted.

Mechanical movements and displacements of free standing micro mechanisms inside these actuators and sensors attribute to capability and performance of many smart products, especially ones using capacitive sensing or electrostatic driving forces such as micro-mirrors [1], micro-valves [2], and micro-motors [3]. Fabrication of





the free standing micro structures are usually done by depositing a planar layer of sacrificial metals or polymers. After it is used as a temporary support, the sacrificial material is removed either by wet chemical etching or dry plasma etching. In some micro sensors and actuators, high-aspect-ratio mechanisms are desirable in order to obtain high sensitivity or driving force. Fabrication of these free-standing mechanisms requires deposition and removal of conformal sacrificial layer that lies along the surface of the targeted micro structures. In this paper, we propose fabrication method of high-aspect-ratio metallic micro mechanism using an electroplated metal as a conformal sacrificial layer. To demonstrate possible applications of this new technique, a complementary pair of high-aspect-ratio piston-cylinder micro parts is fabricated.

## 2. Fabrication procedures

The test structures are designed as a piston enclosed by a cylinder. Upon their completion, both metallic micro parts are separated by a narrow and high-aspect-ratio air gap. The fabrication procedures can be divided into four major steps including formation of the first micro part (piston), deposition of a conformal sacrificial layer, formation of the enclosing complementary micro part (cylinder), and finally their separation. Fig. 1 illustrates the sequence of these steps. The details of each procedure are described as follow. We first fabricate an x-ray mask by tauting a 100  $\mu\text{m}$ -thick mylar sheet on a circular copper ring. This mylar membrane is used as a mask blank on which the x-ray absorber pattern is fabricated. The absorber made of 20  $\mu\text{m}$ -thick silver layer with a circular shape of 1450  $\mu\text{m}$ -wide diameter is used to block x-ray from reaching the sample resulting in a circular shadowed area straight into the thick photoresist as shown

in Fig. 1(b). Thereafter, the resist is developed in a fresh SU-8 developer creating a cylindrical cavity with a straight side wall perpendicular to the substrate as depicted in Fig. 1(c). The cavity is then filled with Ni by electroplating, in a bath of nickel sulphate, up to the top of the photoresist mold as shown in Fig. 1(d). The electroplating mold is removed by stripping in NMP remover and dry-etching in  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  plasma resulting in a clean metallic piston as shown in Fig. 1(e). The surfaces of the substrate, piston side wall and piston top are then covered by a 10  $\mu\text{m}$ -thick sacrificial silver layer conformally coated by electroplating, in a bath of silver cyanide, as depicted in Fig. 1(f). Hereafter, the silver coated piston along with the substrate is used as a metallic mold for formation of the enclosing complementary Ni cylinder by electrodeposition as shown in Fig. 1(g).

in Fig. 1(b). Thereafter, the resist is developed in a fresh SU-8 developer creating a cylindrical cavity with a straight side wall perpendicular to the substrate as depicted in Fig. 1(c). The cavity is then filled with Ni by electroplating, in a bath of nickel sulphate, up to the top of the photoresist mold as shown in Fig. 1(d). The electroplating mold is removed by stripping in NMP remover and dry-etching in  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  plasma resulting in a clean metallic piston as shown in Fig. 1(e). The surfaces of the substrate, piston side wall and piston top are then covered by a 10  $\mu\text{m}$ -thick sacrificial silver layer conformally coated by electroplating, in a bath of silver cyanide, as depicted in Fig. 1(f). Hereafter, the silver coated piston along with the substrate is used as a metallic mold for formation of the enclosing complementary Ni cylinder by electrodeposition as shown in Fig. 1(g).

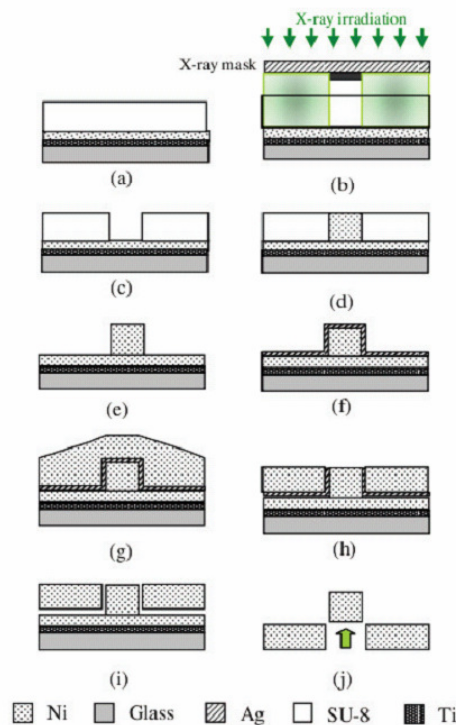


Fig. 1: Fabrication sequence of high-aspect-ratio complementary micro parts.

After mechanical polishing, the piston paired with complementary cylinder is obtained as

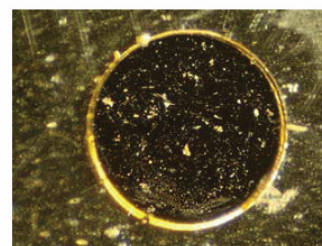


drawn in Fig. 1(h). The cylinder is then released from the piston and the substrate by chemical wet etching of the sacrificial silver layer in a chemical mixture of 3:1  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$  as shown in Fig. 1(i). After release of the piston's complementary cylinder, the piston is mechanically detached from the substrate leaving the piston-cylinder pair of micro parts separated by a 10  $\mu\text{m}$ -wide air-gap as depicted in Fig. 1(j).

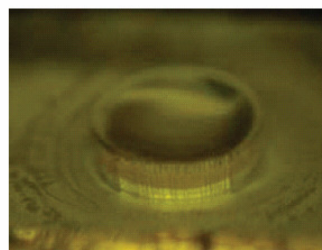
### 3. Results and Discussions

The piston and complementary enclosing cylinder are fabricated with a procedure described in the previous section to demonstrate possible applications of the new technique. Although a standard UV lithography can be used to create such large piston and cylinder but x-ray lithography will yield a smoother and more vertical side wall and hence smaller and better air-gap between complementary micro parts. For these particular test structures, we start fabrication by exposing a 300  $\mu\text{m}$ -thick SU-8 photoresist to synchrotron x-ray via a circular silver absorber with an energy dose of  $65 \text{ J}/\text{cm}^2$  at the top surface (electron current of 115 mA and exposure time of 5 minutes). The polymeric mold obtained after a 10 minutes development is shown in Fig. 2(a). The polymeric mold is then dry-etched in  $\text{CF}_4/\text{O}_2$  plasma at RF power of 200 W for 20 hours. Approximately 10  $\mu\text{m}$ -thick silver is then electroplated on the bare surface of the piston and substrate at a current density of  $15 \text{ mA}/\text{cm}^2$  for 10 minutes. The conformal coated piston in which to be used as an electroplating mold for a formation of the enclosing cylinder is shown in Fig. 2(b). Electroforming of the enclosing cylinder is done at a current density of  $100 \text{ mA}/\text{cm}^2$  for 20 hours. Over-plated nickel above the piston is polished down until the Ag sacrificial layer covering the top surface of the piston is removed. At this point, the Ag sacrificial layer covering the piston's side wall is revealed as shown in Fig 3.

To separate the cylinder from the piston and substrate, the conformal Ag sacrificial layer is etched in a solution of 3:1  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$  for 48 hours. The remaining piston is then detached from the substrate by a mechanical force. At this point, if a conductive graphite substrate were used instead of a metal coated glass substrate, both micro parts can be separated from each other after removal of the



(a)



(b)

Fig. 2: Optical micrograph of the piston, (a) the 300  $\mu\text{m}$ -deep SU-8 electroplating mold and (b) the nickel piston after removal of the polymeric mold and conformal coating of Ag sacrificial layer.

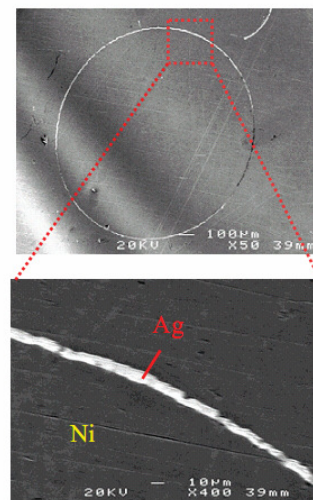


Fig. 3: Scanning electron micrographs of the piston separated from the enclosed cylinder by a 10  $\mu\text{m}$ -thick sacrificial silver layer.

substrate by mechanical polishing. Fig. 4 shows the complementary micro parts after separation.

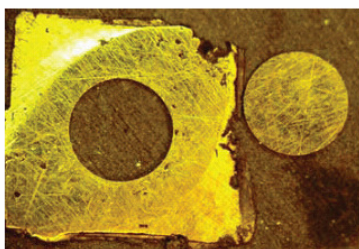


Fig. 4: Optical micrographs of the piston and complementary cylinder after release of the conformal Ag sacrificial layer.

The results from this study show that the new technique is valid. However, better controls of process parameters are needed. In the future, we plan to use sputtering as an alternative coating method instead of electroplating in order to obtain a thinner conformal sacrificial layer. More experimental studies on smaller structures with more sophisticated shapes are desirable to extend application ranges of this new technique.

#### 4. Conclusions

A novel technique for creation of complementary micro parts is proposed. A pair of piston and cylinder test structures is used in this preliminary study. A nickel piston with a diameter of 1450  $\mu\text{m}$  and a height of 300  $\mu\text{m}$  is electroformed in a temporary mold made of SU-8 resulting from a lithography process using synchrotron x-ray from the BL-6 beamline at the Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Thailand. The combined surface of nickel piston and conductive substrate is conformally coated with a 10  $\mu\text{m}$ -thick Ag by electroplating and used as a metallic mold for electroforming of the piston enclosing cylinder. After planarization to a final thickness, the micro parts are separated from each other and from the substrate. The released complementary micro parts, separated by a 10  $\mu\text{m}$ -wide air gap, are finally obtained. With future improvement, this technique could be useful in fabrication of many MEMS sensor and actuator applications.

#### 5. Acknowledgement

This work is funded by the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization),

Ministry of Science and Technology, Thailand, under the grant # 2-2548/PS07. Fabrication processes are performed using x-ray lithography and micromachining facilities at SLRI. Helps and supports from engineers and scientists at SLRI and Suranaree University of Technology are greatly appreciated.

#### 6. References

- [1] Mizuno, Y., Tsuboi, O., Kouma, N., Soneda, H., Okuda, H., Nakamura, Y., Ueda, S., Sawaki, I., and Yamagishi, F., A 2-axis comb-driven micromirror array for 3D MEMS switches, In 2002 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMs, Lagano, Switzerland, pp.17-18, 2002.
- [2] Yobas, L., Durand, D. M., Skebe, G. G., Lisy, F. J. and Huff, M. A., A novel integrable microvalve for refreshable Braille display system, J. Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No 3, pp. 252-263, 2003.
- [3] Yasseen, A.A., Mitchell, J.N., Klemic, J.F., Smith, D.A., and Mehregany M., A rotary electrostatic micromotor  $1 \times 8$  optical switch, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 5, No. 1, pp. 26-32, 1999.
- [4] Watanabe, N., Suda, M., Furuta, K., Sakuhara, T., Fabrication of micro parts using only electrochemical process. Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 143-146, 2001.

## ประวัติผู้เขียน

นายพิทยา ดิกล้ำ เกิดเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 ที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนเพชรหนองขาม มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2550 ระหว่างที่ทำการศึกษาระดับปริญญาตรีได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ จากนั้นได้เข้าศึกษาระดับมหาบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน โดยได้รับทุนการศึกษาจาก สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โครงการ “ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยทำการพัฒนาและสร้างตัวขับเคลื่อน จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในขณะศึกษาดัง ภาควิชาค.ค.