

การสร้างและตรวจสอบคุณลักษณะของแอคซิวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับระบบของไหลจุลภาค



นายศิวพล ฉายแก้ว

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

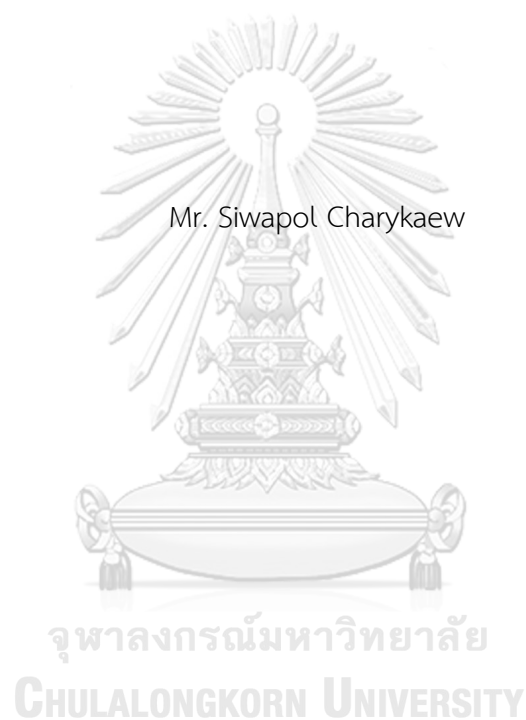
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Fabrication and Characterization of Pneumatic Actuator for Microfluidic System



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คิพล ฉายแก้ว : การสร้างและตรวจสอบคุณลักษณะของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับระบบของไหลจุลภาค (Fabrication and Characterization of Pneumatic Actuator for Microfluidic System) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ, หน้า.

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ซึ่งมีโครงสร้างที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ ชั้นควบคุมสำหรับลมอัด ชั้นของไหลสำหรับของไหลที่มีอนุภาคพลาสติกหรือเซลล์ ฟิล์มบางที่กั้นกลางระหว่างชั้นควบคุมและชั้นของไหล อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างฟิล์มบางในอดีตค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษาจึงมี 2 ประเด็น คือ การศึกษากระบวนการสร้างชิพของไหลจุลภาคและฟิล์มบางด้วยชั้นสังเวยกับการศึกษาผลของขนาดของแอกชูเอเตอร์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อระยะกระดกของฟิล์มบาง ขั้นตอนการสร้างแอกชูเอเตอร์เริ่มจากชั้นควบคุม ที่สามารถสร้างได้ด้วยวิธีซอพท์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ด้วยสารโพลีไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane-PDMS) ในขณะที่ฟิล์มบางจำเป็นต้องใช้เทคนิคการปั่นเหวี่ยงสารโพลีไดเมทิลไซโลเซนบนชั้นสังเวย โดยชั้นสังเวยได้ใช้สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol) หลังจากจึงนำชิ้นงานทั้งสองมาประสานกันด้วยเทคนิคการคายประจุแบบโคโรน่า แล้วกำจัดชั้นสังเวยออกด้วยน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 120 °C ในขั้นตอนสุดท้ายจึงนำพอร์ตลมอัดมาเชื่อมต่อและประสานกับกระบอกสไลด์ สำหรับการทดสอบสมบัติของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์จะเริ่มจากการหาค่าความแข็งแรงสำหรับการเชื่อมประสานชิ้นงานทั้งสองส่วน ซึ่งพบว่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ไม่ทำให้ชิ้นงานฉีกขาดเท่ากับ 25 kPa ในขั้นตอนต่อไปจึงหาระยะกระดกในช่วงความดัน 0-27 kPa สำหรับแอกชูเอเตอร์ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีฟิล์มบางหนาประมาณ 100 μm ผลการทดลองแสดงว่าการควบคุมพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตชิ้นงานยังทำได้ไม่ดีนัก และมีผลต่อระยะกระดกตัวค่อนข้างมาก โดยระยะกระดกที่ 25 kPa สำหรับแอกชูเอเตอร์ขนาด 1500, 2000 และ 2500 μm เท่ากับ 238 ± 52 , 354 ± 43 and 493 ± 33 μm ตามลำดับ เมื่อกระตุ้นแอกชูเอเตอร์ที่ 1, 5 และ 20 Hz ที่แรงดันอากาศคงที่เท่ากับ 25 kPa พบว่าแอกชูเอเตอร์ทุกขนาดจะตอบสนองได้ดีที่ความถี่ 1 Hz นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อกระตุ้นไปแล้วจำนวน 50,000 ครั้ง ระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์ทุกขนาดก็ไม่เปลี่ยนแปลงนัก ส่วนการทดสอบการรั่วไหลของของเหลวที่แรงดันอากาศ 35 kPa พบว่าสามารถใช้แอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm ปิดกั้นการไหลของของเหลวที่ 0.5 ml/min แต่ไม่สามารถปิดกั้นการไหลที่ 1 ml/min ในท่อเล็ก 300 μm ได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770564121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PNEUMATICS / MICROFLUIDICS SYSTEM / CELL SORTING / CELL CULTURE / MICROACTUATOR

SIWAPOL CHARYKAEW: Fabrication and Characterization of Pneumatic Actuator for Microfluidic System. ADVISOR: ASST. PROF. ALONGKORN PIMPIN, Ph.D., pp.

In this research, a pneumatic actuator, which consists of three main parts such as a control layer for pneumatic system, a fluid layer to deliver particles or cells and a thin membrane, was developed. However, a conventional fabrication of a membrane is difficult, and often results in a complexity of the system. Therefore, the goals of this study are a development of a simple fabrication process using a sacrificial layer technique, and an examination of the effects of an actuator size together with the magnitude of pressure on a deflection of membrane. The fabrication was as follows. Firstly, a control layer was fabricated by a conventional soft lithography technique with Polydimethylsiloxane (PDMS) polymer while a PDMS thin film was fabricated by a spin coating technique with sacrificial layer, Polyvinyl Alcohol (PVA), underneath. Next, two PDMS pieces were bonded using a Corona discharge technique. After that, PVA layer was dissolved with hot water at 120 °C so that only PDMS membrane was remained on the PDMS control layer. Finally, an inlet pneumatic port was connected. The characterization was started by a test of bonding strength. It was found that the pressure before failure was about 25 kPa. In the next step, the deflection of pneumatic actuators in a square shape was examined by varying a pressure from 0-27 kPa for three sizes of the actuator such as 1500, 2000, 2500 μm while all of them had a thickness of membrane around 100 μm . The results showed that a fabrication had much effect on a pneumatic actuator performance as different batches of actuator would have significantly different deflections. From the experiments at a constant pressure of 25 kPa, the average deflection of 1500, 2000 and 2500 μm were 238 ± 52 , 354 ± 43 and 493 ± 33 μm , respectively. When pneumatic actuators were activated at a frequency of 1, 5 and 20 Hz with a constant pressure of 25 kPa, all pneumatic actuators were well responded up to 1 Hz. In addition, it was observed that the deflection of pneumatic actuators was not changed much after they were activated to 50,000 cycles. Moreover, the leakage test showed that pneumatic actuators with the size of 2000 μm could completely stop the liquid flow at 0.5 ml/min in a 300- μm depth channel when it was actuated at 35 kPa; however, they failed to stop the liquid flow at the flow rate of 1 ml/min.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งขอขอบคุณ ผศ.ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ความรู้ คำแนะนำทั้งในเรื่องทางวิชาการและเรื่องในชีวิตประจำวัน อีกทั้งยังช่วยผลักดันและสนับสนุนผู้วิจัย ให้สามารถดำเนินงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และขอขอบคุณ ผศ.ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช ประธานกรรมการสอบที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ข้อเสนอแนะในเรื่องงานวิจัย เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

นอกจากนั้น ผู้แต่งขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ดร.ศัคนานต์ สรุงบุญมี กรรมการสอบที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงข้อแนะนำในการปรับปรุงการทดลองให้มีความรัดกุมยิ่งขึ้น

ในระหว่างการดำเนินงานวิจัย ศ.ดร.บุญชัย เตชะอำนาจ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องฉายประจุโคโรน่าและเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อสร้างฟิล์มบาง และนายนิติพงศ์ ปานกลาง นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้ช่วยสนับสนุนในเรื่องเทคนิคการใช้งานเครื่องฉายประจุโคโรน่าและเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อสร้างฟิล์มบาง เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นๆ

นอกจากนั้น งานวิจัยจะสำเร็จไม่ได้หากขาดคำแนะนำจาก ศ.สพ.ญ.ดร.อัจฉริยา ไสละสูต, รศ.น.สพ.ดร.ธีระยุทธ แก้วอมตวงศ์, ผศ.น.สพ.ดร.ประพฤติดี ปิยะวิริยะกุล, ดร.วุฒินันท์ เจริญศักดิ์ศิริ และ ดร.มยุรี จันทร์สกุลนิยม และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2 โครงการอุปกรณ์การแพทย์ชาญฉลาด และเงินสนับสนุนงานวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ผู้แต่งขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัว ในการสนับสนุนการทำวิจัยนี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนรุ่นเดียวกัน และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบกลไฟฟ้าขนาดจุลภาค และนาโนเทคโนโลยี ในการสนับสนุนทั้งแรงกาย แรงใจ ในการสนับสนุนผู้วิจัยให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 ประวัติความเป็นมาของระบบของไหลจุลภาคและระบบเพาะเลี้ยงเซลล์.....	5
2.2 ความสำคัญต่อการพัฒนาห้องปฏิบัติการในชิพ.....	7
2.3 ไมโครวาล์ว.....	13
2.3.1 หน้าที่ของไมโครวาล์ว.....	13
2.3.2 การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์ว.....	13
2.3.3 รูปแบบของไมโครวาล์ว.....	15
2.3.4 สรุปรูปแบบการเลือกไมโครวาล์ว.....	22
2.4 แอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์.....	22
2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์.....	22

2.4.2 การทบทวนวรรณกรรมของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์.....	25
2.4.3 การใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์.....	28
2.4.4 สรุปแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์.....	34
2.5 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ควบคุม และทดสอบระบบของไหลจุลภาคในปัจจุบัน.....	34
2.5.1 วัสดุในงานระบบของไหลจุลภาค	34
2.5.2 โพลีไดเมทิลไซโลเซน	35
2.5.3 เทคนิคการผลิตชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค.....	38
2.5.4 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	51
2.5.5 เทคนิคการเชื่อมประสาน.....	56
2.5.6 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานชิ้นงาน.....	60
2.5.7 เทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค.....	63
2.5.8 เทคนิคการควบคุมแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์.....	73
2.5.9 ระบบนิวเมติกส์.....	76
2.5.11 การทดสอบและการคำนวณระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์.....	79
2.6 สรุปปริทรรศน์วรรณกรรม	81
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและประสานชิ้นงาน.....	82
3.1 โครงสร้างชีพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่าย	82
3.2 กระบวนการหารูปแบบการผลิตชิ้นงานสำหรับการทดลอง.....	83
3.3 การสร้างแม่พิมพ์สำหรับการหล่อชิ้นงานและการสร้างชั้นควบคุม	85
3.3.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน	86
3.3.2 การพัฒนาแม่พิมพ์.....	87
3.3.3 การวัดความหนาของแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3	92
3.4 การสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบาง	93

3.4.1	กระบวนการสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบาง	93
3.4.2	การวัดผลของความหนาจากการสร้างฟิล์มบาง	94
3.4.3	ปัญหาที่พบในการสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบางและแนวทางแก้ไข	96
3.5	การเชื่อมประสานชิ้นงานและการล้างชั้นสังเว	96
3.5.1	กระบวนการประสานชิ้นงาน	96
3.5.2	ผลการประสานชิ้นงาน	98
3.5.3	การล้างชั้นสังเว	100
3.6	สรุปกระบวนการผลิตชิ้นงาน	102
บทที่ 4	การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการวัดระยะกระดก	103
4.1	การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง	103
4.1.1	การจับชิ้นงานไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการทดลอง	103
4.1.2	การออกแบบรูปแบบการจับชุดทดลองเพื่อให้สามารถทดลองได้อย่างต่อเนื่อง	105
4.2	การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน	107
4.3	การสอบเทียบขนาดมิติเรขาคณิต	109
4.4	สรุปการเตรียมอุปกรณ์การทดลอง	112
บทที่ 5	การทดลองคุณลักษณะของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์	113
5.1	กระบวนการทดลองการหาคณสมบัติแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์	113
5.2	การทดสอบระยะกระดกด้วยแรงดันอากาศคงที่	115
5.3	การทดสอบระยะกระดกด้วยการให้ความถี่	117
5.4	การทดสอบวัฏจักรของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์	119
5.5	ผลการทดลองที่เกิดจากการติดตั้ง	120
5.6	ผลการทดลองที่เกิดจากกระบวนการผลิต	125
5.7	ผลการทดลองที่เกิดจากการทดลองวัฏจักร	130

5.8 ผลการเกิดฮิสเทอรีซิส	134
5.9 ผลการทดลองระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์จากคามถึ	136
5.10 สรุปคุณลักษณะของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	141
บทที่ 6 การทดสอบการรั่วไหล	142
6.1 การสร้างชีพสำหรับทดสอบการรั่วไหล	142
6.2 การทดสอบการรั่วไหลของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	144
6.3 ผลการทดสอบการรั่วไหลของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	147
6.4 สรุปผลการทดสอบการรั่วไหลของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	149
บทที่ 7 สรุปผลการศึกษา	150
7.1 สรุป	150
7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา	152
7.2.1 การปรับปรุงกระบวนการผลิต	152
7.2.2 การออกแบบช่องทางไหลจุลภาคเพื่อป้องกันการรั่วไหล	152
7.2.3 การนำแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ไปใช้งาน	152
รายการอ้างอิง	155
ภาคผนวก ก การวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว	166
ภาคผนวก ข ค่าระยะกระดกตัวของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	181
ภาคผนวก ค ค่าความหนาของการวัดฟิล์มบาง	209
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	213

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงวิวัฒนาการในการเพาะเลี้ยงเซลล์และระบบของไหลจุลภาคตั้งแต่ช่วงปี 1989-2010 [10].....	6
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงลักษณะการใช้งานในสถานที่ที่ต่างกันกับเงื่อนไขและข้อจำกัดที่ควรพิจารณา รวม [11]	7
รูปที่ 2.3 ภาพแสดงระบบพลวัตของการเลี้ยงเซลล์แบบมหภาค(กลุ่มประชากร)และการเลี้ยง เซลล์แบบจุลภาค(เซลล์เดี่ยว) [12].....	8
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวโดยเริ่มจากกลุ่มประชากรจนถึงตอน หลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์ [12].....	8
รูปที่ 2.5 (ก) อุปกรณ์การคัดแยกเซลล์แบบท่อขดเกลียว (ข) อุปกรณ์ดักจับเซลล์ด้วยหลุมรูปทรง สามเหลี่ยมขนาดจุลภาค.....	11
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของระบบของไหลจุลภาคภายในห้องปฏิบัติการในชิพ	12
รูปที่ 2.7 (ก) การใช้สกรูในการดันของเหลวในห้องปิดไปดันฟิล์มบางปิดช่องทางไหลจุลภาค [15] (ข) การใช้แท่งที่ปลายหุ้ม PDMS ปิดช่องทางไหลจุลภาค [16].....	16
รูปที่ 2.8 (ก) ภาพอุปกรณ์ที่สำคัญของไมโครวาล์ว การใช้แม่เหล็กถาวรกดแผ่นรองอะคลิลิกให้ ปิดช่องทางไหลจุลภาค [17] (ข) ลักษณะของโครงสร้างไมโครวาล์วที่ใช้แม่เหล็กถาวร การทำงาน ของไมโครวาล์วเมื่อต้องการเปิดหรือปิดไมโครวาล์ว [18]	17
รูปที่ 2.9 การใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนต่อของเหลวที่ไวต่อความร้อน เพื่อให้ขยายตัวไปปิดช่องทาง ไหลจุลภาค [19].....	18
รูปที่ 2.10 (ก) การควบคุมฟองอากาศด้วยเข็มฉีดยาเพื่อให้ฟองอากาศไปขวางกั้นช่องทางไหล จุลภาค [20] (ข) การใช้โซลินอยด์ที่ติดแท่งที่ปลายดันฟิล์มบางให้ของเหลวในห้องปิดไปดัน ช่องทางไหลจุลภาค [27]	19
รูปที่ 2.11 การใช้ลมอัดทำให้พาราฟินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวแล้วไปดันฟิล์ม บางให้ปิดช่องทางไหลจุลภาค [21].....	19
รูปที่ 2.12 (ก) อิเล็กโทรดติดกับฟิล์มบาง [22] (ข) อิเล็กโทรด Carbon Nanotube [23].....	20
รูปที่ 2.13 การใช้โลหะจำรูปในการเปิดช่องทางไหลจุลภาค [24]	21

รูปที่ 2.14 การใช้เข็มฉีดยาที่ 1 ขนาด 3 มิลลิลิตรเทียบกับการใช้เข็มฉีดยากรณี 3 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร [25]	21
รูปที่ 2.15 รูปแบบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ รูปทางซ้ายมือตอนยังไม่ทำงาน (ปกติเปิด) และรูปทางขวามือตอนที่ทำงาน (ได้รับแรงดันอากาศ).....	23
รูปที่ 2.16 แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์แบบต่างๆ โดยฝั่งซ้ายเป็นกรณีที่ยังไม่ทำงานและฝั่งขวาเป็นกรณีทำงาน [30].....	24
รูปที่ 2.17 ระบบดักจับและปลดปล่อยเซลล์ ตอนยังไม่ทำงาน (ภาพซ้าย) และตอนทำงาน (ภาพขวา) [32]	28
รูปที่ 2.18 ระบบคัดแยก C.elegans ด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [9].....	29
รูปที่ 2.19 (ก) แผนภาพการทำงานของระบบของไหลโดยแรงโน้มถ่วงและกราฟแสดงอัตราการไหล (ข) แผนภาพการทำงานของไมโครปั๊มและกราฟแสดงอัตราการไหล [38]	30
รูปที่ 2.20 อุปกรณ์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการในชิพที่มีแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในการควบคุมอุปกรณ์ [33]	31
รูปที่ 2.21 ขนาดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่เกิดจากการควบคุมเวลเตอร์นิวเมติกส์ [34].....	31
รูปที่ 2.22 การปรับทิศทางการไหลของหยดของเหลวโดยใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [35].....	32
รูปที่ 2.23 การรวมหยดของเหลว 2 หยด (ภาพซ้าย) และการรวมหยดของเหลว 3 หยด (ภาพขวา) [36]	33
รูปที่ 2.24 (ก-ค) การตีหยดของเหลวให้เป็นหยดของเหลวขนาดเล็กด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ (ง) โครงสร้างของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์และการทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [37].....	33
รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุที่ใช้ในงานเพาะเลี้ยงเซลล์ในระบบของไหลจุลภาค [39]	35
รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตชิ้นงานต้นแบบในระบบของไหลจุลภาคเทียบกับความเร็วในการผลิตและราคา [43]	39
รูปที่ 2.27 กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการฉีดขึ้นงานพลาสติก (Injection Molding) วิธีการพิมพ์ตัวนูนด้วยแม่พิมพ์ร้อน (Hot embossing) และวิธีการหล่อขึ้นงานด้วยวิธีซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)/Replica Molding) [44]	40
รูปที่ 2.28 กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีทั่วไป [45].....	41

รูปที่ 2.29 กระบวนการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการใช้ฟิล์มสำเร็จรูป [6]	42
รูปที่ 2.30 กระบวนการสร้างชิ้นงานและโพลิเมอร์ซีล [46].....	43
รูปที่ 2.31 เกรรทำงานของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่มีโพลิเมอร์ซีล [46]	43
รูปที่ 2.32 กระบวนการสร้างโครงสร้างระบบของไหลจุลภาคด้วยการใช้วัสดุสังเวย 2 ตัว [47]	44
รูปที่ 2.33 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานโดยการใช้แรงเหวี่ยง [48].....	45
รูปที่ 2.34 (ก-ง) ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์สองด้าน (จ) รูปชิ้นงานระบบของไหล จุลภาคที่มีหลายชั้น (ไฟล์CAD/ชิ้นส่วนก่อนการประกอบ/ชิ้นงานประกอบ/ชิ้นงานประกอบบรรจุ สาร) [49]	46
รูปที่ 2.35 กระบวนการสร้างคานประจุไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเทคนิคชั้นสังเวย [51].....	47
รูปที่ 2.36 (ก) รูปแบบท่อในระบบของไหลจุลภาคบริเวณที่เชื่อมต่อกับท่ออื่นทั้งแบบ 2D , Pseudo-3D ,Truly 3D [52] (ข) ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานรูปแบบ Truly 3D ที่มีโอกาสทำให้ท่อ เสียหายได้ [52]	48
รูปที่ 2.37 (ก) ลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และ การทำงาน เปรียบเทียบกับลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีแอกซ์เอเตอร์ นิวเมติกส์และการทำงาน (ข) ลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดแบบทรงสูงที่มีแอกซ์เอ เตอร์นิวเมติกส์และการทำงาน [53].....	49
รูปที่ 2.38 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแห้งไวต่อแสง [54]	50
รูปที่ 2.39 กระบวนการหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ [55]	51
รูปที่ 2.40 โครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแสง (ก) แบบผิวอิสระ (Free Surface) และ (ข) แบบจำกัดผิว(Constrained Surface) [57] (ค) ภาพการเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสง UV ใน Stereolithography กับ NIR ในกระบวนการ 2PP [58].....	53
รูปที่ 2.41 โครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติ (ก) Photopolymer Inkjet Printing [57] (ข) Fused Deposition Modeling [57]	54
รูปที่ 2.42 การประสานชิ้นงานระหว่างกระจกกับซิลิกอน [60] ลักษณะของอ็อนที่เกิดขึ้น ระหว่างการเชื่อมประสาน	57
รูปที่ 2.43 การเปลี่ยนสภาพของผิว PDMS ด้วยเทคนิคการเชื่อมประสานด้วยพลาสมา (Plasma-Activated Bonding Technique)	58

รูปที่ 2.44 (ก) เครื่องกายประจุโคโรนา แห่งอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้งและสปริง กับแพลตฟอร์มที่ไม่นำไฟฟ้า (ข) การเชื่อมประสานชิ้นงานด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบแห้ง (ง) การเชื่อมประสานชิ้นงานด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบสปริง [65]	59
รูปที่ 2.45 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานโดยการเพิ่มแรงดันอากาศแบบขึ้นบันได[62, 66]	61
รูปที่ 2.46 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานด้วยการดึงชิ้นงานให้หลุดออกจากกัน (ก) PDMS-PDMS [63] (ข) PDMS-PC/COC/PMMA/PS [67]	62
รูปที่ 2.47 (ก) ระบบของไหลจุลภาคที่มีการเชื่อมต่อด้วยเข็ม [69] (ข) รูปแบบการติดตั้งท่อหรือเข็มในแนวตั้งตรงและแนวนอน และผลการเคลื่อนที่ของอนุภาค [70].....	64
รูปที่ 2.48 รูปแบบพอร์ตแบบสัมผัส (ก) แรงจากอุปกรณ์จับชิ้นงาน [74] (ข) แรงจากสกรูและเฟรม [75] (ค-ง) ระบบสุญญากาศ [76] (จ) โครงสร้างการเชื่อมต่อด้วยแม่เหล็ก (จ) ส่วนประกอบการเชื่อมต่อด้วยแม่เหล็ก [77].....	65
รูปที่ 2.49 (ก) การใช้เทปกาวยึดพอร์ตเชื่อมต่อ [78] (ข) การใช้ไนโตรเจนเหลวลดขนาดท่อก่อนติดตั้งกับพอร์ตแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ท่อติดกับพอร์ต [79] (ค) กระบวนการเชื่อมต่อท่อกับชิพของไหลจุลภาคโดยใช้อุณหภูมิจากเตาร้อนและกาวยึด [80]	67
รูปที่ 2.50 (ก) กระบวนการสร้างชิพของไหลจุลภาคสำหรับการเชื่อมต่อด้วยการบัดกรี (ข) ภาพการประกอบชิพของไหลจุลภาคกับชุดสำหรับเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ขายในเชิงพาณิชย์ [81] (ค) ภาพการใส่ท่อก่อนทำการใส่กาวยึด (ง) การฉายแสง UV จากกล่องจุลทรรศน์เพื่อให้กาวยึดตัว (จ) การฉายแสง UV เข้าที่ท่อเพื่อให้กาวยึดตัว [82]	68
รูปที่ 2.51 (ก) กระบวนการสร้างชิ้นบนที่มีพอร์ตด้วยการหล่อ PDMS สำหรับการแทรกท่อ [83] (ข) การสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีปะเก็นไว้กดแนบกับชิพ [87] (ค) โครงสร้างพอร์ตที่มีอุปกรณ์ SAWs ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ [88].....	69
รูปที่ 2.52 อุปกรณ์วงจรนิวเมติกส์ NOR-GATE และหลักการทำงาน [89]	74
รูปที่ 2.53 แผนภาพแสดงระบบควบคุมแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์กรณีสั่งโดยตรง [6]	75
รูปที่ 2.54 ชุดอุปกรณ์บริการลมสำหรับใช้ในงานทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์	76
รูปที่ 2.55 (ก) การวัดระยะกระดกใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับสเกลบาร์ [90] (ข) การใช้เลเซอร์ในการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ [91].....	77

รูปที่ 2.56 (ก) การวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยการประยุกต์ใช้ไมโครมิลเลอร์ [92] (ข) การวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์โดยใช้กระจกฉากขา ขนาด 45° (ค) ภาพแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้านบนและด้านข้าง [6]	78
รูปที่ 2.57 (ก) แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหลายขนาด (ข) กราฟการวัดระยะ กระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เทียบกับแรงดันอากาศ	79
รูปที่ 3.1 โครงสร้างซีพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่าย.....	82
รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างชิ้นงานก่อนการประสานชิ้นงาน.....	83
รูปที่ 3.3 กระบวนการประสานชิ้นงานเป็นแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการทดสอบ.....	84
รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานในขั้นตอนการสร้างชิ้นงานและประสานชิ้นงาน	85
รูปที่ 3.5 กระบวนการผลิตชั้นควบคุมด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography).....	86
รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1 และชิ้นงานที่ได้.....	87
รูปที่ 3.7 (ก) ชิ้นงานชั้นควบคุมหลังลอกออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งเห็นความหยابผิวได้ด้วยตาเปล่า (ข) ชิ้นงานที่หล่อด้วยแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2 ซึ่งเกิดการโก่งตัวของแม่พิมพ์.....	88
รูปที่ 3.8 แบบของแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3.....	90
รูปที่ 3.9 (ก) อุปกรณ์สำหรับแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 (ข) การวางชิ้นงานสามมิติลงในงานเพาะเชื้อ เพื่อป้องกัน PDMS ไหล (ค) การวางแม่พิมพ์ลงบนภาชนะที่เตรียมไว้ (ง) ชิ้นงานที่จะทำการตัด และลอกชิ้นงานออกด้วยคัตเตอร์ (จ) การตัดเศษ PDMS ออกด้วยกรรไกร (ฉ) การเจาะรูก่อน การนำไปประสานชิ้นงาน	91
รูปที่ 3.10 (ก) ตำแหน่งที่ทำการวัดแม่พิมพ์ (ข) เครื่องวัดความหยابผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicona- InfiniteFocusSL).....	92
รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบาง.....	94
รูปที่ 3.12 (ก) ตำแหน่งที่ตัดชิ้นงานออกสำหรับการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้อง จุลทรรศน์ (ข) ตำแหน่งที่ทำการวัดความหนาของฟิล์มบาง	95

รูปที่ 3.13 (ก) การให้ประจุโคโรนาที่ฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวยเป็นเวลา 2 นาที (ข) การให้ประจุโคโรนาที่ชั้นควบคุมเป็นเวลา 2 นาที (ค) ชิ้นงานที่ได้หลังประสานชิ้นงานวางบนเตาร้อนเพื่อให้การประสานมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น	97
รูปที่ 3.14 (ก) การให้ประจุโคโรนาที่ชั้นควบคุมและฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวยชั้นละ 2 นาที (ข) การประสานชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น เข้าด้วยกันและทำการให้ประจุโคโรนาที่ขอบชิ้นงานก่อนทำการตั้งบนเตาร้อนเพื่อให้การประสานดีขึ้น	97
รูปที่ 3.15 ชั้นควบคุมที่ประสานเข้ากับฟิล์มบาง เมื่อทำการล้างชิ้นงานออก เมื่อปล่อยชิ้นงานทิ้งไว้ ฟิล์มบางจะดึงให้ชิ้นงานโก่งงอ.....	98
รูปที่ 3.16 (ก) การประสานชั้นควบคุมที่มีความหนาผิวกับฟิล์มบาง ซึ่งมีช่องว่างใต้ฟิล์มบางอย่างชัดเจน (ข) ความหนาของชิ้นงานไม่เท่ากันทำให้การประสานฟิล์มบางที่ของทำได้ยาก	99
รูปที่ 3.17 (ก) ชิ้นงานหลังการประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 กับฟิล์มบาง (ข) ชิ้นงานหลังการประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 กับฟิล์มบางมาประสานกับกระจกสไลด์และพอร์ตเชื่อมต่อ (ค) ซิปสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่ายที่ต่อกับท่อลม	100
รูปที่ 3.18 (ก) การล้างชั้นสังเวยด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและเตาร้อนตามลำดับ (ข) การล้างชั้นสังเวยด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและลอกชิ้นงานด้วยคีมจับชิ้นงาน	101
รูปที่ 3.19 (ก) การล้างชั้นสังเวยด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและลอกชิ้นงานด้วยคีมจับชิ้นงาน (ข) การล้างชั้นสังเวยพร้อมกันได้หลายชิ้น (ค) การลอกชิ้นงานหลังการประสานออกโดยการใช้คีมจับชิ้นงาน.....	102
รูปที่ 4.1 (ก) รูปแบบการวางชิ้นงานกับกระจกฉากสำหรับการทดสอบการรับภาพจากกล้องจุลทรรศน์(ข) ภาพชิ้นงานที่ตัวกระจกไม่สามารถจับภาพขอบของชิ้นงานได้ (ค) ภาพชิ้นงานที่มีการวางกระจกฉากวางบนชิ้นงาน ซึ่งสามารถเห็นภาพด้านบนและด้านข้างของชิ้นงานได้	104
รูปที่ 4.2 การพัฒนาแบบโมเดลของอุปกรณ์จับชิ้นงานจับชิ้นงาน.....	105
รูปที่ 4.3 (ก) บริเวณที่ต้องตัดชิ้นงานชั้นควบคุมออกเพื่อให้วางกระจกฉากในเฟรมภาพได้ (ข) ภาพแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่สามารถสะท้อนภาพได้ด้วยกระจกฉากที่เลื่อนเข้ามาในเฟรมภาพได้.....	106

รูปที่ 4.4 (ก) กระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบและติดตั้งบนอุปกรณ์จับชิ้นงานสำหรับการวัดระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ (ข) ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งบนอุปกรณ์จับชิ้นงานพร้อมสำหรับการทดสอบการวัดระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์	106
รูปที่ 4.5 อุปกรณ์นิวเมติกส์สำหรับการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานอย่างง่าย	107
รูปที่ 4.6 (ก) โครงสร้างชิ้นงานทดสอบแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า (ข) ชิ้นงานทดสอบแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่าเสียหายจากการทดสอบ	108
รูปที่ 4.7 (ก) โครงสร้างชิ้นงานทดสอบแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดก (ข) ชิ้นงานทดสอบแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดกเสียหายจากการทดสอบ ...	108
รูปที่ 4.8 (ก) การวางตำแหน่งเมตลูกปีนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ลงบนชิ้นงานสำหรับการสอบเทียบมิติเรซา (ข) ระยะเวลาทำงานสำหรับการวัดชิ้นงานแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์จากด้านบนและด้านข้าง	110
รูปที่ 4.9 (ก) การวัดภาพของเมตลูกปีนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน จากมุมบน (Top View) เป็นค่าหลักในการอ้างอิง (ข) ค่าที่วัดเมตลูกปีนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ได้จากมุมด้านข้าง (Side View) จะมีความคลาดเคลื่อนและวัดได้ไม่เป็นวงกลม (ค) การสอบเทียบมิติเรซาเมตลูกปีนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน กับค่าระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ที่มาจาก การสอบเทียบมิติเรซา.....	111
รูปที่ 5.1 กระบวนการทดลองการหาคุณสมบัติแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์และเวลาที่ใช้ในการทดลอง	113
รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบระยะกระดกและความถี่ในการควบคุมแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์	117
รูปที่ 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบระยะกระดกโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการควบคุมแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการให้คลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม	118
รูปที่ 5.4 กระบวนการทดสอบแบบวัฏจักร ทำโดยการติดตั้งชิ้นงานทดสอบแล้วทำการกระตุ้นให้แอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ทำงาน 50000 ครั้ง โดยทำการวัดระยะกระดกตัวเทียบ 3 ช่วงเวลาที่ 0 ครั้ง, 25000 ครั้ง และ 50000 ครั้ง	119
รูปที่ 5.5 กระบวนการทดสอบผลของการติดตั้งที่มีผลต่อระยะกระดกตัวของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ โดยใช้ชิ้นงานตัวเดียวกัน	120

รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2	122
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2	123
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2	124
รูปที่ 5.9 กระบวนการทดสอบผลของการผลิตชิ้นงานที่มีผลต่อระยะกระดกตัวของแอกซ์ไอเตอร์ นิวเมติกส์	125
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากชิ้นงานที่ 1-5	127
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากชิ้นงานที่ 1-5	128
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากชิ้นงานที่ 1-5	129
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา	131
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา	132
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา	133
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกซ์ ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm	134
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกซ์ ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm	135
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกซ์ ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm	135

รูปที่ 5.19 (ก) ระยะเวลากระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 1 Hz (ข) ระยะเวลากระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 1 Hz	138
รูปที่ 5.20 (ก) ระยะเวลากระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 5 Hz (ข) ระยะเวลากระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 5 Hz	139
รูปที่ 5.21 (ก) ระยะเวลากระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 20 Hz (ข) ระยะเวลากระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วย ความถี่ 20 Hz	140
รูปที่ 6.1 (ก) แม่พิมพ์ชั้นของไหลจุลภาคที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (ข) แม่พิมพ์ชั้นควบคุมที่ สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (ค) กระบวนการสร้างชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหล	143
รูปที่ 6.2 (ก) ชิพทดสอบการรั่วไหล (ข) พอร์ตเชื่อมต่อของเหลวที่สอดท่อและหยอด PDMS แล้ว	143
รูปที่ 6.3 (ก) ภาพตัดขวางชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหลตามแนวช่องทางไหลจุลภาคชั้น ควบคุม (ข) ภาพตัดขวางชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหลตามแนวช่องทางไหลจุลภาคชั้นของ ไหล	144
รูปที่ 6.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการรั่วไหลของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์	145
รูปที่ 6.5 (ก) การให้ของเหลวใส่สีเข้าไปที่แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ก่อนเกิดการรั่ว (ข) การให้ ของเหลวใส่สีที่มีอัตราการไหลสูงขึ้นเข้าไปที่แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ก่อนหลังการรั่ว	145
รูปที่ 6.6 (ก) ชิพทดสอบการรั่วไหลก่อนการติดตั้ง (ข) การติดตั้งชิพทดสอบการรั่วไหลบนตัวจับ ยึดชิ้นงาน (ค) การติดตั้งชิพทดสอบการรั่วไหลบนตัวจับยึดชิ้นงานบนกล่องจุลทรรศน์ (ง) ภาพ โพกัสตำแหน่งแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการบันทึกวิดีโอ	147
รูปที่ 6.7 พิล์มบางบางส่วนในช่องทางไหลจุลภาคติดกับผนังของช่องทางไหล ทำให้ไม่สามารถปิด กั้นของเหลวได้	148
รูปที่ 6.8 แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทำงานที่แรงดันอากาศ 35 kPa ปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค โดยมีอัตราการไหล 0.5 ml/min (ทดสอบที่ช่องทางไหลด้านบน)	148
รูปที่ 6.9 แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทำงานที่แรงดันอากาศ 35 kPa ปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค โดยมีอัตราการไหล 1 ml/min (ทดสอบที่ช่องทางไหลด้านบน)	149

รูปที่ 7.1 การทำงานของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการเตรียมชิพและ
ล้างทำความสะอาดชิพ 153

รูปที่ 7.2 การทำงานของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการบรรจุเซลล์ 153

รูปที่ 7.3 การทำงานของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการลดอัตรา
ไหล 154

รูปที่ 7.4 การทำงานของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการปล่อยเซลล์เข้า
สู่ส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์..... 154

รูปที่ ก.1 โพรไฟล์ชิ้นงานที่มีความหยابผิว [97] 167

รูปที่ ก.2 เครื่องวัดความหยابผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicona- InfiniteFocusSL)..... 168

รูปที่ ก.3 จุดวัดความหยابผิวของแม่พิมพ์..... 170

รูปที่ ก.4 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวที่ยังไม่ได้ผ่านการกรองเทียบ (ขวา) ภาพพื้นผิวที่ผ่านการกรองแล้ว 171

รูปที่ ก.5 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวจริงที่ยังไม่ได้ผ่านการกรองเทียบ (ขวา) ภาพพื้นผิวจริงที่ผ่านการ
กรองแล้ว..... 171

รูปที่ ก.6 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวที่ผ่านการกรองที่ต้องลากเส้นโปรไฟล์ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย (ขวา)
ภาพพื้นผิวจริงที่ผ่านการกรองที่ต้องลากเส้นโปรไฟล์ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย..... 172

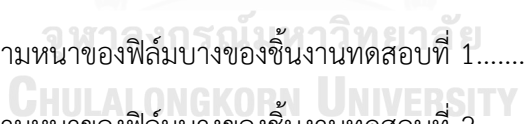
รูปที่ ค.1 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 1..... 209

รูปที่ ค.2 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 2..... 209

รูปที่ ค.3 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 3..... 210

รูปที่ ค.4 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 4..... 210

รูปที่ ค.5 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 5..... 211



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	แผนภูมิแกนต์ของขั้นตอนดำเนินงานที่สำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	4
ตารางที่ 2.1	ตารางเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไปกับการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยระบบของไหลจุลภาค [13].....	9
ตารางที่ 2.2	ตารางแสดงความต้องการพื้นฐานของการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไปและการเพาะเลี้ยงเซลล์ของระบบของไหลจุลภาค [13].....	10
ตารางที่ 2.3	การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์ว	14
ตารางที่ 2.4	การทบทวนวรรณกรรมของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์	25
ตารางที่ 2.5	สรุปการทบทวนวรรณกรรมของการใช้งานแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์	27
ตารางที่ 2.6	ตารางแสดงคุณสมบัติพื้นฐานของโพลีไดเมทิลไซโลเซน [40]	35
ตารางที่ 2.7	อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ สำหรับการหล่อขึ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงและแรงอัด [42].....	37
ตารางที่ 2.8	สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ สารผสมPDMS (10:1) โดยอุณหภูมิในช่วงเวลาการแข็งตัวที่ต่างกัน [42]	38
ตารางที่ 2.9	ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ [57], [56].....	55
ตารางที่ 2.10	การทบทวนวรรณกรรมการทดสอบการเชื่อมประสานชิ้นงาน	62
ตารางที่ 2.11	การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค.....	70
ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดความหนาของแม่พิมพ์	92
ตารางที่ 3.2	ตารางค่าความหนาของฟิล์มบางจากการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวทที่ทำจาก PVA ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์การปั่นเหวี่ยงแบบ 2 จังหวะ.....	95
ตารางที่ 5.1	ตารางคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากการติดตั้ง.....	121

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ใกล้วัตถุ 10X และ 50X.....	168
ตารางที่ ก.2 การเลือกใช้ระยะ Cut Off Length (Lc) กับช่วงค่าความหยابผิว และระยะการ ลากโปรไฟล์วัดค่าตาม ISO 4288-1996.....	169
ตารางที่ ก.3 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 1 จุด A.....	173
ตารางที่ ก.4 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 1 จุด B.....	174
ตารางที่ ก.5 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 2 จุด A.....	175
ตารางที่ ก.6 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 2 จุด B.....	176
ตารางที่ ก.7 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 3 จุด A.....	177
ตารางที่ ก.8 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 3 จุด B.....	178
ตารางที่ ก.9 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 4 จุด A.....	179
ตารางที่ ก.10 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยابผิวของแม่พิมพ์ที่ 4 จุด B.....	180
ตารางที่ ข.1 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 µm ของชิ้นงานที่ 1.....	182
ตารางที่ ข.2 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 µm ของชิ้นงานที่ 1.....	183
ตารางที่ ข.3 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 µm ของชิ้นงานที่ 1.....	184
ตารางที่ ข.4 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 µm ของชิ้นงานที่ 2.....	185
ตารางที่ ข.5 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 µm ของชิ้นงานที่ 2.....	186
ตารางที่ ข.6 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 µm ของชิ้นงานที่ 2.....	187

ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง..... 200

ตารางที่ ข.20 ตารางบันทึกระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง..... 201

ตารางที่ ข.21 ตารางบันทึกระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง..... 202

ตารางที่ ข.22 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร 203

ตารางที่ ข.23 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร 204

ตารางที่ ข.24 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร 205

ตารางที่ ข.25 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5..... 206

ตารางที่ ข.26 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5..... 207

ตารางที่ ข. 27 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5..... 208

ตารางที่ ค.1 ตารางบันทึกการวัดค่าความหนาของฟิล์มบาง..... 212

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 1 จะเป็นส่วนสำคัญที่บ่งชี้ถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเห็นภาพรวมของวิทยานิพนธ์ ซึ่งมีอยู่ 5 หัวข้อ ตั้งแต่ที่มาและความสำคัญของการพัฒนาการสร้างและการทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานระบบช่องทางไหลจุลภาค วัตถุประสงค์แสดงเป้าหมายหลักในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งมีทั้งการศึกษาในกระบวนการสร้างและการทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ขอบเขตงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นในรูปแบบที่ง่ายต่อการผลิตและมีราคาถูก ซึ่งประโยชน์จากการพัฒนาเทคนิคการสร้างและการทดสอบดังกล่าว จะช่วยให้ง่ายต่อการนำแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ในส่วนแผนการดำเนินงานจะแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกทำให้ราคาทางด้านอาหาร เสื้อผ้า สุขภาพสูงขึ้น ดังนั้นการลดค่าใช้จ่ายโดยการใช้อุปกรณ์ของไหลจุลภาค ประเภทห้องปฏิบัติการในชิพ (Lab on a Chip) จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ระบบสาธารณสุขโดยรวม ซึ่งอุปกรณ์นี้จะถูกออกแบบให้ราคาถูก ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งช่วยลดเวลาในการทดลอง ลดตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ [1]

ในปัจจุบันทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบกลไฟฟ้าขนาดจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้มีการพัฒนาชิพของไหลจุลภาคสำหรับการคัดแยกเซลล์ ด้วยขนาดโดยใช้ท่อจุลภาครูปร่างขดเกลียวสำหรับการวิจัยมะเร็งในรูปแบบเซลล์เดี่ยว ซึ่งเป็นการคัดแยกเซลล์โดยใช้แรงยกและแรงดันที่กระทำต่อเซลล์ โดยเกิดจากลักษณะของช่องทางไหลจุลภาคที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่มีอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที [2]

นอกจากนี้ทางทีมวิจัยได้พัฒนาชิพของไหลจุลภาคสำหรับการดักจับเซลล์ ซึ่งได้ออกแบบเป็นหลุมขนาดจุลภาพรูปทรงสามเหลี่ยม โดยเรียงตัวเป็นแถวภายในห้องเพื่อใช้ในการดักจับเซลล์หลังจากที่ผ่านส่วนของการคัดแยกเซลล์มาแล้ว โดยใช้อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง [3]

เมื่อพิจารณาในส่วนของการคัดแยกเซลล์และส่วนของการดักจับเซลล์นั้นจะมีอัตราการไหลที่แตกต่างกันซึ่งเมื่อทำการรวมระบบทั้งหมดภายในชิพของไหลจุลภาคชิพเดียวกัน จะทำให้เกิดปัญหาเพราะหากใช้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที เซลล์จะถูกคัดแยกออกมาจากขดเกลียว แต่ด้วยอัตรา

การไหลที่สูงมากจะทำให้เซลล์มีโอกาสถูกดักจับได้น้อย แต่แรกขณะที่ใช้อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงซึ่งด้วยอัตราการไหลที่ต่ำนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกเซลล์นั้นลดลง

ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์บางอย่างเชื่อมต่อระหว่างส่วนของการคัดแยกและส่วนของการเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของเซลล์ที่จะเข้าสู่ระบบต่อไป

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ขนาดจุลภาค คือ ไมโครแอกชูเอเตอร์ (Microactuator) [4] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงาน เช่น กระแสไฟฟ้า ในการกระตุ้นไมโครแอกชูเอเตอร์ให้เกิดการเคลื่อนที่ทางกลหรือของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการเคลื่อนที่ที่กลไกจะเคลื่อนที่ด้วยระยะในระดับนาโนเมตรถึงมิลลิเมตร ขณะที่แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในระดับนาโนนิวตันถึงมิลลินิวตัน แต่ในขณะที่ระบบของไหลจุลภาคจะใช้อุปกรณ์ในการจัดการช่องทางไหลจุลภาค

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอด้วยอุปกรณ์ ไมโครวาล์ว ซึ่งจะทำการกักขังเซลล์ที่มาจากผลของการคัดแยกเซลล์ ก่อนที่จะทำการปรับความเร็วแล้วปล่อยให้เข้าสู่ส่วนของการดักจับเซลล์ ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้ คือ ไมโครแอกชูเอเตอร์ประเภทไมโครวาล์ว

ไมโครวาล์วนั้นมีหลายประเภท [5] รายการเลือกชนิดที่มีความเหมาะสมกับเซลล์นั้นต้องคำนึงถึงการใช้งานว่ามีพลังงานหรือสัญญาณ เช่น ความร้อน สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก เป็นต้น ไม่ให้ไปรบกวนเซลล์ซึ่งส่งผลอาจทำให้เกิดเซลล์เกิดการแปรสภาพ กลายพันธุ์ รูปทรงเปลี่ยนไป หรืออัตราการตายสูงขึ้น จากกรณีที่ไม่มีการใช้พลังงานดังกล่าวในระบบของไหลจุลภาค ดังนั้นการใช้ไมโครวาล์วประเภทนิวเมติกส์หรือแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์โดยใช้ลมเป็นพลังงานภายนอกจะช่วยป้องกันปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้

ปัญหาที่มักพบในการสร้างชิพของไหลจุลภาคที่มีแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ คือ พิล์มบางความหนาของฟิล์มบางที่มีค่า 25-100 ไมครอน ซึ่งมีความบางและยากต่อการผลิตและการนำไปประสานชิ้นงาน เพราะฟิล์มบางนั้นไม่สามารถที่จะคงสภาพได้ จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตดังกล่าวก่อนนำไปประสานชิ้นงานอื่น ซึ่งจะมีกรณีการสร้างชั้นฟิล์มบางบนแผ่นฟิล์มสำเร็จรูปบาง ๆ ที่ติดอยู่บนชั้นของไหลจุลภาค ที่มีวัสดุ PMMA [6]

การเลือกใช้อีกวิธีหนึ่งคือ การใช้ชั้นสังเวย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นชั้นชั่วคราว สำหรับการสร้างชิ้นงานจริง เช่น แปรงนาโน [7] หรือการย้ายโครงสร้างขนาดจุลภาค [8] เป็นต้น การสร้างฟิล์มบางจำเป็นต้องมีชั้นสังเวย (sacrificial layer) ซึ่งมีหลายชนิดได้แก่ PMMA (Poly(methyl methacrylate)) โดยที่จะละลายในกรดอะซิโตนและ PVA (Polyvinyl alcohol) โดยที่จะละลายในน้ำ โดยในการเลือกชนิดชั้นสังเวยนั้นได้เลือก PVA มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

ขั้นตอนการสร้างชั้นสังเวย PVA เริ่มจากการสร้างชั้นสังเวย PVA บนแผ่นสแตนเลสที่ขัดเรียบมาแล้ว หลังจากทำการสร้างชั้นฟิล์มบาง PDMS (Polydimethylsiloxane) บนชั้นสังเวยที่สร้างบนแผ่นสแตนเลสแล้ว เราจะนำไปประสานกับชิ้นงานที่มีของไหลจุลภาคสำหรับลมอัด ซึ่งสร้างมาจากวิธี

ซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ซึ่งใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากเรซิน โดยสร้างจากเทคนิค Stereolithography

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอกระบวนการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่สามารถผลิตได้ง่าย ประหยัดและรวดเร็ว ตั้งแต่การเลือกวัสดุ การออกแบบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ตลอดจนการขึ้นตอนการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ แล้วจะทำการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอากาศ โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับกระจก เพื่อให้เห็นโปรไฟล์การขยายตัวของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ เพื่อใช้ในการพิจารณาการใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ในงานอื่น ๆ เช่น การแยกขนาด [9] หรือ ไมโครปั๊ม [10] เป็นต้น

คำสำคัญ

นิวเมติกส์ ระบบทางไหลจุลภาค การคัดแยกเซลล์ การเพาะเลี้ยงเซลล์ ไมโครแอกซ์เอเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการสร้างชิพของไหลจุลภาคและฟิล์มบาง
2. ศึกษาผลของขนาดของฟิล์มบางและการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อระยะกระดกของฟิล์มบาง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

นำเสนอวิธีการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว และทำการออกแบบระบบควบคุมนิวเมติกส์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์กับแรงดันลม โดยในการสร้างชิพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ จะใช้การหล่อ PDMS จากแม่พิมพ์ของเครื่องพิมพ์สามมิติและการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวีย กับการประสานด้วยเทคนิคการกระตุ้นพลาสมา

การทดสอบจะเริ่มจากการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานเพื่อหาช่วงแรงดันอากาศที่สามารถใช้งานได้ แล้วทำการหาระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นทั้งในแง่การติดตั้ง การผลิต และช่วงวัฏจักร หลังจากทดสอบระยะกระดกจะทำการทดสอบการปิดกั้นของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในช่องทางไหลจุลภาคโดยการให้อัตราไหลกับของเหลว เพื่อดูอัตราไหลที่สามารถปิดกั้นในช่องทางไหลจุลภาคได้

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

บทที่ 2 นี้จะเป็นการรวบรวมทฤษฎีและข้อมูลที่จำเป็นสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยได้ทำการรวบรวมเนื้อหาตั้งแต่รูปแบบของไมโครวาล์วที่มีอยู่ในปัจจุบัน, โครงสร้างและการใช้งานแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์, วัสดุที่ใช้ในงานระบบของไหลจุลภาค, เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นงาน, วิธีการสร้างชิ้นงาน, การเชื่อมประสานชิ้นงาน, การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน, การเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาคออกสู่ภายนอก, การควบคุมแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ และเทคนิคการวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งจะช่วยให้ท่านผู้สนใจนั้นสามารถทำความเข้าใจระบบของไหลจุลภาคได้

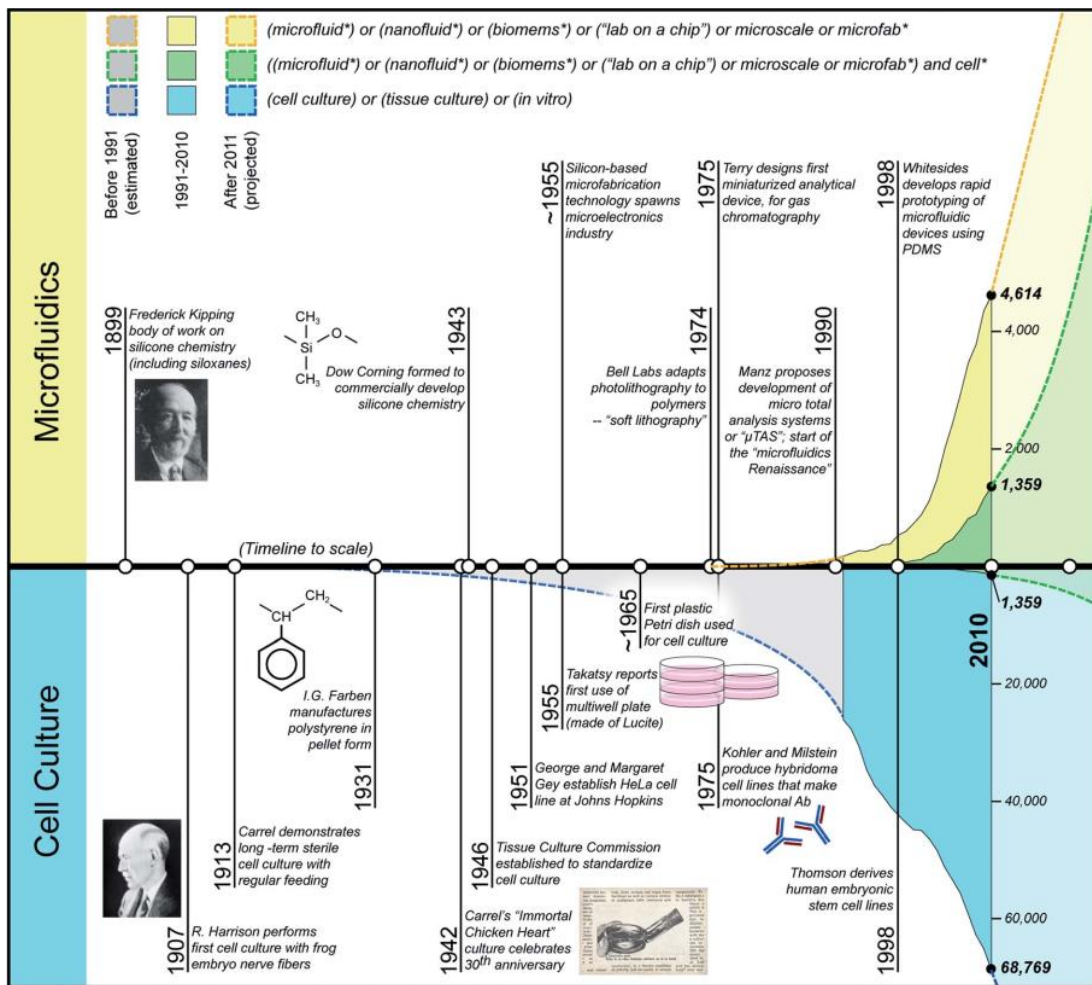
2.1 ประวัติความเป็นมาของระบบของไหลจุลภาคและระบบเพาะเลี้ยงเซลล์

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเพาะเลี้ยงเซลล์เริ่มมีมาตั้งแต่ช่วงต้นศตวรรษที่ 20 เมื่อ R. Harrison สามารถเพาะเลี้ยงเซลล์จากเอ็มบริโอของกบได้ ซึ่งในช่วงแรกนี้ส่วนมากจะเป็นการค้นพบวัสดุที่จะนำมาใช้ทำชิพของไหลจุลภาคกับการทดลองการเพาะเลี้ยงเซลล์ชนิดต่างๆ โดยเริ่มจากการค้นพบปฏิกิริยาทางเคมีของซิลิกอน ต่อมาช่วงปี 1943 บริษัทดอร์คอร์นิงพัฒนาสารซิลิกอนสำหรับการขายเชิงพาณิชย์

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาคในปัจจุบัน เริ่มจากช่วงปี 1955 เทคโนโลยีการผลิตระดับไมครอนด้วยซิลิกอนถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เมื่อเทคโนโลยีการผลิตวิธีซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) เกิดจากการประยุกต์วิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) เข้ากับวัสดุประเภทโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตชิพของไหลจุลภาค ต่อมาช่วงปี 1990 เมื่อมีการแนวคิดการวิเคราะห์ทางเคมีแบบองค์รวม (Micro Total Analysis System - μ TAS) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นยุคเรเนซองของระบบของไหลจุลภาคซึ่งเริ่มมีการประยุกต์ใช้ไมโครวาล์ว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานการเพาะเลี้ยงเซลล์ในชิพของไหลจุลภาคมากขึ้น เป็นผลให้ขอบเขตวิจัยได้ทวีคูณขึ้นมาเป็นจำนวนมาก

ช่วงปี 1998 เริ่มมีความสนใจในการใช้วัสดุ PDMS มาทำชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็ว (Rapid Prototype) ซึ่งถือเป็นหนึ่งในก้าวสำคัญที่ทำให้การวิจัยด้านระบบของไหลจุลภาคและการเพาะเลี้ยงเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว [10] ดังรูปที่ 2.1

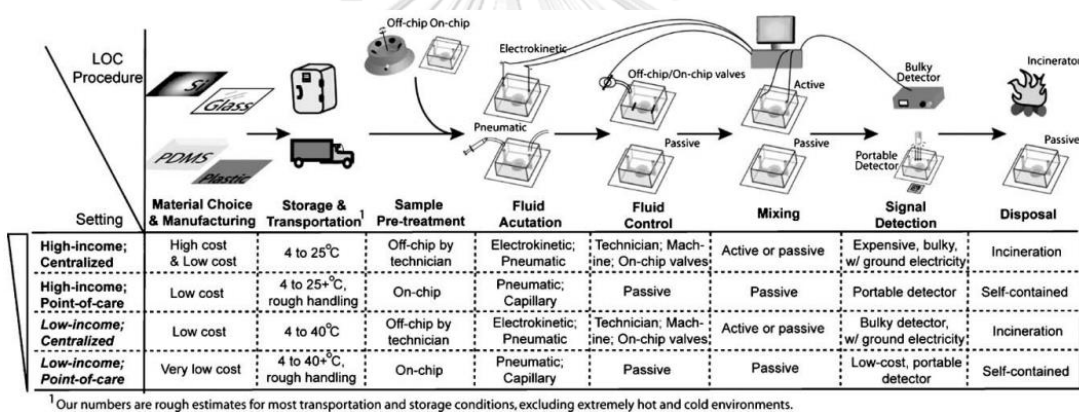
ความสำคัญของระบบของไหลจุลภาคที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน จาก การทดสอบแบบทั่วไปที่ต้องทำในห้องปฏิบัติการและต้องมีเครื่องมือซึ่งมีราคาสูง มาใช้อุปกรณ์ของ ไหลจุลภาคที่มีต้นทุนที่ถูกกว่า ใช้สารเคมี สารตัวอย่างน้อยกว่า ให้ผลที่ไม่มีค่าเบี่ยงเบน อีกทั้ง อุปกรณ์ของไหลจุลภาคบางชนิด สามารถนำไปใช้ทดสอบหน้างาน หรือจุดที่ให้ความช่วยเหลือผู้ป่วย ได้ (Point of Care) [9]



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงวิวัฒนาการในการเพาะเลี้ยงเซลล์และระบบของไหลจุลภาคตั้งแต่ช่วงปี 1989-2010 [10]

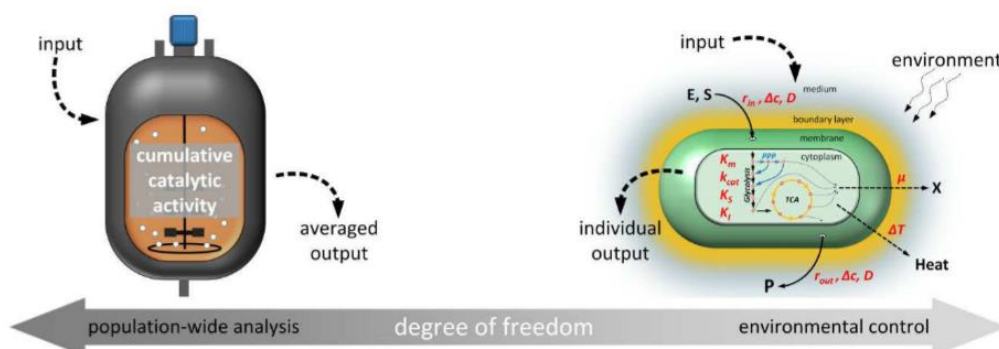
2.2 ความสำคัญต่อการพัฒนาห้องปฏิบัติการในชิพ

ปัจจัยสำคัญในการออกแบบ คือ ง่ายต่อการผลิต สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว มีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นแนวทางในการออกแบบชิพของไหลจุลภาค (Microfluidic Chip) ซึ่งโดยปกติจะมีลักษณะงานสำหรับกลุ่มประเทศรายได้ต่ำ 2 กรณี คือ กรณีประเทศที่มีรายได้ต่ำ และทำการทดสอบ ณ จุดผู้ป่วย (Point of Care) เช่น กระดาษทดสอบ Lab on a paper [11] ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ และควบคุมระบบการไหลและการผสมแบบ passive แต่ในการวิเคราะห์เซลล์จะเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Centralized) ดังรูปที่ 2.2 ด้วยการพัฒนาอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการในชิพ (Lab on a Chip) แทนการใช้รูปแบบการทดลองแบบทั่วไปจะช่วยลดระยะเวลาการทดสอบ การใช้สารและเชื้อตัวอย่าง ซึ่งช่วยลดต้นทุนโดยรวมได้ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทดสอบแบบทั่วไปเป็นการทดสอบโดยใช้ชิพของไหลจุลภาค



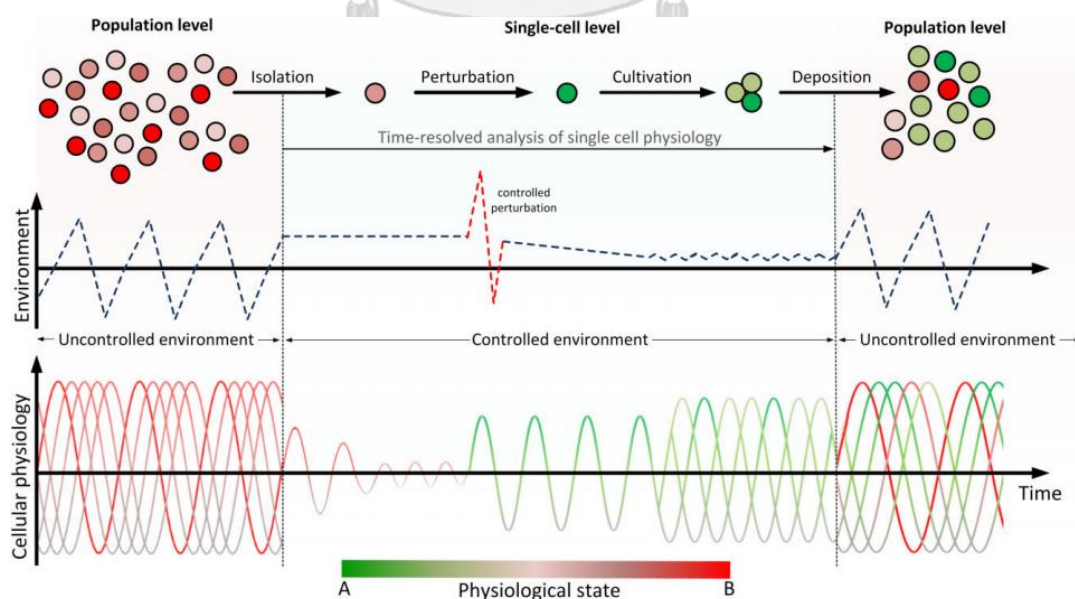
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงลักษณะการใช้งานในสถานที่ที่ต่างกับเงื่อนไขและข้อจำกัดที่ควรพิจารณาร่วม [11]

การวิเคราะห์เซลล์ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การวิเคราะห์แบบมหภาคหรือการวิเคราะห์จัดกลุ่มประชากร และการวิเคราะห์แบบจุลภาคหรือการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยว ซึ่งมีความแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์จัดกลุ่มประชากรจะเป็นการศึกษากระบวนการเกิดปฏิกิริยา การวัดค่าทำได้โดยการสุ่มภาพของกลุ่มเซลล์ที่อยู่ในระบบแล้วทำการวัดค่าเป็นตัวแทนกลุ่มประชากรซึ่งสามารถวัดค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรได้ เช่น ครึ่งชีวิต, อัตราการเติบโต และการวิเคราะห์เชิงเดี่ยวเป็นการศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตของเซลล์เดี่ยว ด้วยการใช้นิยามของไหลจุลภาคในการวิเคราะห์ซึ่งเป็นการเทียบข้อมูลพลวัตเทียบกับตำแหน่งและเวลา การวิเคราะห์กลศาสตร์เซลล์เดี่ยวและพลวัตที่เกิดจากการตอบสนองจากเงื่อนไขทางสภาพแวดล้อม ซึ่งสามารถจัดรูปแบบอย่างง่ายดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพแสดงระบบพลวัตของการเลี้ยงเซลล์แบบมหภาค(กลุ่มประชากร)และการเลี้ยงเซลล์แบบจุลภาค(เซลล์เดี่ยว) [12]

การวิเคราะห์เซลล์เดียวนั้นโดยปกติเราไม่สามารถหีบหรือจับเซลล์ได้โดยตรงรวมทั้งเซลล์ที่อยู่ในตัวอย่างที่เก็บมานั้นอาจมีหลายแบบหรือหลายขนาด ดังนั้นเราต้องทำการคัดแยกเซลล์ที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยระบบคัดแยกเซลล์ในระบบของไหลจุลภาค เพื่อทำการคัดแยกเซลล์ที่ต้องการ จากนั้นทำการดักจับเซลล์ที่ต้องการในระบบเพาะเลี้ยงเซลล์เดี่ยว ซึ่งเราจะทำการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เซลล์เกิดการเติบโตหรือแปรสภาพ โดยทำการศึกษาระบบพลวัตที่เกิดขึ้น เมื่อเซลล์เติบโตขึ้นแล้วเพิ่มจำนวนตัวเองหรือเกิดการแปรสภาพก็จะทำการกำจัดออกหรือนำออกมาใช้ต่อดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวโดยเริ่มจากกลุ่มประชากรจนถึงตอนหลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์ [12]

การสร้างระบบของไหลจุลภาคเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยว โดยที่สามารถจำลองสภาพแวดล้อมได้โดยการควบคุมค่าพารามิเตอร์และศึกษาการตอบสนองของเซลล์ต่อสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบระบบการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไปหรือแบบกลุ่มประชากร เทียบกับการเพาะเลี้ยงเซลล์ในระบบของไหลจุลภาคหรือเซลล์เดี่ยว สามารถเปรียบเทียบข้อแตกต่างได้ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

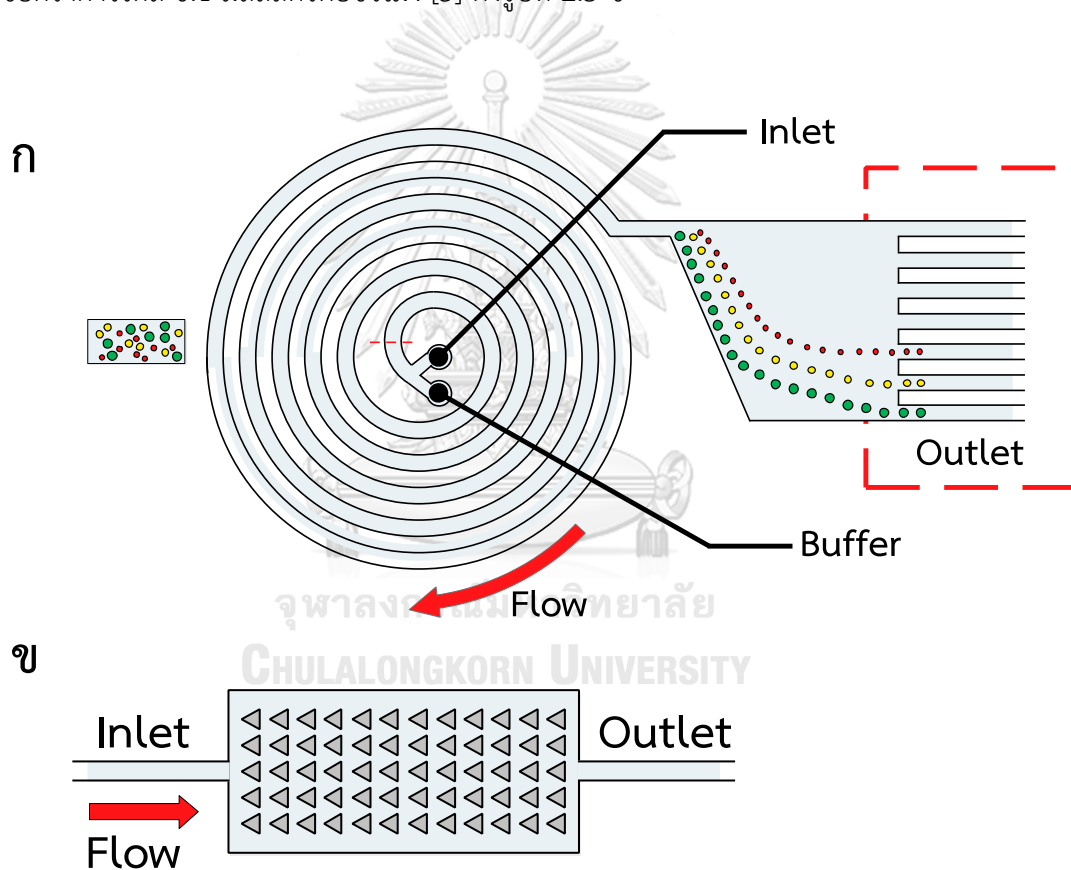
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไปกับการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยระบบของไหลจุลภาค [13]

	การเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไป	การเพาะเลี้ยงเซลล์ของระบบของไหลจุลภาค
การติดต่อกับสภาพแวดล้อมภายนอก (confinement)	เปิด (Open well)	ปิด (Closed Systems)
การควบคุมสเปซ	มีข้อจำกัดอยู่ที่ผนัง	ทำได้ดีกว่าอยู่ที่การออกแบบระบบ ให้สามารถเพาะเลี้ยงแบบสามมิติได้
การควบคุมของไหล	ไม่จำเป็น ระบบเป็น static	มีความต้องการสูง (laminar flow, perfusion , etc.)
สิ่งรบกวนทางกายภาพ	แทบจะไม่มี	มีโอกาสเกิดได้ เช่น shear force, stiffness
การใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์	ต้องใช้ข้อมูลในปริมาณที่มาก เพราะเป็นการวิเคราะห์แบบกลุ่มประชากร	ใช้ข้อมูลในปริมาณที่น้อยกว่า เพราะ เป็นการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยว
การอ่านค่า	มีข้อจำกัดในการอ่านค่า	สามารถนำเซนเซอร์เข้าไปตรวจวัดในระบบได้
การใช้สารเคมีและเซลล์ตัวอย่าง	ใช้ในปริมาณมาก	ใช้ในปริมาณที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับวิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไป
การทำแบบคู่ขนานและการประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น	เป็นไปได้	สามารถทำได้ เช่นกรณี microarray ที่ทำแบบคู่ขนานแล้วประยุกต์ระบบเซนเซอร์หรืออุปกรณ์บางชนิดให้ทำงานที่ซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงความต้องการพื้นฐานของการเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไปและการเพาะเลี้ยงเซลล์ของระบบของไหลจุลภาค [13]

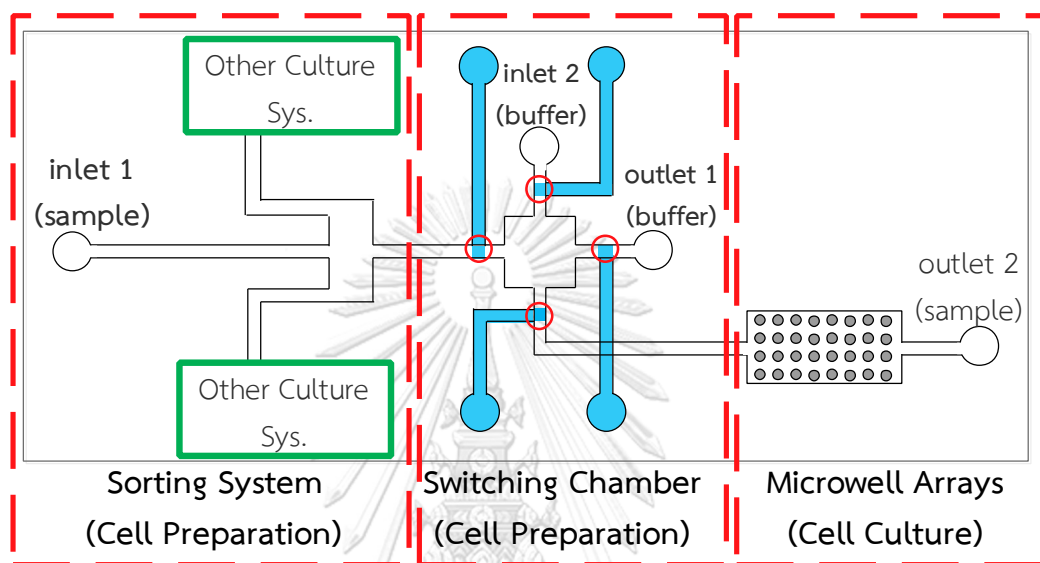
ความต้องการ	การเพาะเลี้ยงเซลล์แบบทั่วไป	การเพาะเลี้ยงเซลล์ของระบบของไหลจุลภาค
สามารถใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์ที่ทำงานระบบอัตโนมัติได้หรือไม่	สามารถทำได้	ไม่สามารถทำได้
การควบคุมอุณหภูมิและก๊าซ	ด้วยปริมาณที่มากช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว	ด้วยปริมาณที่น้อย จำเป็นต้องมีการควบคุมระบบพลวัต
การเพิ่มสารอาหารและการระบายของเสีย	ไม่ต้องเปลี่ยนบ่อย , ทำการเปลี่ยนด้วยมือในปริมาณที่มาก	มีการควบคุมอย่างแม่นยำ , ต้องมีการป้อนสารละลายแบบต่อเนื่อง
การกระตุ้นด้วยยาหรือโปรตีน และสังเกตการณ์ไปพร้อมกัน	ส่วนมากเป็นไปได้	เป็นไปได้
การทดสอบเซลล์แบบคู่ขนาน	เป็นไปได้ (เซลล์อยู่จำนวนมากในระบบ)	สามารถทำได้ในปริมาณที่สูง
การใช้ระบบอัตโนมัติในการเพาะเลี้ยงเซลล์	ต้องใช้หุ่นยนต์ขนาดใหญ่ที่มีราคาสูงในการควบคุม	สามารถใช้ระบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพในราคาที่ไม่แพงได้
การจัดการและการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยว	ทำการทดลองด้วยตนเอง ค่ามีความเที่ยงตรงต่ำ และทำการทดลองได้น้อย	ค่ามีความเที่ยงตรง และทำการทดลองได้มาก

ทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบกลไฟฟ้าขนาดจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวของเม็ดเลือดขาว ซึ่งมีในส่วนของคัดแยกเซลล์ด้วยอุปกรณ์ท่อขดแบบเกลียว เป็นการคัดแยกเซลล์หลากหลายขนาดให้ได้ช่วงของขนาดเซลล์เดี่ยวที่ต้องการ โดยไม่ใช้แรงภายนอกมากกระทำเพื่อหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเซลล์มะเร็ง การออกแบบใช้ประโยชน์จากแรงยกและแรงของดินกระทำต่ออนุภาคขนาดต่างๆ ซึ่งมีความแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาค มีอัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที [2] ดังรูปที่ 2.5ก และส่วนการเพาะเลี้ยงเซลล์เดี่ยวในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมขนาดจุลภาค สามารถดักจับเซลล์และทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมขนาดจุลภาคได้ ซึ่งใช้อัตราการไหล 0.1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง [3] ดังรูปที่ 2.5 ข



รูปที่ 2.5 (ก) อุปกรณ์การคัดแยกเซลล์แบบท่อขดเกลียว (ข) อุปกรณ์ดักจับเซลล์ด้วยหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมขนาดจุลภาค

อัตราการไหลที่ใช้ในอุปกรณ์ทั้ง 2 นี้มีความเร็วต่างกันมาก เมื่อประกอบในห้องปฏิบัติการในชิพเดียวกันนั้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์บางอย่าง เพื่อให้อัตราการไหลที่ใช้ในแต่ละส่วนที่ต่างกันนั้นสามารถทำงานได้อย่างราบรื่น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์คั่นกลางระหว่างส่วนการคัดแยกเซลล์และส่วนในการดักจับเซลล์เพื่อทำการลดอัตราการไหลดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของระบบของไหลจุลภาคภายในห้องปฏิบัติการในชิพ

เซลล์หรือไมโครพิตส์จะถูกฉีดเข้าทางอินเล็ต 1 ซึ่งจะมีขนาดของเซลล์หลายขนาด จึงต้องทำการคัดแยกขนาดในส่วนของการคัดแยกเซลล์ เพื่อให้เซลล์ที่เราจะนำไปเพาะเลี้ยงนั้นมีขนาดและคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเซลล์ไหลไปที่ห้อง (Chamber) ที่มีชุดแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์อยู่ 4 จุด (แถบสีฟ้าคือช่องทางไหลสำหรับลมอัดในส่วนที่วงกลมสีแดงคือตำแหน่งของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์) เซลล์ที่ผ่านการคัดแยกมาแล้วจะถูกขังไว้ เนื่องจากในระบบการฉีดแบบพาสซีฟ (Passive) จึงต้องออกแบบห้องไว้สำหรับพักเซลล์ก่อนทำการเปลี่ยนอัตราไหลด้วยทางเข้าอินเล็ต 2 ซึ่งจะพาเซลล์ไปยังหลุม ในส่วนของการเพาะเลี้ยงเซลล์ เพื่อทำการเพาะเลี้ยงและเมื่อเวลาผ่านไปจึงทำการตรวจสอบเซลล์ต่อไป

การทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ ต้องการระบบการไหลที่ราบเรียบเพื่อให้เซลล์สามารถคัดแยกขนาดด้วยระบบคัดแยกที่อาศัยแรงที่ก่อกำเนิดขึ้นระหว่างเซลล์หรือไมโครพิตส์ กับโครงสร้างในช่องทางไหลจุลภาค และระบบควบคุมแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ เพื่อใช้ในการเปลี่ยนอัตราการไหลระหว่างส่วนการคัดแยกเซลล์และส่วนการดักจับเซลล์

2.3 ไมโครวาล์ว

ไมโครวาล์วคือ ไมโครแอกชูเอเตอร์ (Microactuator) ประเภทหนึ่งที่ใช้ในการจัดการระบบของไหลจุลภาค เป็นอุปกรณ์ที่เริ่มใช้ช่วงปี 1990 ในการแนวคิดการวิเคราะห์ทางเคมีแบบองค์รวม (Micro Total Analysis System - μ TAS) [10] ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สามารถส่งงานจากภายนอก ทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานชิพของไหลจุลภาคมากขึ้น

2.3.1 หน้าที่ของไมโครวาล์ว

ไมโครวาล์วเป็นหนึ่งในอุปกรณ์พื้นฐานที่อยู่ในระบบของไหลจุลภาค สำหรับการจัดการการไหลของของเหลวในระบบของไหลจุลภาค [14] ซึ่งไมโครวาล์วมีอยู่ 2 ประเภทหลักๆ คือ

1. แอคทีฟไมโครวาล์ว (Active Microvalve)

เป็นไมโครวาล์วที่ใช้พลังงานภายนอกในการทำให้ไมโครวาล์วทำงาน ทั้งกรณีการใช้พลังงานไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก เพื่อทำให้อุปกรณ์ที่ติดอยู่กับฟิล์มบางเกิดการเปลี่ยนสภาพกรณีการใช้พลังงานภายนอกในการเปลี่ยนลักษณะของไหลหรือของแข็งที่ติดอยู่กับฟิล์มบางให้เกิดการเปลี่ยนสภาพ และกรณีการใช้พลังงานภายนอก เช่น นิวเมติกส์ในการเข้าไปดันฟิล์มบางโดยตรง

2. พาสซีฟไมโครวาล์ว (Passive Microvalve)

เป็นไมโครวาล์วที่ใช้พลังงานภายในชิพของไหลจุลภาคในการทำงาน เช่น เช็ควาล์ว (Check Valve) เป็นไมโครวาล์วการไหลแบบเดินหน้า Forward โดยใช้ทิศการไหลของของไหลในช่องทางไหลจุลภาคในการควบคุมทิศทาง

2.3.2 การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์ว

การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์วเป็นการรวบรวมรูปแบบของไมโครวาล์วประเภทต่างๆ ซึ่งมีทั้งแอคทีฟไมโครวาล์ว (Active Microvalve) และพาสซีฟไมโครวาล์ว (Passive Microvalve) สามารถแบ่งรูปแบบย่อย ๆ ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์ว

ผู้แต่ง	หลักการทํางาน	ประเภทของไมโครวาล์ว [5]
Zheng, Dai and Hongkai, 2009 Wu [15]	Active-Mechanical	ใช้สกรูกดท่อที่บรรจุน้ำอยู่ภายในห้องปิดให้ดันฟิล์มบางไปปิดช่องทางไหลจุลภาค
Brett, Zhao et al. 2011 [16]	Active-Mechanical	ใช้แท่งสแตนเลสขนาด 1.6 mm. หุ้มปลาย PDMS ในการปิดช่องทางไหลจุลภาคโดยการเลื่อนแท่งสแตนเลส
Chen, Chen et al. 2011 [17]	Active-Magnetic	ใช้แม่เหล็กถาวรวางบนแผ่นรอง PMMA ด้านบนเพื่อกดให้ปิดช่องทางไหลจุลภาค โดยที่ด้านล่างของชิพจะอยู่ติดกับแผ่นโลหะ
Casals-Terré, Duch et al. 2008 [18]	Active-Magnetic	การใช้แม่เหล็กถาวรในการดึงชั้น Co-Ni ในการเปิดหรือปิดไมโครวาล์ว
Pitchaimani, Sapp et al. 2009 [19]	Active - Thermopneumatic	ใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนให้กับชั้นของเหลวที่ไวต่อความร้อนให้ขยายตัว โดยการดันฟิล์มบางขึ้นไปปิดช่องทางไหลจุลภาค
Khoshmanesh, Almansouri et al. 2015 [20]	Active-Bubble hydrodynamic	ใช้อุปกรณ์ควบคุมเข็มฉีดยาให้ดันฟองอากาศที่อยู่ในช่องทางไหลจุลภาค ไปขวางกั้นช่องทางไหล
Yang and Lin 2007 [21]	Active-Phase Change	ใช้อุปกรณ์นิวเมติกส์ดันลมอัดไปที่พาราฟินให้ไปดันฟิล์มบางลงไปปิดช่องทางไหลจุลภาค
Desai, Tice et al. 2012 [22]	Active - Electrostatic	ฟิล์มบางจะติดกับชั้นตัวนำซึ่งเป็นอิเล็กโทรดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ อิเล็กโทรดอีกตัวถูกฝังใต้ช่องทางไหลจุลภาค เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า จะทำให้ฟิล์มบางที่ถูกดึงด้วยชั้นตัวนำจะเคลื่อนที่เข้าไปใกล้อิเล็กโทรดอีกตัวที่ถูกตรึงตำแหน่งไว้

ตารางที่ 2.3 การทบทวนวรรณกรรมของไมโครวาล์ว (ต่อ)

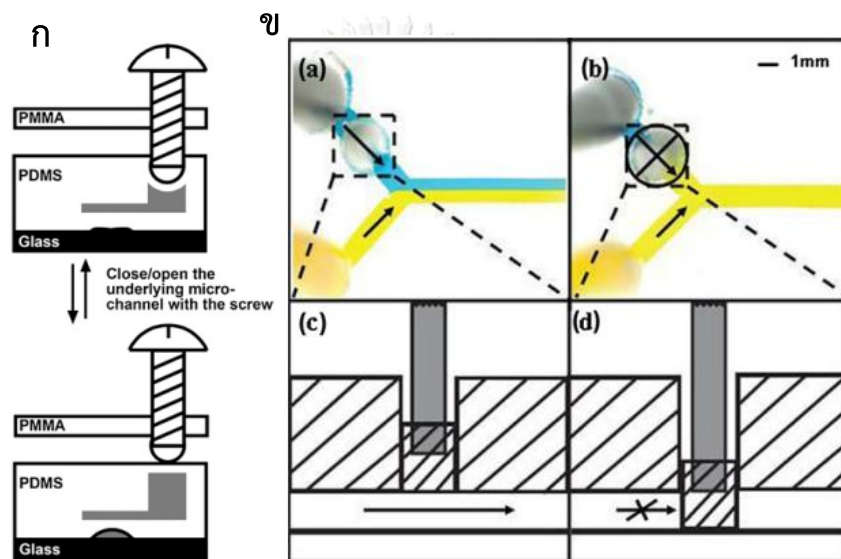
ผู้แต่ง	หลักการทำงาน	ประเภทของไมโครวาล์ว [5]
Tice, Bassett et al. 2013 [23]	Active - Electrostatic	อิเล็กโทรด 2 แท่ง สร้างจาก Carbon Nanotube จะมีอิเล็กโทรดตัวหนึ่งฝังใต้ช่องทางไหลจุลภาค อีกตัวหนึ่งจะถูกฝังในฟิล์มบาง เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ฟิล์มบางเคลื่อนที่ปิดช่องทางไหลจุลภาค
Gui and Ren 2011 [24]	Active – Thermal – Shape Memory Alloy	เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวด อะลูมิเนียมที่พันรอบโลหะจำรูป Shape Memory Alloy – SMA ให้เคลื่อนที่โดยจะไปดันหรือดึงผนังด้านข้างช่องทางไหลจุลภาค ให้ไปปิดหรือเปิดช่องทางไหลจุลภาค
Leshner- Perez, Weerappuli et al. 2014 [25]	Passive – Check Valve	ใช้เครื่องปั๊มต้นเข็มชนิดยา 2 เข็มที่มีขนาดต่างกัน โดยของเหลวที่ไหลผ่าน check valve จะเป็นอัตราส่วนต่อกัน
Gorkin, Park et al. 2010 [26]	Passive - Capillary	ควบคุมการไหลของของเหลวโดยใช้แรงสู่ศูนย์กลาง (centripetal force)

2.3.3 รูปแบบของไมโครวาล์ว

รูปแบบของไมโครวาล์วตามการใช้งานจะมีอยู่ 2 รูปแบบใหญ่ๆ ตามที่กล่าวมาในขั้นต้น คือ แอคทีฟไมโครวาล์ว (Active Microvalve) เป็นไมโครวาล์วที่ใช้พลังงานภายนอกในการทำให้ไมโครวาล์วทำงาน และพาสซีฟไมโครวาล์ว (Passive Microvalve) เป็นไมโครวาล์วที่ใช้พลังงานภายในชีพของไหลจุลภาคในการทำงาน โดยสามารถแบ่งประเภทย่อย ๆ จากรูปแบบการทำงานของไมโครวาล์วที่แตกต่างกัน เช่น

(1) แอคทีฟไมโครวาล์วแบบการใช้แรงทางกล

แอคทีฟไมโครวาล์วแบบใช้แรงทางกล คือการใช้อุปกรณ์ทางกลบางอย่างในการปิดช่องทางไหล เช่น การใช้สกรูในการดันของเหลวในห้องปิด ซึ่งของเหลวในห้องปิดโดยการไปดันฟิล์มบางไปปิดช่องทางไหลจุลภาคได้ [15] (รูปที่ 2.7ก) โดยสกรูจะถูกยึดกับแผ่นอะคลิลิก ที่บริเวณปลายสกรูจะอยู่ในชั้น PDMS การเปิดปิดช่องทางไหลจุลภาคทำได้โดยการไขสกรู หรือจะเป็นการใช้แท่งสแตนเลสขนาด 1.6 mm. ที่หุ้มปลายด้วย PDMS ในการเลื่อนปิดช่องทางไหลจุลภาค [16] (รูปที่ 2.7ข) ซึ่งล้วนเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสร้างและราคาถูก

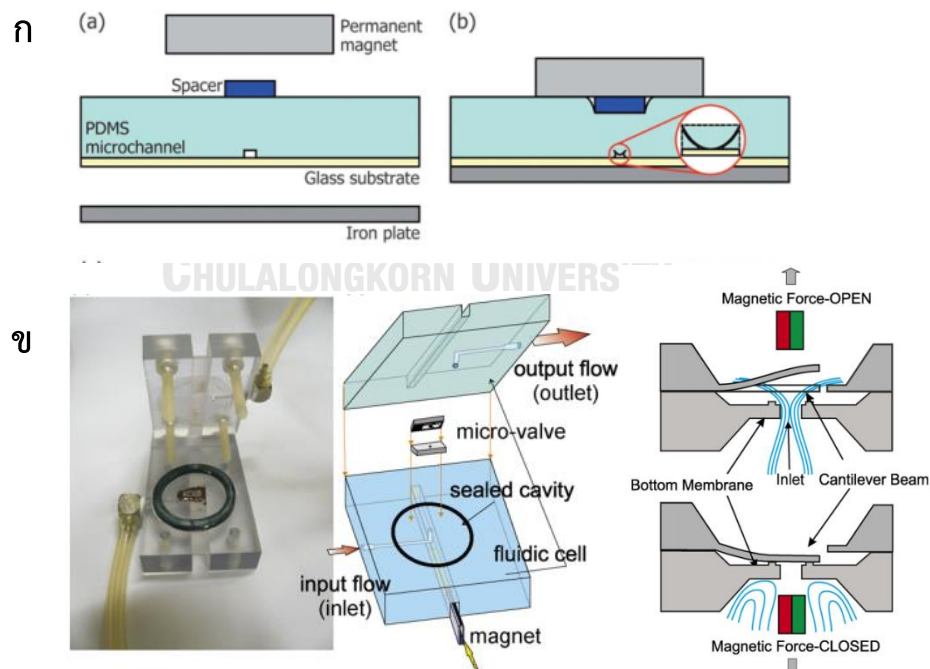


รูปที่ 2.7 (ก) การใช้สกรูในการดันของเหลวในห้องปิดไปดันฟิล์มบางปิดช่องทางไหลจุลภาค [15]

(ข) การใช้แท่งที่ปลายหุ้ม PDMS ปิดช่องทางไหลจุลภาค [16]

(2) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบสนามแม่เหล็ก

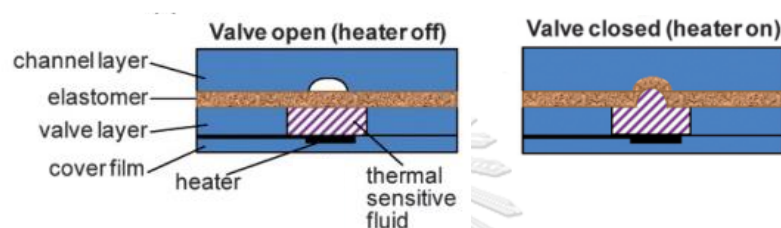
แอกทีฟวาล์วที่ใช้สนามแม่เหล็กในการเปิดหรือปิดไมโครวาล์วสามารถทำได้โดยที่ฟิล์มบางหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขวางกั้นช่องทางไหลจุลภาคจะต้องมีความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กหรือแม่เหล็กถาวรฟิล์มบางหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขวางกั้นช่องทางไหลจุลภาคจะเกิดการเคลื่อนที่ไปปิดช่องทางไหลจุลภาค เมื่อทำการคลายสนามแม่เหล็ก ฟิล์มบางหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการขวางกั้นช่องทางไหลจุลภาคจะเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิม เช่น การใช้แม่เหล็กถาวรในการควบคุมช่องทางไหลจุลภาค [17] (รูปที่ 2.8ก) สามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ 5 ส่วนด้วยกัน คือ ชั้นของไหล, กระจก, แผ่นรองอะคลิลิก, แผ่นโลหะ และแม่เหล็กถาวร โดยทำการสร้างระบบช่องทางไหลจุลภาคโดยการประสานชั้นของไหลกับกระจกก่อน จากนั้นให้ทำการวางแผ่นโลหะด้านล่างและวางแผ่นรองอะคลิลิกในบริเวณที่ต้องการเป็นไมโครวาล์ว จากนั้นเมื่อต้องการปิดช่องทางไหลจุลภาคให้นำแม่เหล็กถาวรมาวางที่ตำแหน่งแผ่นรองอะคลิลิก ให้ไปกดปิดช่องทางไหลจุลภาค หรือจะเป็นการใช้ชั้นฟิล์มบางที่ปลูกชั้น Co-Ni [18] (รูปที่ 2.8ข) ซึ่งชั้น PDMS ทั้ง 2 ชั้นจะมีช่องในการดันแม่เหล็กถาวรให้เข้าไปที่ตำแหน่งไมโครวาล์วโดยใช้แม่เหล็กถาวรในการเปิดหรือปิดช่องทางไหลจุลภาค



รูปที่ 2.8 (ก) ภาพอุปกรณ์ที่สำคัญของไมโครวาล์ว การใช้แม่เหล็กถาวรกดแผ่นรองอะคลิลิกให้ปิดช่องทางไหลจุลภาค [17] (ข) ลักษณะของโครงสร้างไมโครวาล์วที่ใช้แม่เหล็กถาวร การทำงานของไมโครวาล์วเมื่อต้องการเปิดหรือปิดไมโครวาล์ว [18]

(3) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบความร้อน

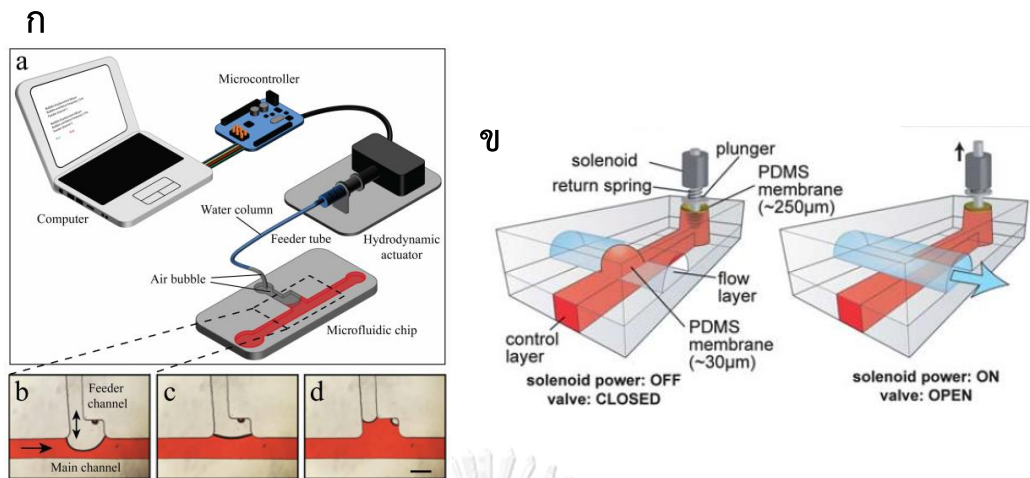
การใช้ของเหลวที่ไวต่อความร้อนที่อยู่บริเวณที่ต้องการเปิดหรือปิดช่องทางไหลจุลภาค สามารถทำได้โดยการให้พลังงานภายนอกเช่นความร้อนเพื่อให้ของเหลวที่ไวต่อความร้อนเกิดการแล้สารดังกล่าวจะไปดันฟิล์มบางเพื่อปิดช่องทางไหลจุลภาค เช่น การใช้ของเหลวต้นฟิล์มบางให้ไปปิดช่องทางไหลจุลภาค โดยการใช้กระแสไฟฟ้าจ่ายไปที่ตัวทำความร้อนให้ของเหลว 3M Fluorinert FC40 ที่มีจุดเดือด : $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ ให้เกิดการขยายตัวไปดันฟิล์มบางไปปิดช่องทางไหลจุลภาค ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนต่อของเหลวที่ไวต่อความร้อน เพื่อให้ขยายตัวไปปิดช่องทางไหลจุลภาค [19]

(4) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบอุทกศาสตร์ของฟองอากาศหรือของเหลวสำหรับปิดกั้นช่องทางไหล

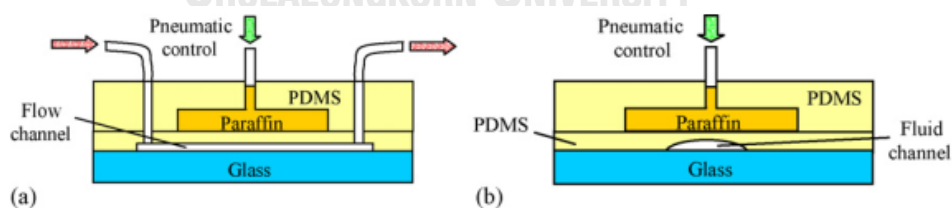
การใช้ฟองอากาศในการปิดช่องทางไหลจุลภาค ทำได้โดยการควบคุมเข้มข้นที่บรรจุของเหลว ในการควบคุมตำแหน่งของฟองอากาศให้ไปปิดหรือเปิดช่องทางไหลจุลภาค [20] (รูปที่ 2.10ก) ซึ่งฟองอากาศมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ ง่ายต่อการควบคุม, มีความสะอาด, สามารถบีบอัดได้ และสามารถเข้ากันได้กับเซลล์และเนื้อเยื่อ นอกจากนี้การควบคุมควบคุมฟิล์มบางสามารถทำได้โดยการใช้โซลินอยด์วาล์วที่ปลายติดแท่งโลหะ [27] เมื่อต้องการปิดช่องทางไหลให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าไปที่โซลินอยด์วาล์วเพื่อให้เส้นแท่งโลหะไปกดบริเวณห้องปิดตายที่มีของเหลวขังไว้อยู่ โดยของไหลจะถูกดันออกทุกทิศทางทำให้บริเวณฟิล์มบางที่อ่อนที่สุดเกิดการขยายตัวไปปิดช่องทางไหลจุลภาคได้ (รูปที่ 2.10ข)



รูปที่ 2.10 (ก) การควบคุมฟองอากาศด้วยเข็มฉีดยาเพื่อให้ฟองอากาศไปขวางกั้นช่องทางไหลจุลภาค [20] (ข) การใช้โซลินอยด์ที่ติดตั้งที่ปลายคันทึบฝังให้ของเหลวในห้องปิดไปดันช่องทางไหลจุลภาค [27]

(5) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบการเปลี่ยนสถานะของสาร

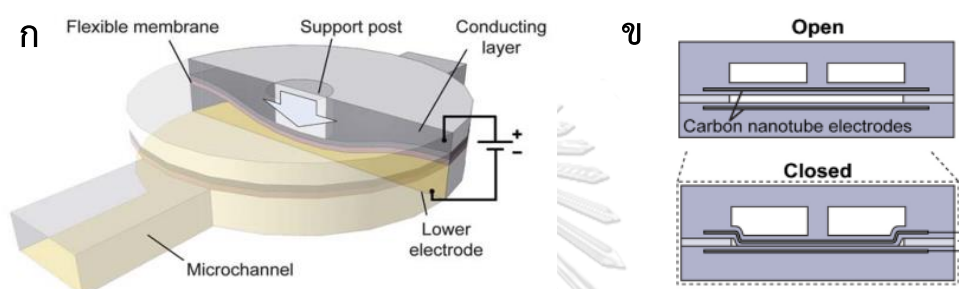
การเปลี่ยนสถานะของสารที่อยู่บริเวณที่ต้องการเปิดหรือปิดช่องทางไหลจุลภาคสามารถทำได้โดยการให้พลังงานภายนอกเพื่อให้สารดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนสถานะของแข็งเป็นของเหลวแล้วสารดังกล่าวจะไปดันฟิล์มบางเพื่อปิดช่องทางไหลจุลภาค เช่น การใช้ระบบนิวเมติกส์ในการดันเข้าไปที่พาราฟิน [21] ซึ่งเมื่อความดันสูงมากพอจะทำให้สถานะของพาราฟินเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวและไปดันฟิล์มบาง ซึ่งเมื่อตัดการจ่ายลมอัดจะทำให้ช่องทางไหลจุลภาคขยายตัวและฟิล์มบางกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การใช้ลมอัดทำให้พาราฟินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวแล้วไปดันฟิล์มบางให้ปิดช่องทางไหลจุลภาค [21]

(6) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบสนามไฟฟ้า

การควบคุมไมโครวาล์วโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่แท่งอิเล็กโทรด โดยที่อิเล็กโทรดส่วนแรกจะติดตั้งใต้ช่องทางไหลจุลภาค ส่วนอิเล็กโทรดอีกแผ่นหนึ่งจะติดอยู่กับฟิล์มบาง [22] (รูปที่ 2.12 ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และดึงให้ฟิล์มบางเข้าไปปิดช่องทางไหลจุลภาค หรือจะเป็นกรณีอิเล็กโทรด 2 แท่ง สร้างจาก Carbon Nanotube [23] (รูปที่ 2.12ข) จะมีอิเล็กโทรดตัวหนึ่งฝังใต้ช่องทางไหลจุลภาค อีกตัวหนึ่งจะถูกฝังในฟิล์มบาง เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ฟิล์มบางเคลื่อนที่ปิดช่องทางไหลจุลภาค

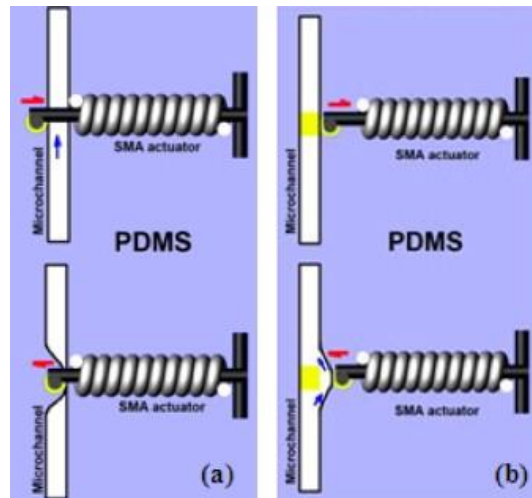


รูปที่ 2.12 (ก) อิเล็กโทรดติดกับฟิล์มบาง [22] (ข) อิเล็กโทรด Carbon Nanotube [23]

หลักการควบคุมไมโครวาล์วนี้จะใช้อิเล็กโทรด 2 ตัว ตัวแรกจะเป็นตัวที่อยู่คงที่ในขณะที่อิเล็กโทรดอีกตัวจะติดอยู่กับฟิล์มบาง ซึ่งเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการดึงอิเล็กโทรดเข้าหากัน ทำให้ฟิล์มบางซึ่งติดกับอิเล็กโทรดเคลื่อนที่เข้าไปปิดช่องทางไหลจุลภาค

(7) แอคทีฟไมโครวาล์ว แบบโลหะจำรูป

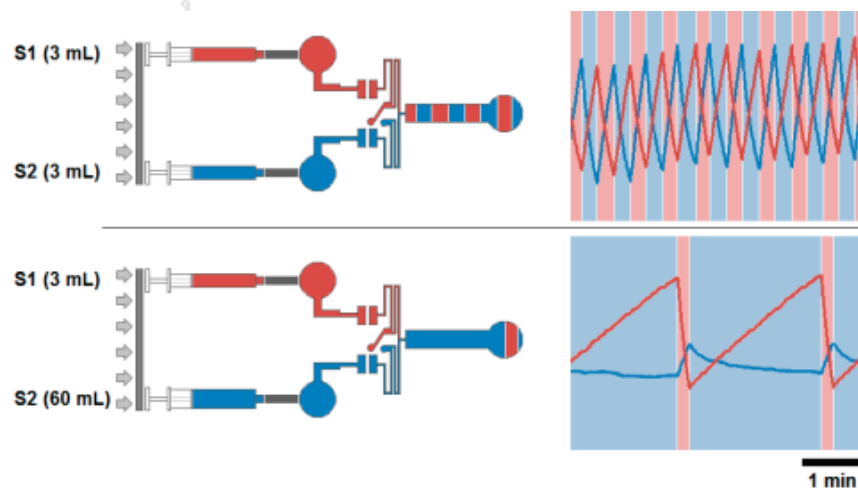
การใช้งานไมโครวาล์วแบบโลหะจำรูป (Shape Memory Alloy – SMA) จะต้องให้พลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้โลหะจำรูปเกิดการเปลี่ยนสภาพ โดยที่บริเวณปลายหรืออุปกรณ์ที่ติดกับไมโครวาล์วจะเคลื่อนที่ไปปิดหรือเปิดช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งเมื่อไม่ต้องการใช้งานไมโครวาล์วจะต้องทำการตัดพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้โลหะจำรูปคายความร้อนและกลับมาอยู่ในสภาพปกติ เช่น การกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดอะลูมิเนียมที่พันรอบโลหะจำรูป ให้เคลื่อนที่โดยที่ปลายโลหะจำรูปที่ติดกับผนังด้านข้างช่องทางไหลจุลภาคไปดันหรือดึงผนังด้านข้างช่องทางไหลจุลภาค ให้ไปปิดหรือเปิดช่องทางไหลจุลภาค [24] ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การใช้โลหะจำรูปในการเปิดช่องทางไหลจุลภาค [24]

(8) พาสซีฟไมโครวาล์ว แบบเช็ควาล์ว

พาสซีฟไมโครวาล์วแบบเช็ควาล์ว เป็นไมโครวาล์วที่ใช้ควบคุมการไหลแบบทิศทางเดียว ทำให้ของไหลไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ หรือกรณีที่เช็ควาล์วคอยควบคุมการไหลจากอินพุต 2 ทาง โดยการใช้แรงดันของของไหลทางด้านอินพุตในการเปลี่ยนทิศทางการไหล เช่น การผสมสารเคมี 2 อย่างให้เป็นอัตราส่วนสามารถทำได้โดยการใช้ปั๊มเข็มฉีดยาเดียวกันโดยการให้เข็มฉีดยาทั้ง 2 เข็ม มีขนาดที่ไม่เท่ากันโดยจะมีตัวเช็ควาล์วคอยสับเปลี่ยนทิศทางการไหลเข้าระบบระหว่างสารที่มาจากเข็มฉีดยาที่ 1 และเข็มฉีดยาที่ 2 (รูปที่ 2.14) การใช้เข็มฉีดยา 2 เข็มด้วยปั๊มฉีดยาเดียวกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งสารที่เป็นอัตราส่วนต่อกัน



รูปที่ 2.14 การใช้เข็มฉีดยาที่ 1 ขนาด 3 มิลลิลิตรเทียบกับการใช้เข็มฉีดยากรณี 3 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร [25]

2.3.4 สรุปรูปแบบการเลือกไมโครวาล์ว

การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้ามีผลต่อฟิล์มบางของเซลล์ ซึ่งหากอยู่ในช่วงวิกฤตสามารถทำให้ฟิล์มบางของเซลล์สลายตัวเป็นไอออนของโซเดียมและคลอไรด์ได้ [28] ความร้อนที่เกิดกับเซลล์เลี้ยงลูกด้วยนมสามารถทำให้ยีนเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ [29]

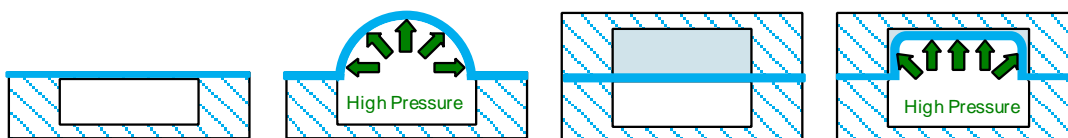
จากตัวอย่างข้างต้น หากมีการใช้พลังงานภายนอก เช่น พลังงานไฟฟ้า สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความร้อน อาจส่งผลให้เซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากถูกรบกวนจากพลังงานภายนอกตามที่ได้กล่าวมา ดังนั้นการใช้ไมโครวาล์วประเภทนิวเมติกส์หรือแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์เป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม เพราะใช้เพียงแต่แรงดันอากาศซึ่งจะไม่เกิดพลังงานไฟฟ้า สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และความร้อนไปรบกวนเซลล์

2.4 แอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์

ไมโครวาล์วนั้นมีหลายประเภทตามที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งการใช้พลังงานเพื่อทำให้ไมโครวาล์วทำงาน ไม่ว่าจะการใช้สนามไฟฟ้า, สนามแม่เหล็กและความร้อน มีโอกาสทำให้เซลล์เกิดการแปรสภาพซึ่งทำให้พลวัตของเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการรบกวนของพลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไมโครวาล์ว พลังงานจากลมถือเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งใช้ลมในการเปลี่ยนแปลงระยะกระดกของฟิล์มบาง ไม่เกิดการใช้พลังงานนิวเมติกส์ในการรบกวนเซลล์ ในหัวข้อนี้จะเป็นการสรุปรายละเอียดที่สำคัญของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ ได้แก่ โครงสร้างและรูปแบบการใช้งาน เป็นต้น

2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์

แอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมทิศทางการไหลในระบบของไหลจุลภาค ซึ่งอาศัยการเปลี่ยนแปลงของวัสดุอ่อน เช่น ฟิล์มบาง ให้เกิดการเคลื่อนที่ไปปิดหรือเปิดช่องทางไหลจุลภาค โดย 2 ภาพทางซ้ายมือจะเป็นกรณีที่ไม่มีช่องทางไหลจุลภาคในตำแหน่งเหนือฟิล์มบาง เมื่อไม่มีแรงดันอากาศ ฟิล์มบางจะไม่เกิดการขยายตัวแต่เมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศ จะทำให้ฟิล์มบาง ณ ตำแหน่งแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ เกิดการขยายตัวในทุกทิศทาง ในขณะที่ 2 ภาพทางขวามือจะเป็นกรณีที่มีช่องทางไหลจุลภาคในตำแหน่งเหนือฟิล์มบาง เมื่อไม่มีแรงดันอากาศจะไม่เกิดการดันฟิล์มบางไปปิดช่องทางไหล แต่เมื่อมีการให้แรงดันอากาศที่สูงมากพอ ฟิล์มบางจะสามารถไปปิดช่องทางไหลจุลภาคได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 รูปแบบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ รูปทางซ้ายมือตอนยังไม่ทำงาน (ปกติเปิด) และรูปทางขวามือตอนที่ทำงาน (ได้รับแรงดันอากาศ)

ประเภทแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ การแบ่งตามลักษณะโครงสร้างและการแบ่งลักษณะตามฟังก์ชันการใช้งาน การแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจะขึ้นกับลักษณะของตำแหน่งท่อของไหลและท่อลม ส่วนการแบ่งลักษณะตามฟังก์ชันการใช้งาน Normally Open/Normally Close โดยในเบื้องต้น เมื่อพิจารณาจากปัจจัยดังกล่าวที่ได้กล่าวมา เราสามารถแบ่งประเภทของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ออกได้เป็น 5 รูปแบบด้วยกัน [30]

1. แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติเปิด มีชั้นควบคุมอยู่เหนือชั้นของไหล

ลักษณะแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์กรณีที่มีชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์อยู่เหนือระบบช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศจะทำให้ฟิล์มบางขยายตัวดันลงไปปิดช่องทางไหลจุลภาค มีลักษณะการใช้งานแบบปกติเปิด (Normally Open) ดังรูปที่ 2.16ก

2. แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติเปิด มีชั้นควบคุมอยู่ที่ชั้นของไหล

ลักษณะแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์กรณีที่มีชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์อยู่ที่ระบบช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศจะทำให้ฟิล์มบางขยายตัวดันขึ้นไปปิดช่องทางไหลจุลภาค มีลักษณะการใช้งานแบบปกติเปิด (Normally Open) ดังรูปที่ 2.16ข

3. แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติปิด มีชั้นควบคุมอยู่เหนือชั้นของไหล

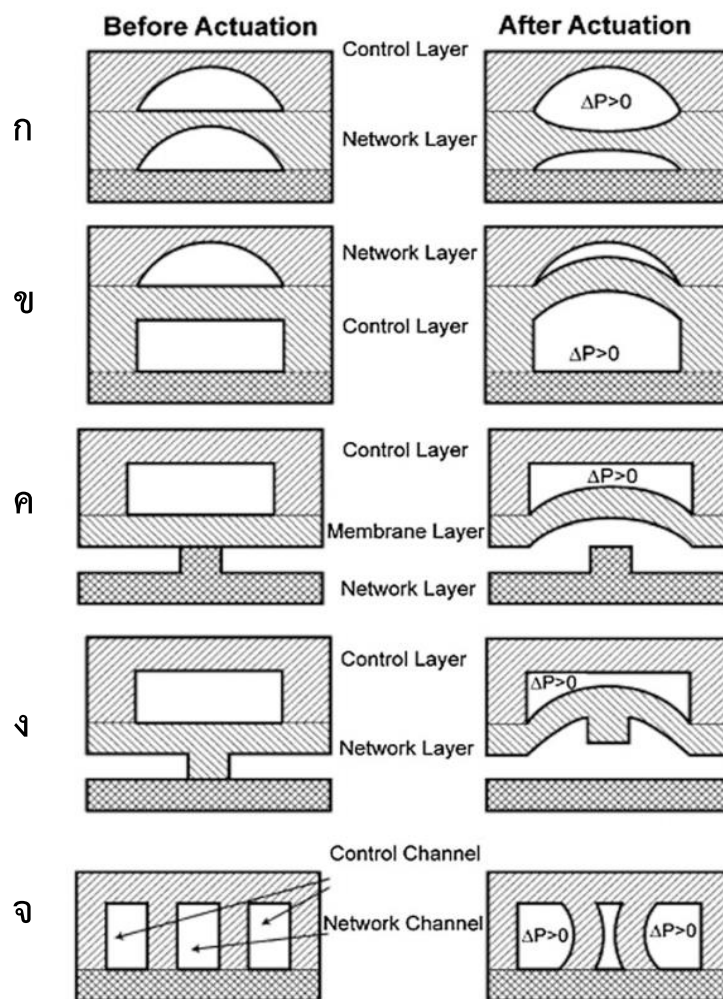
ลักษณะแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์กรณีที่มีชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์อยู่เหนือระบบช่องทางไหลจุลภาค โดยที่มีส่วนปิดกั้นที่ถูกสร้างร่วมกับชั้นของระบบช่องทางไหลจุลภาค เมื่อทำการดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มบางถูกดูดขึ้นไปดันชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์ มีลักษณะการใช้งานแบบปกติปิด (Normally Close) ดังรูปที่ 2.16ค

4. แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติปิด มีชั้นควบคุมอยู่ที่ชั้นของไหล

ลักษณะแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์กรณีนี้ที่ชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์อยู่เหนือระบบช่องทางไหลจุลภาค โดยที่มีส่วนปิดกั้นที่ถูกสร้างร่วมกับฟิล์มบางเมื่อทำการดูดอากาศออกให้อยู่ในสถานะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มบางถูกดูดขึ้นเข้าไปด้านชั้นระบบควบคุมนิวเมติกส์ มีลักษณะการใช้งานแบบปกติปิด (Normally Close) ดังรูปที่ 2.16ง

5. แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติเปิด มีช่องควบคุมอยู่ประกบด้านช่องทางไหลจุลภาค

ลักษณะโครงสร้างจะแตกต่างจากแบบที่กล่าวมาในข้างต้นโดยที่ช่องทางไหลจุลภาคจะอยู่กึ่งกลาง ในขณะที่ช่องสำหรับระบบนิวเมติกส์จะอยู่ด้านข้าง ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศจะทำให้ฟิล์มบางขยายตัวดันลงไปปิดช่องทางไหลจุลภาค มีลักษณะการใช้งานแบบปกติเปิด (Normally Open) ดังรูปที่ 2.16จ



รูปที่ 2.16 แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์แบบต่างๆ โดยฝั่งซ้ายเป็นกรณีที่ยังไม่ทำงานและฝั่งขวาเป็นกรณีทำงาน [30]

2.4.2 การทบทวนวรรณกรรมของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

การทบทวนวรรณกรรมของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ในที่นี้จะพิจารณาจากกระบวนการสร้างและการนำไปใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการสร้างชิ้นงานทดสอบ และหา ลักษณะของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในการปิดช่องทางไหลจุลภาค โดยสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การทบทวนวรรณกรรมของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

ผู้แต่ง	กระบวนการสร้าง
Kim and Kim, 2014 [31]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ NPR (KMPR 1035, Microchem. Corp.) - ชิ้นงานสร้างจากกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) (12:1) - แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ใช้ PDMS:Curing Agent (10:1/12:1/14:1) - นำมาตั้งเตาร้อน 100°C เป็นเวลา 10, 30 และ 60 ตามลำดับ - นำไปประสานกับกระจกสไลด์ ด้วยออกซิเจนพลาสมา (45 W, 5s., 500 mtorr O₂)
Wang et al., 2015 [32]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ PR SU-8 โดยสร้าง ทั้ง 2 ชั้น คือ ชั้นช่องทางไหลที่มีไมโครฟิลลาร์และชั้นควบคุมด้วยกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ในอัตราส่วน 10:1 - ชั้นควบคุมจะมี PR ที่แข็งตัว ซึ่งจะล้างออกหลังทำการประสานทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา
Huang, Wu and Lee, 2009 [10]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ NPR SU-8 50 สำหรับการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) (10:1) - ฟิล์มบาง 140 ไมครอน สร้างจาก PDMS:Curing Agent 10:1 โดยปั่นเป็นเวลา 30 วินาที ที่ 550 rpm - ทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา
Gijs et al., 2016 [9]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ PR SU-8 100 กับการกัดแห้งที่แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ - ทำการสร้างฟิล์มบาง 25 ไมครอน

ตารางที่ 2.4 การทบทวนวรรณกรรมของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ (ต่อ)

ผู้แต่ง	กระบวนการสร้าง
Cooksey, Sip and Folch, 2009 [33]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ NPR SU-8 2035, MicroChem) - มีการสร้างชิ้นงาน 3 ชั้นด้วยกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) - หลังเท PDMS ลงแม่พิมพ์ทิ้งไว้ 1 คืน บนเตาร้อนที่ 65°C - พิล์มบาง 20 ไมครอน สร้างจาก PDMS : hexane ในอัตราส่วน 3:1 โดยปั่นเป็นเวลา 30 วินาที ที่ 3000 rpm แล้วทิ้งบนเตาที่ 65°C เป็นเวลา 4 นาที - ทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา
Whitesides et al., 2014 [34]	<ul style="list-style-type: none"> - การสร้างชิ้นงานใช้กระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) (10:1) และเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยชิ้นส่วนที่เป็น PDMS จะมี 3 ชั้น - ชิ้นงานช่องทางไหลสร้างด้วยอัตราส่วน Lithography (10:1) อบที่ 65°C เป็นเวลา 4 ชม. - พิล์มบาง 30 ไมครอน สร้างจาก PDMS:Curing Agent 10:1 โดยปั่นเป็นเวลา 60 วินาที ที่ 1500 rpm (200 ไมครอน 60 วินาที ที่ 200 rpm) - ทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา
Yoon et al., 2015 [35]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ NPR SU-8 สำหรับการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) (15:1) - หลังเทให้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 75°C เป็นเวลา 1 ชม. - ทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมาที่กระแสจลด์
Jamshaid et al., 2013 [36]	<ul style="list-style-type: none"> - แม่พิมพ์สร้างจากกระบวนการฉายแสง UV โดยใช้ NPR SU-8 3025 - การสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อโพลีเมอร์ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) (15:1) โดยใช้เวลา 45 นาที ที่อุณหภูมิ 75°C - ทำการประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา แล้วทำการอบ 70°C เป็นเวลา 4 ชม.

การใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับงานในระบบของไหลจุลภาคมีหลายรูปแบบ ซึ่งใน ส่วนของการใช้งานจะขอขยายความในหัวข้อถัดไป

2.4.3 การใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในงานหลายงาน เช่น การ กรองขนาดของ C.Elegans ตัวอย่างชุดเดียวกัน ซึ่งมีเฟสการเติบโตของ C.Elegans แตกต่างกัน [9], การแยกไมโครบีดส์จากอ่าง (reservoir) โดยการใช้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เป็นตัวกรองขนาดและใช้ ไมโครปั๊มในการสร้างอัตราการไหลทั้งด้านตัวอย่างและด้านบัฟเฟอร์ เพื่อให้ระบบสามารถแยกไมโคร บีดส์ออกมาได้ [10]

การใช้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สองตัวสำหรับการเปลี่ยนทิศทางการไหลสำหรับหยุด ของเหลวให้เคลื่อนที่ไปตามที่ต้องการ การใช้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในการกดไปที่หยุดของเหลวที่ ไหลออกมาอย่างต่อเนื่องเพื่อรวมกันให้เป็นหยุดของเหลวขนาดใหญ่

(1) แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการดักจับและปลดปล่อยเซลล์

การดักจับเซลล์และปลดปล่อยเซลล์เดี่ยว ถือเป็นกลยุทธ์ในการแยกเซลล์เดี่ยวจากคลุทธ์หนึ่งที่มี ประสิทธิภาพ โดยการใช้ชุดแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในการดักจับเซลล์

การดักจับแอนติบอดีโดยการใช้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในการดักจับซึ่งใช้ร่วมกับแกลวไมโครฟิลลาร์ที่อยู่ด้านบนของชิพในการดักจับ [32] โดยที่ของเหลวสามารถไหลผ่านระบบดักจับเซลล์ได้ใน ขณะที่แอนติบอดีจะถูกแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ดักจับได้ทั้งหมด โดยการใช้แรงดันอากาศดันฟิล์มบาง ให้ไปแนบสนิทกับแกลวไมโครฟิลลาร์ทำให้แอนติบอดีถูกดักจับได้ดังรูปที่ 2.17 หรือจะใช้ตัวแอกซ์เอ เตอร์นิวเมติกส์ในการดักจับไมโครบีดส์ โดยการดันฟิล์มบางเพื่อดักจับไมโครบีดส์ โดยที่ไมโครบีดส์ เม็ดอื่นสามารถไหลหลบไปทางบายพาสได้ [31]

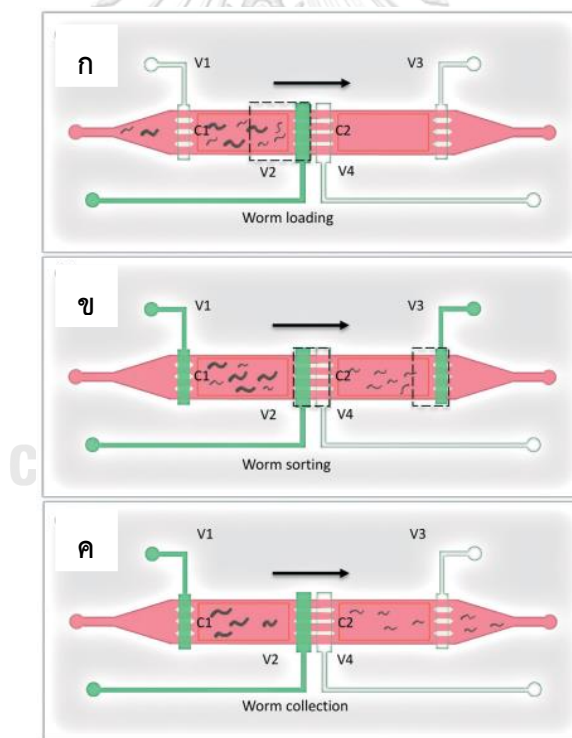


รูปที่ 2.17 ระบบดักจับและปลดปล่อยเซลล์ ตอนยังไม่ทำงาน (ภาพซ้าย) และตอนทำงาน (ภาพขวา) [32]

(2) ตัวกรองใช้ในการคัดแยกขนาดเซลล์ (Filter for Sorting System)

การคัดแยกเซลล์หรือไมโครบิตส์มักใช้ในการคัดแยกขนาดที่มีความแตกต่างกันด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์โดยที่เซลล์หรือไมโครบิตส์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถไหลผ่านได้ ซึ่งการคัดแยกด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์นี้จะไม่สามารถแยกขนาดที่แตกต่างกันหลายๆค่าได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการสร้างอุปกรณ์และแรงดันอากาศที่ใช้ เช่น การแยก *C.elegans* และการดักจับไมโครบิตส์หรือแอนติบอดี [9] ดังรูปที่ 2.18 เป็นต้น

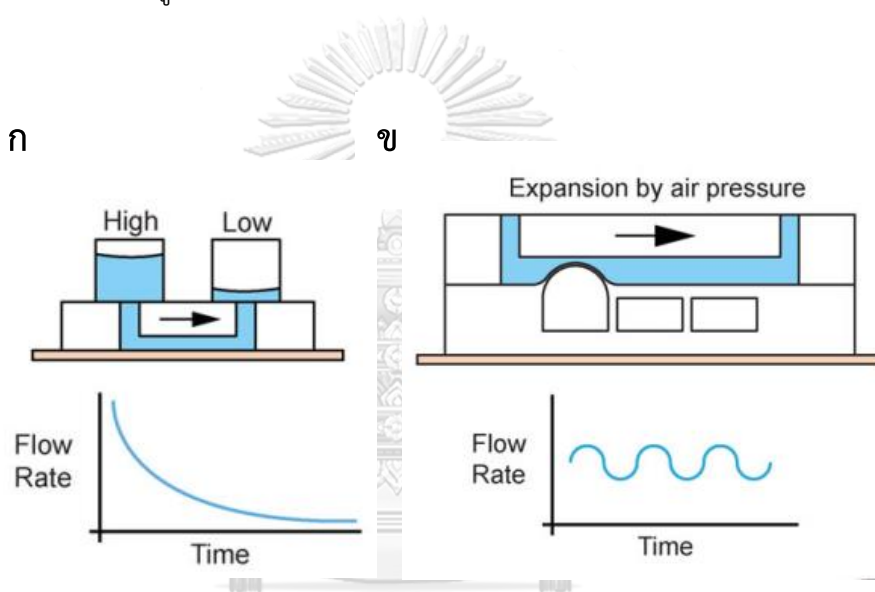
การแยก *C.elegans* ที่มีวัยต่างกันจากตัวอย่างเดียวกันสามารถทำได้โดยใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์โดยให้ไปปิดช่องทางไหลจุลภาค เมื่อทำการปล่อยตัวอย่างเข้าทางห้องที่ 1 เพื่อที่จะกรอง *C.elegans* ที่มีขนาดเล็กกว่าออกทางห้องที่ 2 *C.elegans* จะไหลเคลื่อนที่ไปที่บริเวณมุมของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่มีช่องเพียงพอให้ *C.elegans* ที่วัยการเติบโตช้ากว่า (ขนาดเล็ก) สามารถไหลผ่านจากห้องที่ 1 ไปห้องที่ 2 ได้ในขณะที่วัยที่เติบโตเร็วกว่า (ขนาดใหญ่) จะถูกกักตัวไว้ที่ห้องที่ 1



รูปที่ 2.18 ระบบคัดแยก *C.elegans* ด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [9]

(3) ไมโครปั๊ม

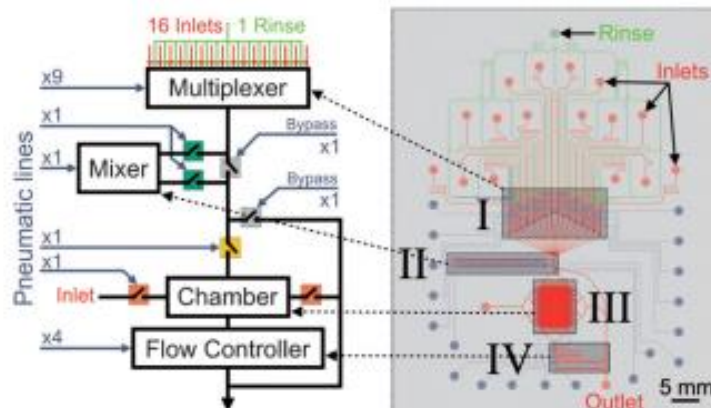
ไมโครปั๊มเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลให้มีคงที่มากขึ้น จากกรณีที่เป็นอ่างต่อกับชีพของไหลจุลภาค 2 ชุด ซึ่งมีระดับของเหลวในอ่างทั้ง 2 ชุดไม่เท่ากัน โดยด้านที่มีระดับของเหลวในอ่างสูงมากจะทำให้อัตราการไหลสูงซึ่งจะดันให้ของเหลวไหลไปทางอ่างที่มีระดับของเหลวต่ำกว่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปเมื่อระดับของไหลลดลงจะทำให้อัตราการไหลต่ำ เป็นเทคนิคพาสซีฟ (Passive) ดังรูปที่ 2.19ก แต่เมื่อใช้ไมโครปั๊ม ที่ทำจากแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์จะช่วยแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้ โดยการเรียงชุดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์เพื่อทำให้สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ เป็นเทคนิค (Active) ดังรูปที่ 2.19ข



รูปที่ 2.19 (ก) แผนภาพการทำงานของระบบของไหลโดยแรงโน้มถ่วงและกราฟแสดงอัตราการไหล (ข) แผนภาพการทำงานของไมโครปั๊มและกราฟแสดงอัตราการไหล [38]

(4) วาล์วเปิดปิดฟังก์ชันการทำงาน (Functional Valve)

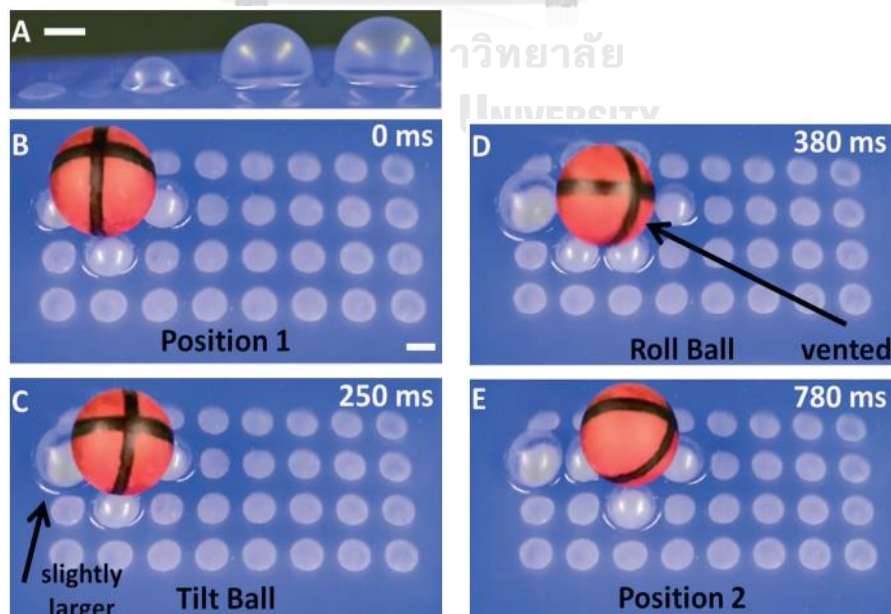
การออกแบบชีพที่สามารถรองรับงานที่หลากหลายได้จะช่วยประหยัดงบประมาณในการสร้างแลพออกแบบชีพทางไหลจุลภาคได้ เช่น การควบคุมห้องปฏิบัติการขนาดย่อมที่มีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลายซึ่งใช้ในงานเพาะเลี้ยงเซลล์หรืองานทางชีววิทยา สามารถเลือกการใช้งานได้โดยการเปิดช่องทางไหลจุลภาคโดยการใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [33] ซึ่งสามารถเลือกเปิดหรือปิดฟังก์ชันการใช้งาน เช่น ไมโครมิกเซอร์, จำนวนมัลติเพล็กซ์เซอร์สำหรับการนำเข้าสู่สาร, ระบบบายพาส, หรือระบบควบคุมอัตราการไหลเป็นต้น ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 อุปกรณ์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการในชิพที่มีแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในการควบคุมอุปกรณ์ [33]

(5) วาล์วสำหรับควบคุมการเลื่อนหรือหมุนของวัตถุ

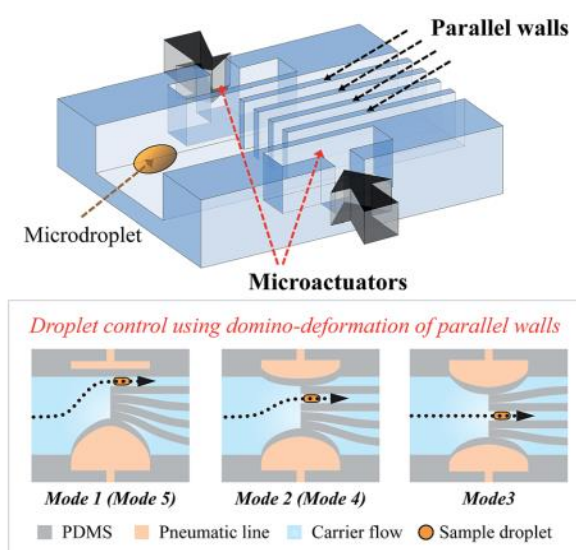
การควบคุมตำแหน่งของวัตถุสามารถทำได้โดยการใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ 2 ตัว ที่อยู่ในระบบจะทำหน้าที่ในการกักลมอัดไว้ ซึ่งลมอัดที่ทำการกักเก็บไว้จะมีขนาดต่างกันขึ้นกับเวลาในการเก็บ โดยแรงดันอากาศจะอยู่ที่ 34 kPa ซึ่งระยะเวลาในการกักอากาศ คือ 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิวินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถใช้หลักการดังกล่าวในการเคลื่อนย้ายวัตถุไปที่บริเวณใดก็ได้ โดยการควบคุมขนาดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์บน Braille display ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ขนาดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่เกิดจากการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [34]

(6) การเปลี่ยนทิศทางการไหลของหยดของเหลว (Droplet) ด้วยแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์

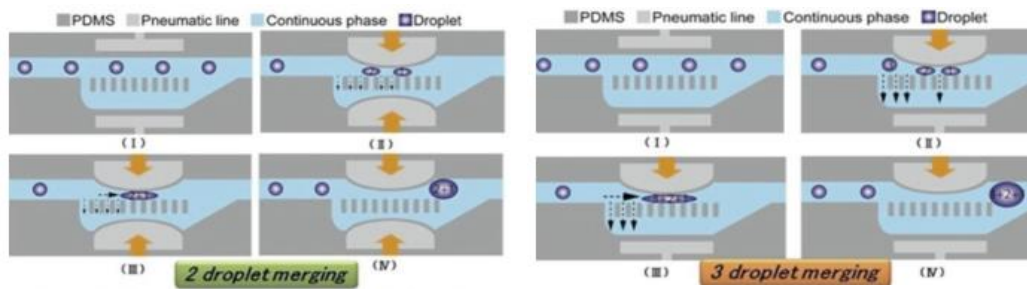
เทคนิคการใช้แอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ 2 ตัวที่วางในตำแหน่งด้านข้างช่องทางไหลจุลภาค เพื่อควบคุมการไหลของหยดของเหลว [35] ให้ออกไปตามทางที่ต้องการสามารถทำได้โดยการควบคุมการขยายตัวของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ทั้ง 2 ตัวเพื่อเปลี่ยนทิศการไหล โดยที่ความดันที่ให้กับแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ทั้ง 2 ตัวนี้จะเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การปรับทิศทางการไหลของหยดของเหลวโดยใช้แอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ [35]

(7) การรวมหยดของเหลว (Droplet) ขนาดเล็กให้เป็นหยดของเหลว (Droplet) ขนาดใหญ่ด้วยแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์

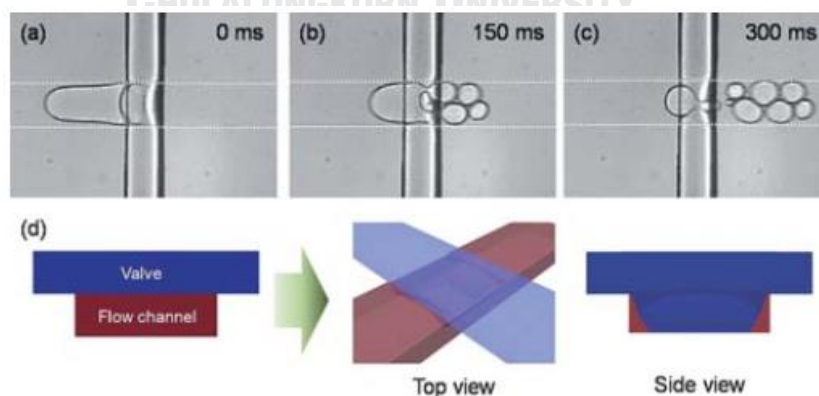
การผสมหยดของเหลวด้วยไมโครมิกเซอร์มีอยู่หลายวิธี แต่การใช้ความร้อนและอัลตราโซนิกสามารถทำให้คุณสมบัติของหยดของเหลวเปลี่ยนไป และการใช้สนามไฟฟ้าจะสามารถใช้กับหยดของเหลวที่มีขนาดเท่ากันในค่าความหนืดเท่ากัน ซึ่งยากต่อการควบคุม การใช้แอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ในการรวมหยดของเหลวที่ไหลออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยการตีหยดของเหลวเข้าไปที่แถวไมโครฟิลลาร์เพื่อรวมหยดของเหลวเข้าด้วยกันเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ได้อย่างง่ายดาย [36] เช่น การรวมหยดของเหลว 2 หยดและ 3 หยด ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การรวมหยดของเหลว 2 หยด (ภาพซ้าย) และการรวมหยดของเหลว 3 หยด (ภาพขวา) [36]

(8) การสร้างรวมหยดของเหลว (Droplet) ขนาดเล็กจากหยดของเหลว (Droplet) ขนาดใหญ่ ด้วยการใช้แรงดันอากาศ

การใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในการสร้างหยดของเหลวขนาดต่างๆ [37] โดยการปรับเปลี่ยนค่าความดันอากาศที่เกิดขึ้น ซึ่งในการสร้างหยดของเหลวขนาดเล็กทำได้โดยการใช้อัตราไหลที่เร็วกว่าหยดของเหลวขนาดใหญ่ที่ต่อท่อแบบที (T-Junction) ก่อนที่หยดของเหลวขนาดใหญ่จะไหลไปที่แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ด้วยความเร็วสูงเพื่อให้เกิดการแตกตัวของหยดของเหลวขนาดใหญ่ที่ไหลเข้ามาให้มีขนาดที่เล็กลงโดย ดังรูปที่ 2.24ก-ค ที่เมื่อค่าความดันอากาศที่จ่ายให้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สูงขึ้นจะทำให้หยดของเหลวของเหลวมีขนาดที่เล็กลง โดยตำแหน่งของช่องทางไหลจุลภาคจะอยู่ใต้ชั้นควบคุม เมื่อทำการป้อนแรงดันอากาศทำให้ฟิล์มบางเกิดการขยายตัวไปปิดช่องทางไหลจุลภาค ดังรูปที่ 2.24 ง



รูปที่ 2.24 (ก-ค) การตีหยดของเหลวให้เป็นหยดของเหลวขนาดเล็กด้วยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ (ง) โครงสร้างของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์และการทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ [37]

2.4.4 สรุปรูปแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

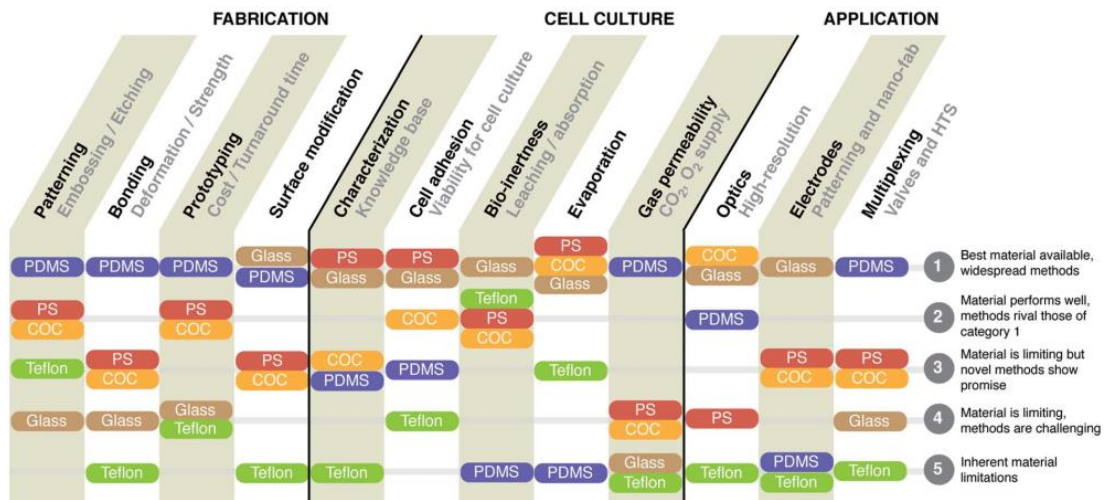
แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในงานที่หลากหลาย ขึ้นกับรูปแบบการนำไปใช้ โครงสร้างของระบบช่องทางไหลจุลภาค อุปกรณ์จ่ายแรงดันอากาศ การนำแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ไปปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาคไม่ให้เซลล์หรือไมโครบีดส์ไหลผ่านได้ จะมีลักษณะคล้ายแบบตัวกรอง โดยการปล่อยให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้แต่เซลล์หรือไมโครบีดส์ไม่สามารถไหลผ่านได้ และต้องมีคุณสมบัติในการดักจับและปลดปล่อยเซลล์หรือไมโครบีดส์เพื่อใช้ในการลดอัตราการไหลจากส่วนคัดแยกเซลล์กับส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์ในส่วนการหารูปแบบการผลิตที่ดีกว่าการใช้แม่พิมพ์จากกระบวนการฉายแสง (Photolithography) กับออกซิเจนพลาสมาจะอยู่ในหัวข้อถัดไป (หัวข้อที่ 2.5)

2.5 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ควบคุม และทดสอบระบบของไหลจุลภาคในปัจจุบัน

หัวข้อนี้จะเป็นหัวข้อที่ทำการทบทวนวรรณกรรมในแง่เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ควบคุม และทดสอบระบบของไหลจุลภาคในปัจจุบัน เพื่อใช้ในการหารูปแบบการผลิตแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ให้มีประสิทธิภาพในราคาที่ถูกลงและรวดเร็ว อีกทั้งยังปลอดภัยและสะดวกต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยในหัวข้อที่ 2.5 จะครอบคลุมทั้ง วัสดุที่ใช้ในการในงานระบบของไหลจุลภาค เทคนิคการผลิตชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติ เทคนิคการเชื่อมประสาน การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน เทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค เทคนิคการควบคุมแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ระบบนิวเมติกส์ เทคนิคการวัดภาพระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ และการคำนวณระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

2.5.1 วัสดุในงานระบบของไหลจุลภาค

วัสดุที่นิยมมาใช้ในการงานระบบของไหลจุลภาค จะมีอยู่ด้วยกัน 3 ตัว คือ PDMS , PS และ กระฉก (รูปที่ 2.25) ซึ่งในงานการสร้างต้นแบบ, การเชื่อมประสานชิ้นงาน รวมทั้งการสร้างวาล์วควบคุมช่องทางไหลจุลภาค มักนิยม PDMS แต่ในขณะทำงานการเพาะเลี้ยงเซลล์จะเป็น PS และ กระฉก ดังนั้นในงานการสร้างระบบของไหลจุลภาคจะใช้ PDMS เป็นหลัก



รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุที่ใช้ในงานเพาะเลี้ยงเซลล์ในระบบของไหลจุลภาค [39]

2.5.2 โพลีไดเมทิลไซโลเซน

โพลีไดเมทิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane-PDMS) เป็นโพลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค เพราะมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ (ตารางที่ 2.6) ซึ่งช่วยให้นำไปประยุกต์กับงานระบบของไหลจุลภาคได้อย่างกว้างขวาง โดยส่วนมากนั้นจะเป็นการนำแม่พิมพ์ที่ได้จากการกระบวนการฉายแสงและกีดน้ำยา หรือเครื่องพิมพ์สามมิติ มาวางไว้ในภาชนะแล้วทำการเทโพลิเมอร์ลงบนแม่พิมพ์ รอให้น้ำยาโพลิเมอร์แข็งตัวแล้วทำการลอกออก

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงคุณสมบัติพื้นฐานของโพลีไดเมทิลไซโลเซน [40]

คุณสมบัติ	คุณลักษณะ	จุดสำคัญ
ทัศนศาสตร์ (Optical)	แสงขาวสามารถทะลุผ่านได้ UV Cutoff 240 nm.	ใช้งานได้ช่วง 200-1100 nm
ทางไฟฟ้า (Electrical)	เป็นฉนวนไฟฟ้า แรงดันพังทลายอยู่ที่ 2×10^7 V/m	สามารถฝังวงจรในเนื้อวัสดุได้
ทางกล (Mechanical)	มีความยืดหยุ่น สามารถปรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นได้	อุปกรณ์ทำงานสามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ สามารถใช้วิธีการหล่อชิ้นงานจากแม่พิมพ์ได้

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงคุณสมบัติพื้นฐานของโพลีไดเมทิลไซโลเซน [40]

คุณสมบัติ	คุณลักษณะ	จุดสำคัญ
ทางอุณหภูมิตัว (Thermal)	ฉนวนความร้อน มีค่าสภาพการนำความร้อน $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน $310 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ มีความเสถียรทางอุณหภูมิจนถึง 300°C	สามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในช่องทางไหลจุลภาค ยกเว้น electrophoretic
สภาพผิว (Interfacial)	ความเค้นพื้นผิว หรือพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำ $\sim 20 \text{ erg}/\text{cm}^2$	ง่ายต่อการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ สามารถนำมาประสานชิ้นงานซ้ำได้ วัสดุจะไม่เปื่อยยุ่ยน้ำยกเว้นจะมี SiOH บริเวณผิวชิ้นงาน
การซึมผ่าน (permeability)	น้ำซึมผ่านได้น้อย แต่แก๊สและสารละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วสามารถซึมผ่านได้	แก๊สสามารถซึมผ่านจากสารละลายในช่องทางไหลได้
การทำปฏิกิริยา (Reactivity)	เฉื่อยชา ยกเว้นถูกกระตุ้นด้วยพลังงานของแก๊ส	ไม่เกิดปฏิกิริยากับตัวทำปฏิกิริยา พื้นผิวสามารถถูกกัดได้และสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวให้ชอบน้ำ (Hydrophilic) ด้วยการทำปฏิกิริยากับ silane
ความเป็นพิษ (Toxicity)	ไม่เป็นพิษ	สามารถใช้กับการเพาะเลี้ยงเซลล์ (in vivo) ได้ ซึ่งเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสามารถเติบโตได้

ข้อดีอีกประการหนึ่งที่สำคัญของโพลีไดเมทิลไซโลเซน คือ เราสามารถปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกลที่ต้องการด้วยการปรับ อัตราส่วนระหว่าง โพลีเมอร์และตัวเชื่อมประสาน การปรับเวลาและอุณหภูมิในการทำให้โพลีไดเมทิลไซโลเซนแข็งตัว ซึ่งจะได้คุณสมบัติทางกลตามต้องการ [41]

อัตราส่วนที่ให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุดคือ อัตราส่วน 9:1 และค่าที่ตีรองลงมา คือ 10:1 แต่เนื่องจากในปัจจุบันอัตราส่วน 10:1 เป็นที่นิยมในการใช้ในการทดลองอีกทั้งยังมีการทดสอบคุณสมบัติทางกลที่อัตราส่วน 10:1 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้อัตราส่วน 10:1 เป็นหลัก

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของโพลีไดเมทิลซิลิโคน ที่อัตราส่วน 10:1 โดยการปรับค่าของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อขึ้นงานก่อนนำมาทดสอบค่า โดยทำการสร้างชิ้นงานทดสอบ PDMS ที่อัตราส่วน 10:1 จากแม่พิมพ์ที่ทำจากจากแผ่นอะคริลิก โดยจะมีการทดสอบทั้งแรงดึงและแรงอัด ซึ่งชิ้นงานทดสอบแรงดึงจะอิงตามมาตรฐาน ASTM D412-C ในส่วนชิ้นงานทดสอบแรงอัดจะอิงตามมาตรฐาน ASTM D575-91 โดยชิ้นงานหลังจากทำการไล่แก๊สแล้วจะนำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต่างกันก่อนนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกล โดยหากใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เวลาในการแข็งตัวเร็วกว่ากรณีใช้อุณหภูมิต่ำ ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ สำหรับการหล่อขึ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึงและแรงอัด [42]

อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ Dow Corning แนะนำ	เวลาที่ใช้สำหรับ ชิ้นงานทดสอบแรงดึง	เวลาที่ใช้สำหรับ ชิ้นงานทดสอบแรงอัด
25	48 ชม.	48 ชม.	48 ชม.
100	35 นาที	48 นาที	53 นาที
125	20 นาที	33 นาที	38 นาที
150	10 นาที	23 นาที	28 นาที
200	-	18 นาที	24 นาที

ขั้นตอนหลังจากที่ทำการเทส่วนผสม PDMS ลงแบบแม่พิมพ์แล้วทำการอบที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วทำการปล่อยให้ PDMS แข็งตัวโดยชิ้นงานที่ได้จากการสร้างตามรูปแบบตามมาตรฐาน ASTM เราจะได้ค่าการทดสอบดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ สารผสมPDMS (10:1) โดยอุณหภูมิในช่วงเวลาการแข็งตัวที่ต่างกัน [42]

อุณหภูมิ	25 °C	100 °C	125 °C	150 °C	200 °C
E (MPa)	1.32 ± 0.07	2.05 ± 0.12	2.46 ± 0.16	2.59 ± 0.08	2.97 ± 0.04
UTS (MPa)	5.13 ± 0.55	6.25 ± 0.84	7.65 ± 0.27	5.24 ± 0.82	3.51 ± 1.11
Hardness	43.8 ± 0.76	48.3 ± 0.65	49.8 ± 0.45	52.8 ± 0.73	54.0 ± 0.08
Ec (MPa)	186.9 ± 5.39	148.9 ± 5.47	137.7 ± 2.82	136.1 ± 2.68	117.8 ± 2.17
UCS (MPa)	51.7 ± 9.60	40.1 ± 4.30	36.8 ± 3.84	28.4 ± 4.46	31.4 ± 2.04
G (MPa)	0.44 ± 0.02	0.68 ± 0.04	0.82 ± 0.05	0.86 ± 0.03	0.99 ± 0.01
K (GPa)	2.20 ± 0.11	3.42 ± 0.17	4.11 ± 0.20	4.32 ± 0.22	4.95 ± 0.25
ν	ค่าเฉลี่ย คือ 0.499 และช่วงที่ทดสอบได้ คือ [0.45-0.5]				

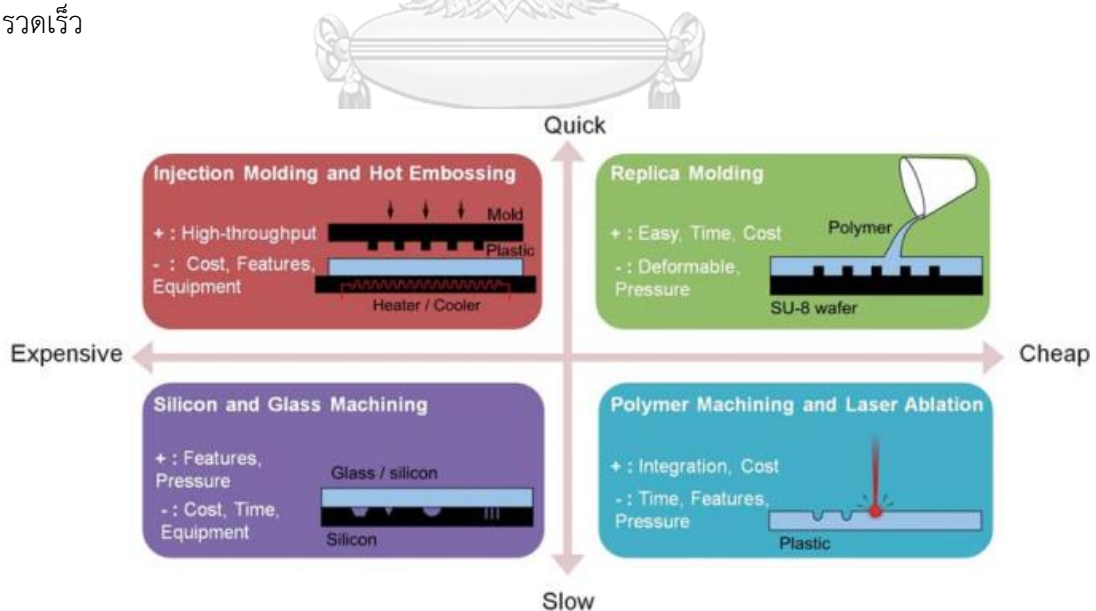
ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้ เราจะใช้เป็นค่ามาตรฐานในการอ้างอิงสำหรับการทดลองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.5.3 เทคนิคการผลิตชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค

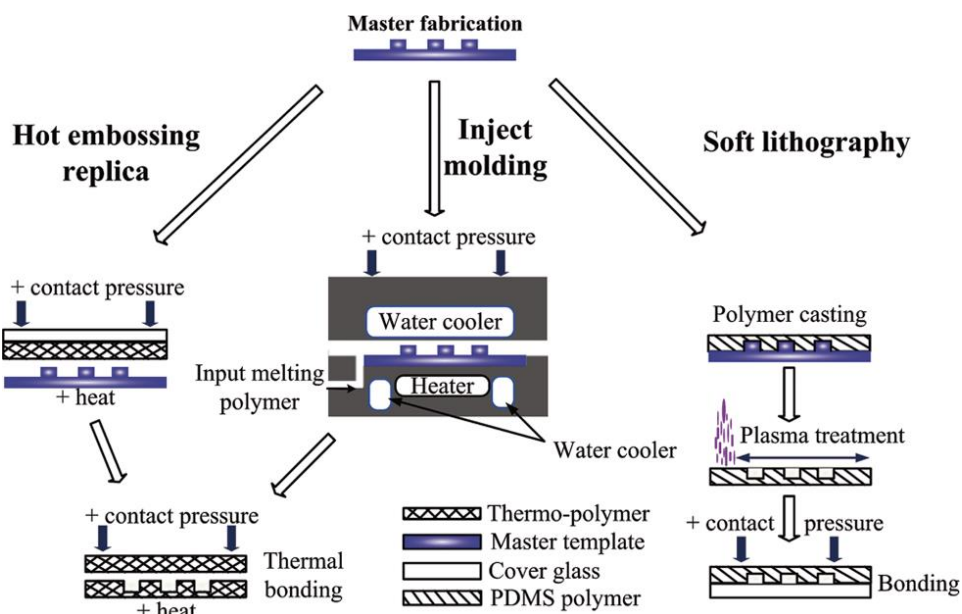
เทคนิคการผลิตชิ้นงานระบบของไหลจุลภาคจะมีความแตกต่างจากวิธีการผลิตขึ้นรูปโลหะหรือวิธีทั่วไปอื่นๆ ด้วยขนาดของช่องทางไหลจุลภาคที่มีความละเอียดสูง ในหัวข้อนี้จะเป็นการรวบรวมเทคนิคการผลิตชิ้นงานระบบของไหลจุลภาคเพื่อใช้ในการพิจารณาเทคนิคการผลิตที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชิพทดสอบการกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ต่อไป

(1) วิธีการผลิตชิ้นงานต้นแบบของระบบของไหลจุลภาค

เทคนิคในการผลิตชิ้นงานที่มีช่องทางไหลจุลภาคสามารถทำได้หลายวิธี (รูปที่ 2.26) วิธีแรกเป็นการกัดชิ้นงานซิลิกอนกับกระจก แล้วทำการเชื่อมประสานด้วย Anodic Bonding ซึ่งมีข้อจำกัดในการสร้างชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากต้องทำในห้องสะอาดและมีราคาสูง และการทำช่องทางไหลจุลภาคต้องใช้เวลาในการทำงาน วิธีการผลิตชิ้นงานพลาสติก (Injection Molding) (รูปที่ 2.27) เป็นการผลิตชิ้นงานจำนวนมากด้วยแม่พิมพ์ที่มีความร้อน สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากและรวดเร็วแต่การสร้างแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้สร้างชิ้นงานต้นแบบ วิธีการผลิตด้วยแม่พิมพ์ร้อน (Hot Embossing) (รูปที่ 2.27) เป็นวิธีที่ใช้แม่พิมพ์ที่มีความร้อนในการกดแผ่นเทอร์โมพลาสติก ซึ่งผลิตชิ้นงานได้เร็วกว่าและมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธีการผลิตชิ้นงานพลาสติก แต่ต้องใช้เครื่องมือที่ยังยากในการผลิต วิธีการผลิตชิ้นงานโพลีเมอร์ อาจใช้การเจาะ การเลื่อย หรือการกัดด้วยเลเซอร์ เป็นต้น วิธีการผลิตด้วยเลเซอร์ เป็นวิธีในการสร้างชิ้นงานที่มีประสิทธิภาพแต่การสร้างชิ้นงานต้องใช้เวลา นาน วิธีการผลิตชิ้นงาน (ซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)/Replica Molding) (รูปที่ 2.27) เป็นวิธีการหล่อชิ้นงานจากแม่พิมพ์ซึ่งในการหล่อแต่ละครั้งสามารถสร้างลวดลายของช่องทางไหลจุลภาคได้ในการหล่อครั้งเดียว นอกจากนี้แม่พิมพ์ยังสามารถนำไปหล่อสร้างชิ้นงานซ้ำได้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีก่อนหน้านี้ที่ต้องทำการสร้างทุกอัน วิธีการผลิตชิ้นงานจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการสร้างชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากราคาที่ถูกลงและสร้างได้อย่างรวดเร็ว



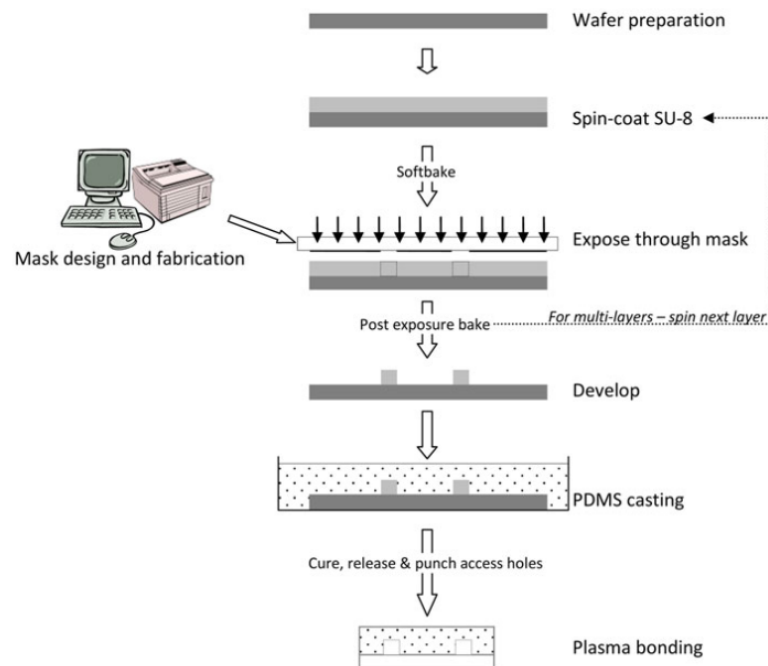
รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบวิธีการผลิตชิ้นงานต้นแบบในระบบของไหลจุลภาคเทียบกับความเร็วในการผลิตและราคา [43]



รูปที่ 2.27 กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการฉีดขึ้นงานพลาสติก (Injection Molding) วิธีการพิมพ์ตัวนูนด้วยแม่พิมพ์ร้อน (Hot embossing) และวิธีการหล่อขึ้นงานด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)/Replica Molding) [44]

(2) การสร้างชิ้นงานระบบของไหลจุลภาคด้วยวิธี ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)

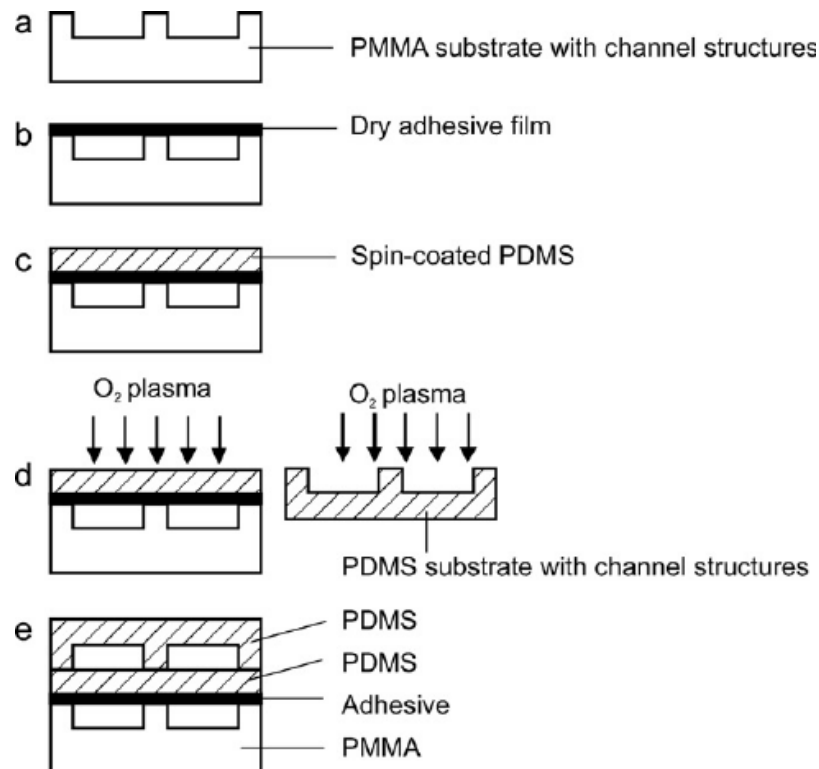
การสร้างชิ้นงานด้วยวิธี ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ในการเป็นแบบหล่อขึ้นงาน ซึ่งในการทำแม่พิมพ์ที่มีช่องทางไหลจุลภาคโดยทั่วไปจะสร้างบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยการปลูกโพลีเมอร์ไวต่อแสงไว้บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ จากนั้นทำการฉายแสง UV ไปที่ผิวด้านบน โดยใช้หน้ากากปิดผิว เพื่อให้โพลีเมอร์เกิดการแปรสภาพ ทำไปจนได้ความหนาและลวดลายที่ต้องการ จากนั้นทำการล้างออกซึ่งจะได้แม่พิมพ์ที่มีช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์นี้เรียกว่าวิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างชิ้นงาน โดยการนำแม่พิมพ์ที่สร้างมาวางบนภาชนะแล้วทำการเทสารผสม PDMS ที่ไล่แก๊สออกแล้วรอให้ PDMS แข็งตัวแล้วทำการตัดและลอกชิ้นงานออกมา ดังรูปที่ 2.28 [45]



รูปที่ 2.28 กระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยวิธีทั่วไป [45]

(3) การติดฟิล์มเพื่อช่วยในการสร้างฟิล์มบาง

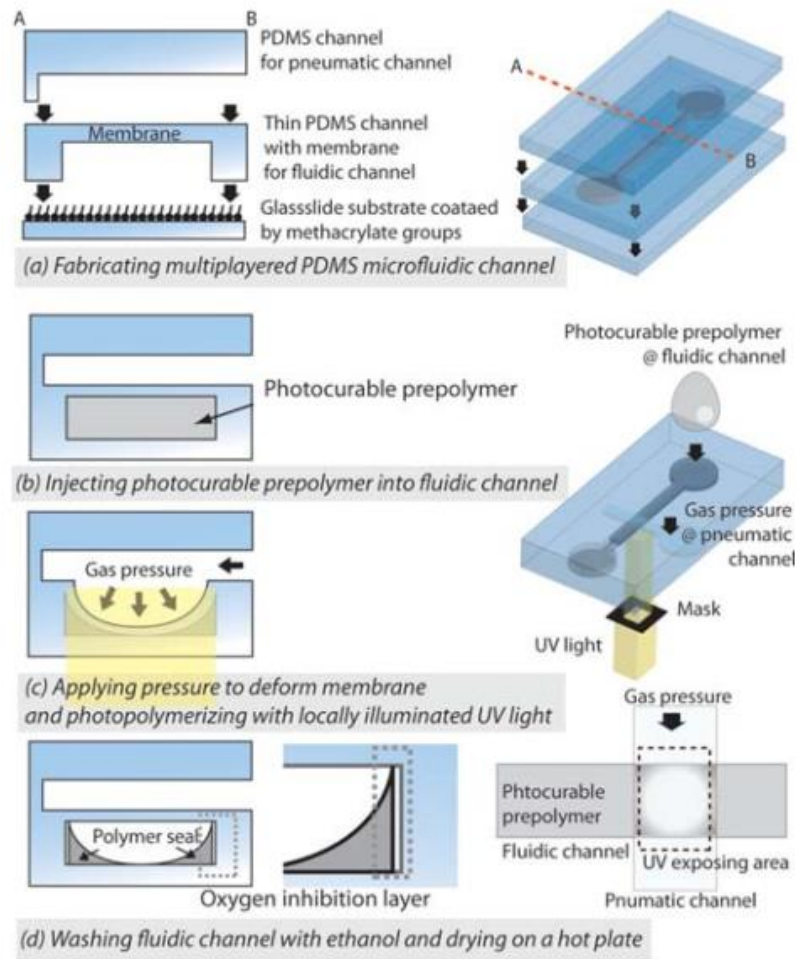
วิธีการนี้เป็นวิธีการหนึ่งในการสร้างฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์ [6] โดยการสร้างชิ้นงานชั้นของไหล PMMA ด้วยการกัดเลเซอร์แล้วทำการแปะฟิล์มสำเร็จรูปยึดเกาะลงบนชิ้นงาน จากนั้นทำการปลูกฟิล์ม PDMS ลงบนชิ้นงานเพื่อทำหน้าที่เป็นฟิล์มบางสำหรับงานแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์ก่อนทำการเชื่อมประสานกับชิ้นงานอีกชั้นหนึ่งด้วยออกซิเจนพลาสมา ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 กระบวนการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการใช้ฟิล์มสำเร็จรูป [6]

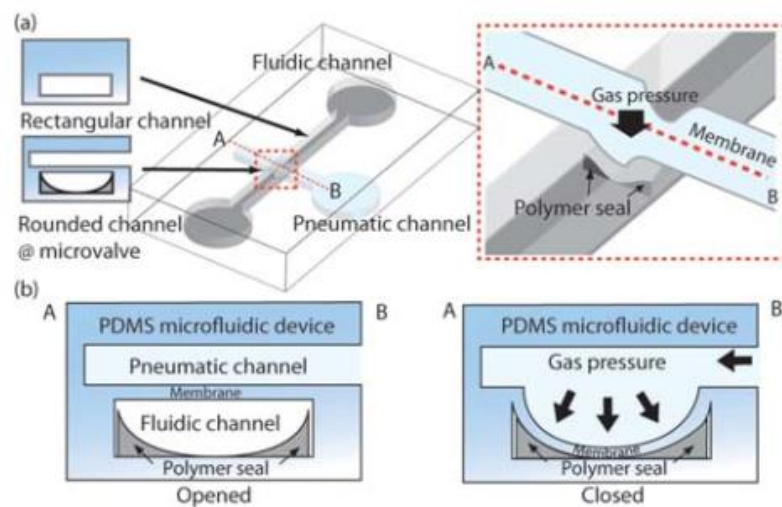
(4) การปิดช่องทางไหลจุลภาคสมบูรณ์ด้วยโพลีเมอร์ที่ไวต่อแสงที่แข็งตัวรับโปรไฟล์ของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

การสร้างระบบเปิดปิดในช่องทางไหลจุลภาคโดยใช้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ มักจะมีการรั่วไหลเนื่องจากเวลาที่ฟิล์มบางขยายตัวเมื่อมีความดันอากาศสูง ฟิล์มบางจะขยายออกไปปิดช่องทางไหลจุลภาคซึ่งจะมีมุมของช่องทางไหลที่ไม่ได้ถูกฟิล์มบางกดทับ ดังนั้นในการออกแบบให้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สามารถปิดช่องทางไหลได้อย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องมีบางสิ่งไปปิดจุดที่ฟิล์มบางไม่สามารถเข้าไปดันได้ [46] การทำซีลปิดทำได้โดยใช้โพลีเมอร์ที่ไวต่อแสงใส่ไปในตำแหน่งของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ก่อนให้แรงดันอากาศให้ฟิล์มบางไปดันโพลีเมอร์ที่ไวต่อแสงแล้วทำการฉายแสง UV ทำให้โพลีเมอร์แข็งตัวดังรูปที่ 2.30 เมื่อสั่งให้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทำงาน ฟิล์มบางจะไปดันช่องทางไหลที่มีโพลีเมอร์อย่างแนบสนิทไม่เกิดการรั่วไหล เมื่อนำไปใช้งานจริงแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สามารถปิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.30 กระบวนการสร้างชิ้นงานและโพลีเมอร์ซีล [46]

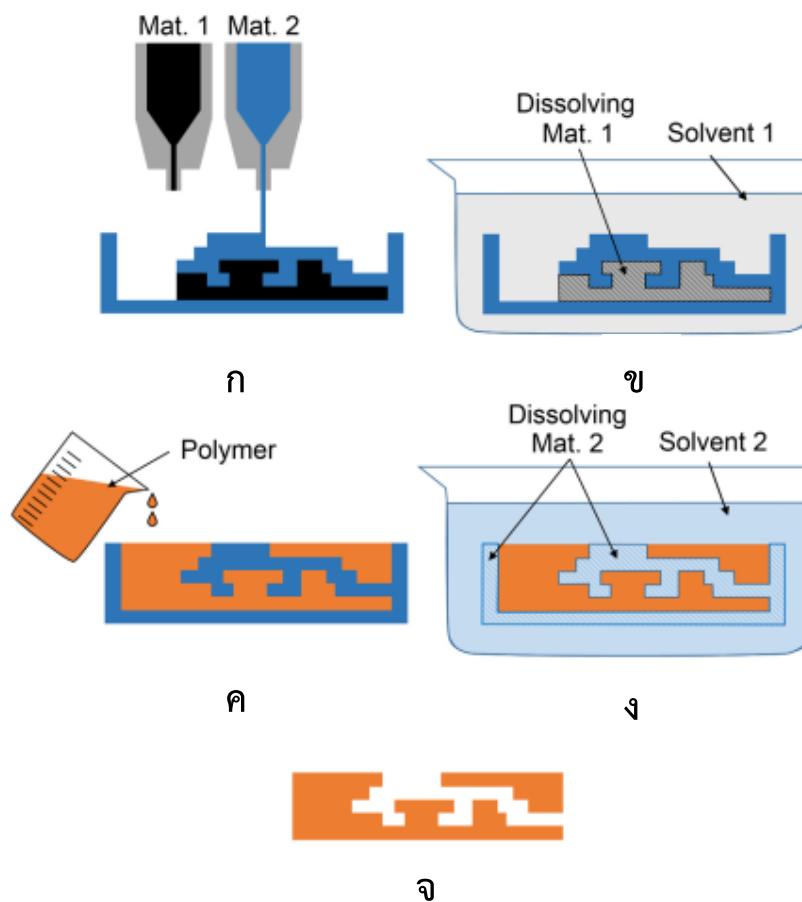
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.31 การทำงานของแอดซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่มีโพลีเมอร์ซีล [46]

(5) เทคนิคการสร้างระบบของไหลจุลภาคด้วยการใช้วัสดุสังเวย 2 ตัว

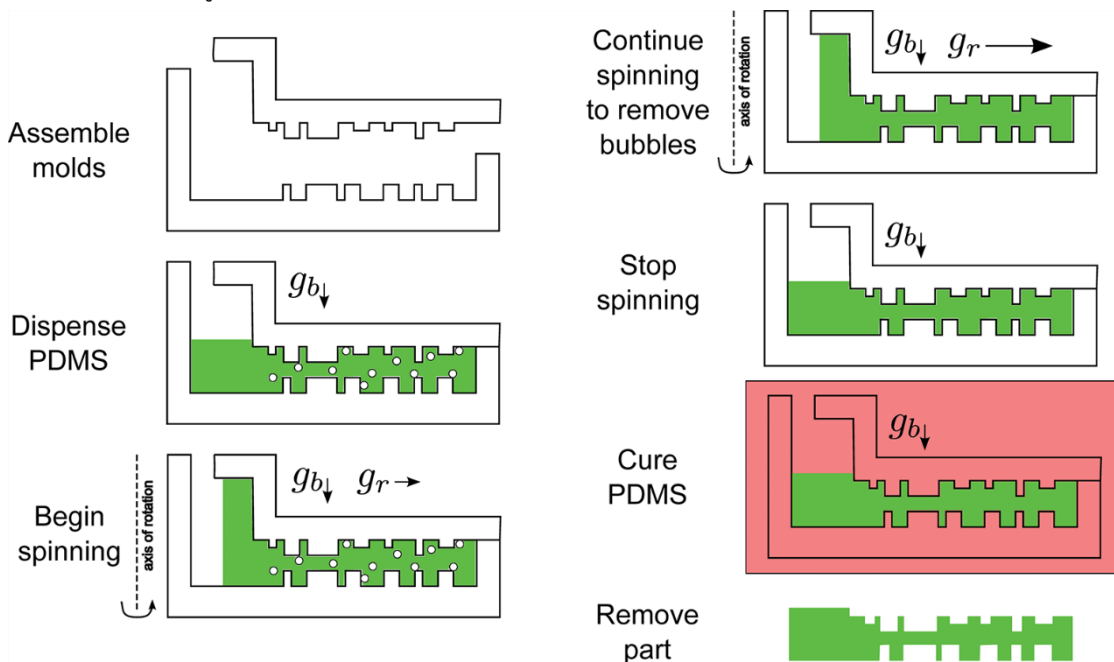
การสร้างโครงสร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM โดยที่ใช้วัสดุสังเวย 2 ตัว [47] โดยหลังจากทำการสร้างชิ้นงานแล้วให้ทำการล้างวัสดุสังเวยที่ 1 (P400-SR) ด้วยน้ำ หลังจากนั้นจึงทำการหล่อโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ซึ่งเมื่อโพลิเมอร์แห้งแล้วให้ทำการล้างวัสดุสังเวยที่ 2 (ABS-P400) ด้วยกรดอะซิโตน วิธีนี้สามารถสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ แต่ไม่เหมาะสมกับการสร้างฟิล์มบางและโครงสร้างที่มีค่าความละเอียดสูง เนื่องจากข้อจำกัดการสร้างของ FDM ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กระบวนการสร้างโครงสร้างระบบของไหลจุลภาคด้วยการใช้วัสดุสังเวย 2 ตัว [47]

(6) การหล่อชิ้นงานด้วยการใช้แรงเหวี่ยง

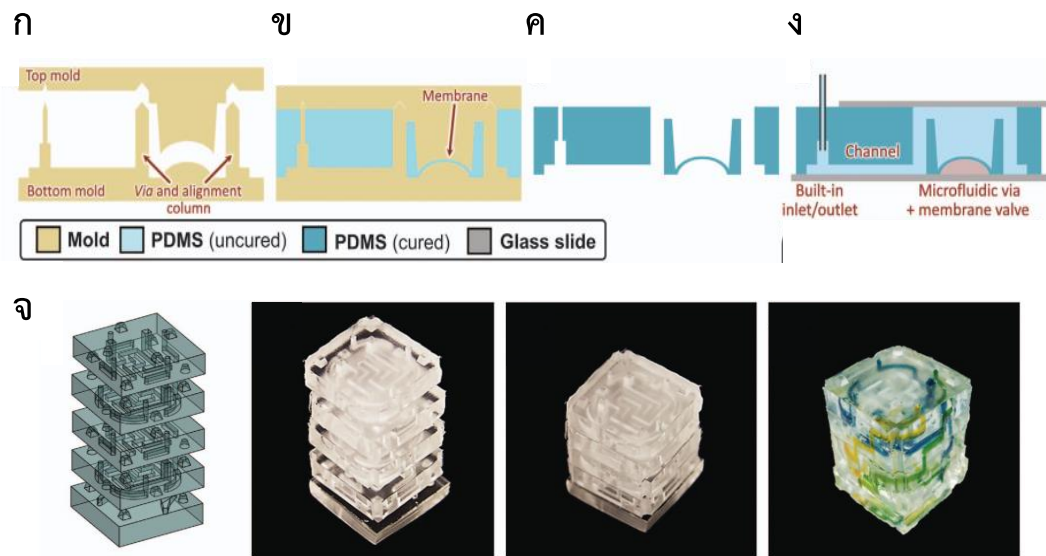
การหล่อชิ้นงานช่องทางไหลจุลภาค สามารถทำการหล่อชิ้นงานในแม่พิมพ์ได้ ด้วยการใช้แรงเหวี่ยงเพื่อทำการไล่ฟองอากาศออกจาก PDMS ในขณะที่ PDMS จะถูกเหวี่ยงออกทำให้ไหลเข้าไปเต็มในแม่พิมพ์ เมื่อ PDMS เต็มแม่พิมพ์ จึงทำการหยุดการปั่นเหวี่ยงและรอให้แข็งตัวแล้วทำการถอดออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานโดยการใช้แรงเหวี่ยง [48]

(7) การหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์สองด้านเพื่อสร้างฟิล์มบาง

วิธีหนึ่งในการหล่อชิ้นงานสามารถทำได้โดยการใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ในการทำแม่พิมพ์ชั้นล่างและแม่พิมพ์ชั้นบน [49] โดยที่มีการจัดวางตำแหน่งแม่พิมพ์ชั้นล่างและแม่พิมพ์ชั้นบนให้ตรงกัน (รูปที่ 2.34) เมื่อทำการประกบกันสนิทจึงทำการเทสารผสม PDMS (รูปที่ 2.34) แล้วทำการลอกชิ้นงานออก (รูปที่ 2.34) ซึ่งวิธีนี้สามารถหล่อชิ้นฟิล์มบางได้ แล้วเมื่อชิ้นงานแข็งตัวจึงไปประสานกับกระจกสไลด์ และต่อพอร์ตเชื่อมต่อ (รูปที่ 2.34) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ในการสร้างชิ้นงานช่องทางไหลจุลภาคที่มีหลายๆชั้นได้ ดังรูปที่ 2.34

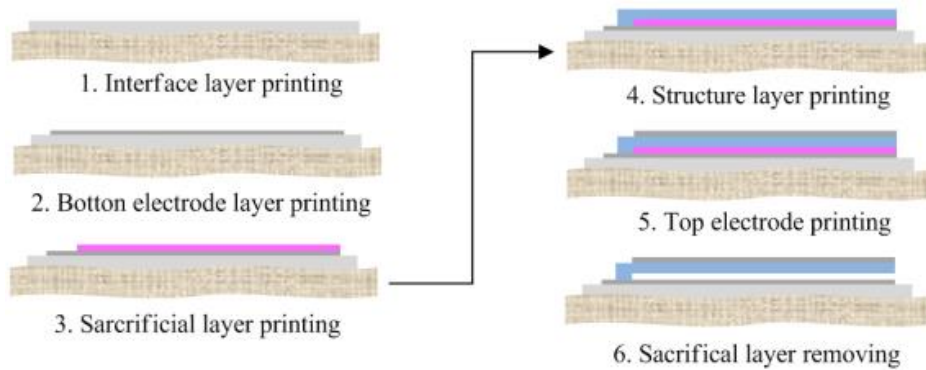


รูปที่ 2.34 (ก-ง) ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์สองด้าน (จ) รูปชิ้นงานระบบของไหลจุลภาคที่มีหลายชั้น (ไฟล์CAD/ชิ้นส่วนก่อนการประกอบ/ชิ้นงานประกอบ/ชิ้นงานประกอบบรรจุสาร) [49]

(8) พิล์มที่สามารถละลายน้ำได้ (เทคนิคชั้นสังเวย)

ชั้นสังเวยที่เป็นสารอินทรีย์สามารถล้างออกได้ด้วยกรดอะซิโตนหรือการทำลายด้วยความร้อน แต่ด้วยสารโพลีเมอร์อินทรีย์นั้นไม่สามารถใช้วิธีการดังกล่าวได้ ด้วยข้อจำกัดของค่าความไวทางความร้อนเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิ ทำให้ซึ่งไม่สามารถล้างออกได้ การสร้างชั้นสังเวยที่สามารถละลายในน้ำได้ เป็นทางเลือกหนึ่งที่แก้ปัญหาดังกล่าวในข้างต้น [50] โดยคุณสมบัติสำคัญของชั้นสังเวย คือ พิล์มหลังจากการใช้เครื่องเหวี่ยง spin-coating จะต้องราบเรียบมีคุณสมบัติแบบเดียวตลอดช่วงชิ้นงานและสามารถละลายในน้ำได้ซึ่งสารที่จะนำมาใช้เป็นชั้นสังเวยที่ทนต่อการละลายของตัวทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการสร้างแพทเทิร์นด้วยแสง (Photolithography) ได้แก่ Poly(acrylic acid) ,Dextran ,Poly(methacrylic acid) การใช้ PVA เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งสามารถละลายน้ำได้โดยการใช้อุณหภูมิ 80-100 °C โดยการตั้งในอ่างน้ำร้อนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

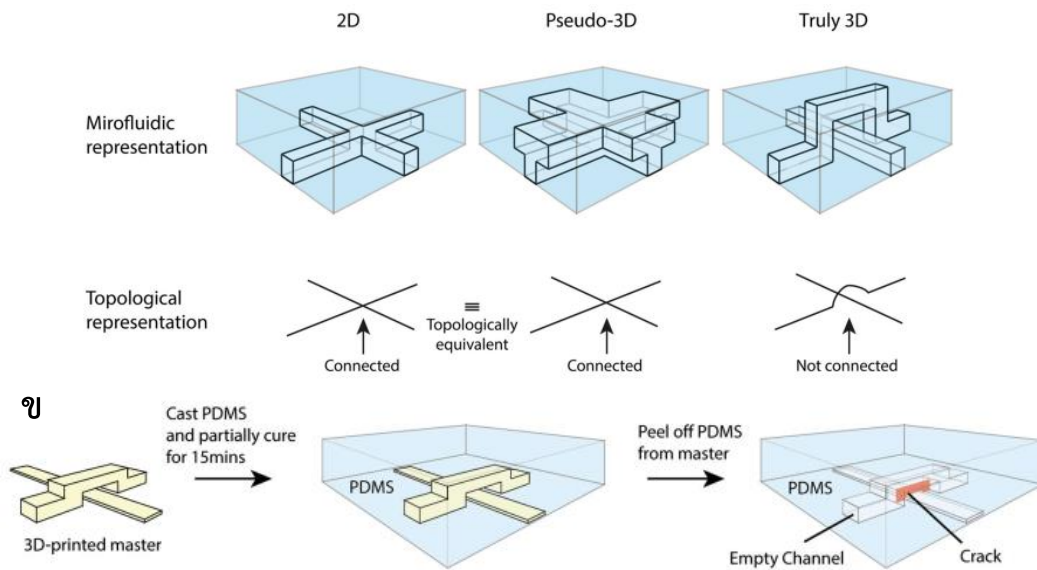
ชั้นสังเวยนิยมใช้ในการสร้างโครงสร้างที่มีความบาง และไม่สามารถสร้างได้โดยวิธีการปกติ เช่น การสร้างคานประจุไฟฟ้าขนาดเล็ก (capacitive cantilever) [51] ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 กระบวนการสร้างคานประจุไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยเทคนิคชั้นสังเวย [51]

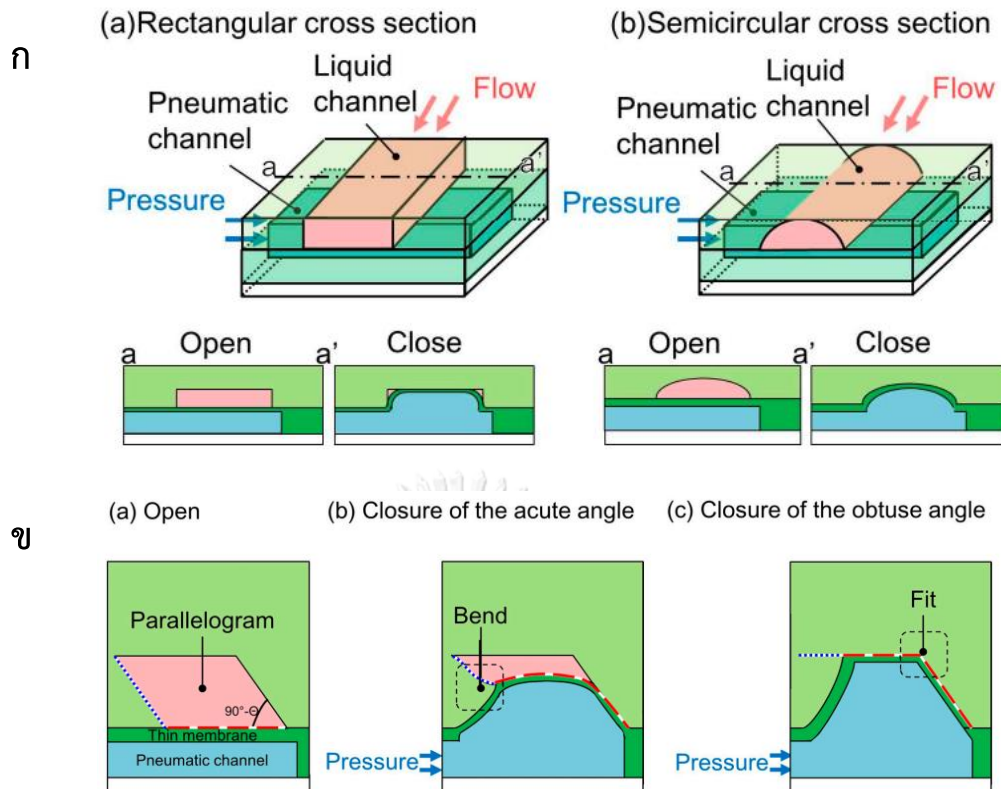
(9) การเลือกรูปแบบช่องทางไหลจุลภาคที่เหมาะสมกับการใช้งานแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์

รูปแบบของช่องทางไหลจุลภาคมีอยู่หลายรูปแบบซึ่งจะมีบางจุดที่ทำการเชื่อมเข้าด้วยกัน หรือเราไม่ต้องการให้มีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยรูปแบบที่เราพบเห็นได้มากในงานระบบของไหลจุลภาคมีด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ 2D , Pseudo-3D , Truly 3D [52] ดังรูปที่ 2.36 โดยรูปแบบเครือข่าย 2D นั้นเป็นรูปแบบที่ท่อเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งความสูงของท่อในทุกตำแหน่งจะมีความสูงที่เท่ากัน ซึ่งสามารถใช้วิธีการผลิตแบบ ซอฟต์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ได้ในขณะที่ Pseudo-3D นั้นจะมีลักษณะหน้าตัดที่แตกต่างไปจาก 2D โดยคุณสมบัติหลักเหมือนแบบ 2D แต่ Truly 3D นั้นจะเป็นการออกแบบให้ ช่องทางไหลจุลภาคไม่ต่อชนเข้าด้วยกันซึ่งการสร้างวิธีนี้มีความยุ่งยากและมีโอกาสเสียหายได้ดังรูปที่ 2.36x เราสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบ 2D นั้นมีความง่ายต่อการสร้างและเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.36 (ก) รูปแบบท่อในระบบของไหลจุลภาคบริเวณที่เชื่อมต่อกับท่ออื่นทั้งแบบ 2D , Pseudo-3D , Truly 3D [52] (ข) ขั้นตอนการหล่อชิ้นงานรูปแบบ Truly 3D ที่มีโอกาสทำให้ท่อเสียหายได้ [52]

การใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในการปิดช่องทางไหลจุลภาค [53] เมื่อทำการเพิ่มแรงดันอากาศไปปิดช่องทางไหลจุลภาคในกรณีช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2.37ก) จะไม่สามารถปิดได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดครึ่งวงกลม (รูปที่ 2.37ก) ฟิล์มบางจะไปดันที่ผิวของช่องทางไหลจุลภาคได้ดีกว่า ซึ่งช่องทางไหลจุลภาคอีกแบบหนึ่งคือช่องทางไหลจุลภาคแบบทรงสูง ซึ่งใช้การดันฟิล์มบางให้ไปปิดช่องทางไหลจุลภาคซึ่งมีความยุ่งยากในการสร้างช่องทางไหลจุลภาคและใช้เทคนิคในการผลิต นอกจากนี้ยังมีโอกาสทำให้ฟิล์มบางเสียหายจากการใช้งานดังกล่าว (รูปที่ 2.37ข)



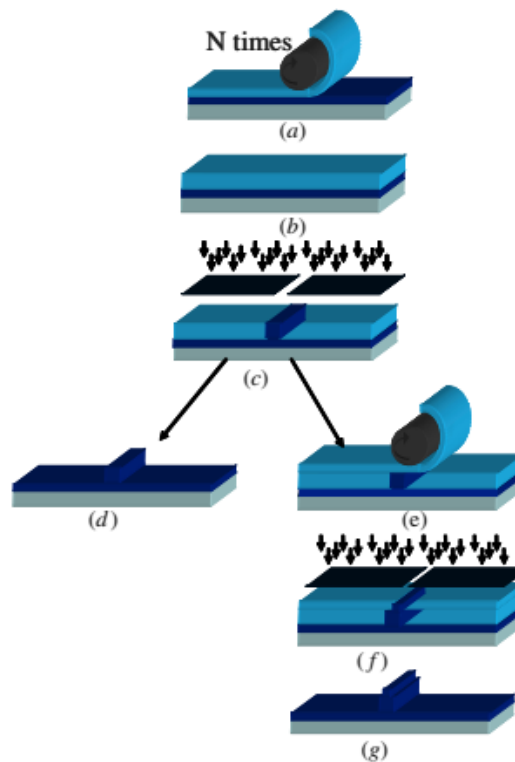
รูปที่ 2.37 (ก) ลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และการทำงาน เปรียบเทียบกับลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดครึ่งวงกลมที่มีแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และการทำงาน (ข) ลักษณะช่องทางไหลจุลภาคที่มีหน้าตัดแบบทรงสูงที่มีแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และการทำงาน [53]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(10) การหล่อขึ้นงานด้วยแม่พิมพ์ที่สร้างจากฟิล์มแห้งไวต่อแสง

การสร้างแม่พิมพ์ที่สร้างจากฟิล์มไวต่อแสง ทำได้โดยการใช้แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์หรือกระจกสไลด์ [54] ก่อนทำการรีดแผ่นฟิล์มแห้งไวต่อแสง (Dry Film Resist) ให้ได้ในระดับความหนาที่ต้องการ โดยทำการรีดซ้ำด้วยแผ่นฟิล์มแห้งไวต่อแสงให้ความหนาที่ต้องการเท่ากับความหนารวมของแผ่นฟิล์มแห้งไวต่อแสงที่นำมารีด จากนั้นทำการฉายแสงด้วยวิธีวิโวลติโกราฟี (Photolithography) แล้วนำไปล้างออกเพื่อใช้งาน (รูปที่ 2.38ก) หรือในกรณีที่มีลวดลายช่องทางไหลต่างแบบออกไป (โครงสร้าง 3 มิติ) โดบแบบที่จะใช้สร้างช่องทางไหลจุลภาคควรเล็กกว่าชั้นฐานเสมอ ไม่สามารถทำแพทเทิร์นด้วยโครงสร้างแบบแขวน (Hanging Structure) ได้ เพราะการฉายแสงที่ห่างจากฟิล์มไวต่อแสงจะส่งผลต่อคุณภาพของช่องทางไหลจุลภาคได้ โดยให้ทำการรีดแผ่นฟิล์มแห้ง

ไวต่อแสงให้ได้ความหนาที่ต้องการทับก่อนทำการฉายแสงด้วยวิธีวิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) แล้วทำการล้างออก ดังรูปที่ 2.38



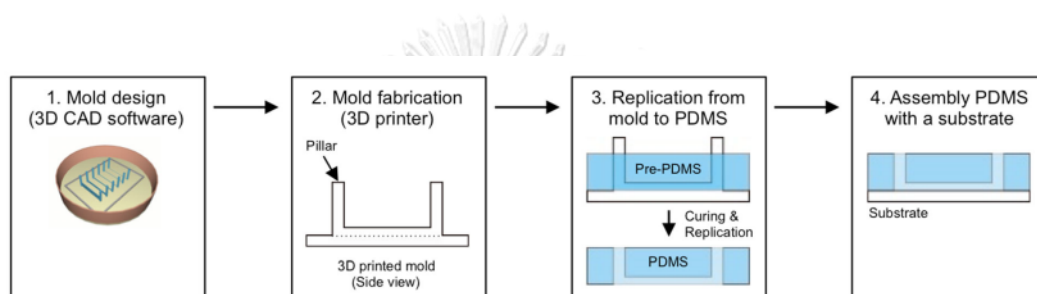
รูปที่ 2.38 กระบวนการสร้างแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มแห้งไวต่อแสง [54]

(11) การหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ

กระบวนการหล่อชิ้นงานในปัจจุบันโดยส่วนมากจะทำการหล่อด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยใช้แม่พิมพ์ซึ่งแม่พิมพ์ที่นำมาใช้ในการหล่อนั้นการใช้วิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความยุ่งยาก ซึ่งขึ้นกับลักษณะช่องทางไหลจุลภาค ตั้งแต่การเตรียมหน้ากาฉายแสง การสร้างฟิล์มโพลิเมอร์ที่ไวต่อแสง การอบ การฉายแสง UV ให้โพลิเมอร์ไวต่อแสงแข็งตัวและการล้างฟิล์มโพลิเมอร์ที่ไวต่อแสงออกหลังการฉาย UV ซึ่งอาจมีขั้นตอนทำซ้ำหลายๆ รอบได้ขึ้นกับความสูงของช่องทางไหลจุลภาค ด้วยวิธีการผลิตชิ้นงานวิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) จำเป็นต้องใช้เวลาและผู้ผลิตที่มีทักษะในการสร้างชิ้นงาน นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนต้องมีเครื่องมือเฉพาะในการสร้างชิ้นงาน แต่ในขณะที่การสร้างแม่พิมพ์ด้วยเทคนิคเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อใช้ในการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการหล่อชิ้นงาน โดยประเด็นหลักที่ต้องคำนึงมีอยู่ 2 ส่วน คือ วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์และค่าความละเอียดในการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์สามมิติ [55]

วิธีนี้นี้ดีกว่าวิธีการสร้างแม่พิมพ์จากวิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) คือ สามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบหรือผลิตซ้ำได้อย่างง่ายดายโดยใช้โปรแกรม CAD กับเครื่องพิมพ์สามมิติ ผู้ใช้งานเครื่องพิมพ์สามมิติไม่จำเป็นต้องมีทักษะความรู้สูง ทำให้สะดวกต่อการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการหล่อชิ้นงาน

กระบวนการหล่อชิ้นงานด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยใช้แม่พิมพ์สามมิติ จะเริ่ม ตั้งแต่การออกแบบโดยโปรแกรม CAD เพื่อทำการสร้างแม่พิมพ์ ก่อนจะทำการหล่อ PDMS แล้วทำการลอกชิ้นงานไปประสานกับกระจกสไลด์ในภายหลัง โดยภาพแม่พิมพ์ในโปรแกรม CAD เมื่อเทียบกับภาพแม่พิมพ์จากงานจริง แล้วทำการหล่อชิ้นงานออกมา ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 กระบวนการหล่อชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ [55]

2.5.4 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติ

วิธีทั่วไปและง่ายที่สุดในการสร้างชิ้นงานต้นแบบระบบของไหลจุลภาค คือ การหล่อชิ้นงาน PDMS บนแม่พิมพ์สามมิติ [56] (ซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)) ซึ่งแตกต่างจากวิธีการสร้างแม่พิมพ์แบบทั่วไปซึ่งวิธีการสร้างแบบทั่วไปคือ การสร้างโครงสร้างสามมิติโดยการฉายแสงบนโฟลิเมอไรไวต์ต่อแสงด้วย UV และการกัดด้วยสารเคมี จากนั้นให้ทำการเทหล่อชิ้นงานและรอให้แข็งตัว ก่อนที่จะนำไปเชื่อมประสานกับชิ้นงานอื่นด้วยออกซิเจนพลาสมา ด้วยวิธีการผลิตที่กล่าวมาในข้างต้นนี้จะใช้เวลาค่อนข้างมาก มีขั้นตอนการสร้างที่ยุ่งยากและต้องการความเที่ยงตรงของชิ้นงานสูง แต่การสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติจะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวในข้างต้นได้ นอกจากนี้แม่พิมพ์นี้ยังสามารถสร้างซ้ำได้อย่างง่ายดาย

วิธีการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ ถือเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ซึ่งในกระบวนการสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติมีอยู่ 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงาน และขั้นตอนการออกแบบการพิมพ์ชิ้นงาน โดยขั้นแรกนั้นคือ การออกแบบชิ้นงานโดยการใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบทางด้านวิศวกรรม หลังจากออกแบบเสร็จแล้วให้ทำการบันทึกไฟล์สกุล .STL แล้วนำเข้าไปในเครื่องพิมพ์สามมิติ

เครื่องพิมพ์สามมิติจะทำการเชื่อมชิ้นงานสามมิติ ให้เป็นภาพบนระนาบสองมิติ เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของโต๊ะงานหรือหัวพิมพ์ โดยความหนาของชั้นที่เชื่อมขึ้นกับวัสดุและค่าความละเอียดที่ได้ทำการเลือกไว้ เมื่อเครื่องพิมพ์เริ่มทำงาน เครื่องพิมพ์จะทำการสร้างชิ้นงานสามมิติ โดยการสร้างไล่ขึ้นไปทีละชั้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

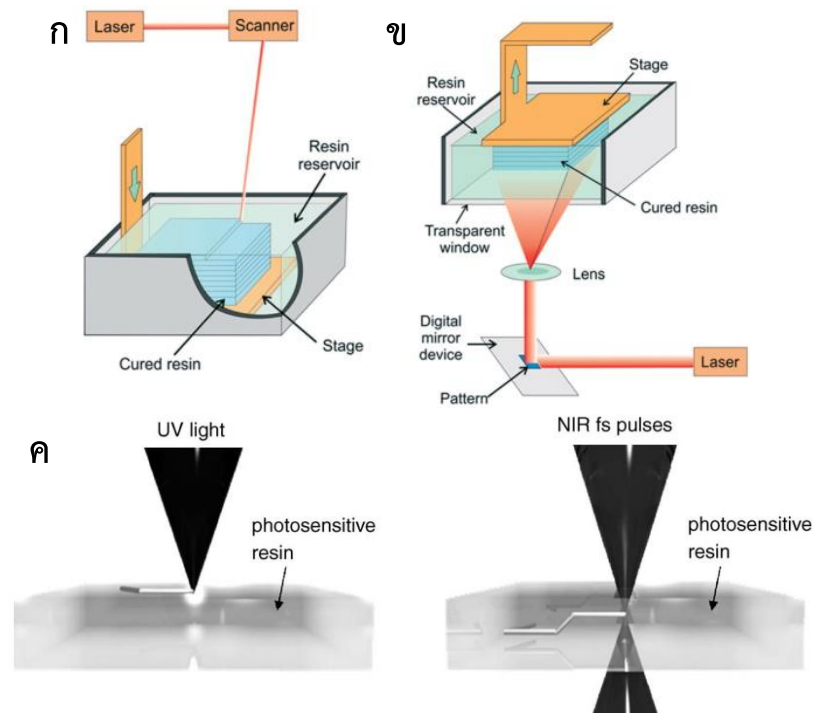
การเลือกรูปแบบการสร้างชิ้นงานสามมิติ จะขึ้นกับปัจจัย เช่น ค่าความละเอียด ความเร็วในการพิมพ์, วัสดุ และขนาดชิ้นงาน เป็นต้น โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติในงานระบบของไหลจุลภาค สารโพลีเมอร์ที่ไวต่อแสงเช่นเรซิน จะใช้ในกระบวนการ Stereolithography, inkjet printing และ two-photon polymerization (2PP) ในขณะที่โพลีเมอร์ที่ไม่ไวต่อแสง มีคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติก จะนิยมใช้ในกระบวนการ FDM

(1) กระบวนการพิมพ์ชิ้นงานด้วยแสง (Stereolithography-SLA) [57]

กระบวนการพิมพ์ชิ้นงานด้วยแสง (Stereolithography-SLA) เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานสามมิติ มีวัสดุเป็นเรซินซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่ไวต่อแสง UV ในการสร้างชิ้นงานสามมิติจะใช้เลเซอร์ UV ยิงไปที่อ่างที่บรรจุเรซินเหลวแล้ว เป็นการยิงทีละจุดจนครบทั้งชั้น เมื่อยิงครบหนึ่งชั้น ฐานของอ่างเรซินจะทำการปรับให้ระดับให้เรซินไหลเข้ามาท่วมชิ้นงาน แล้วทำการยิงชั้นถัดไป จนได้ชิ้นงานสามมิติ ถือเป็นโครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติแบบผิวอิสระ (Free Surface) ซึ่งสามารถเลือกยิงจุดบนผิวเรซินได้อิสระ (รูปที่ 2.40ก) กับอีกวิธีหนึ่งจะเป็นการยิงแสง UV ไปที่อุปกรณ์ Digital Micromirror Display - DMD ซึ่งสามารถฉายภาพชั้นของชิ้นงานที่ต้องการฉายได้ ก่อนฐานของอ่างเรซินจะทำการปรับให้ระดับให้เรซินไหลเข้ามาท่วมชิ้นงาน แล้วทำการยิงชั้นถัดไป จนได้ชิ้นงานสามมิติ เป็นวิธีการสร้างแบบขั้นต่อขั้น ทำให้กระบวนการสร้างชิ้นงานสามมิติเร็วขึ้นกว่าวิธีแรกซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพกว่า ถือเป็นโครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติแบบผิวจำกัด (constrained surface) ซึ่งเป็นการฉายแสงทั้งชั้นที่ได้จากการเชื่อมชิ้นงานจากไฟล์ CAD (รูปที่ 2.40ข)

(2) Two-Photon Polymerization (2PP)

เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานสามมิติ โดยการใช้แหล่งพลังงาน near-infrared femtosecond laser ในการทำให้ชิ้นงานแข็งตัว โดยการฉายแสงจากด้านล่างผ่านเรซินขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งโฟตอนที่เกิดขึ้นจะถูกเรซินดูดกลืนในทันทีทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีจากแสงระหว่าง โมโนเมอร์และตัวตั้งต้นด้วยแสง ซึ่งวิธีการนี้มีความละเอียดในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งสามารถการสร้างชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ด้วยการเคลื่อนที่จุดรวมโฟตอนได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.40ค



รูปที่ 2.40 โครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแสง (ก) แบบผิวอิสระ (Free Surface) และ (ข) แบบจำกัดผิว (Constrained Surface) [57] (ค) ภาพการเปรียบเทียบระหว่างการใช้แสง UV ใน Stereolithography กับ NIR ในกระบวนการ 2PP [58]

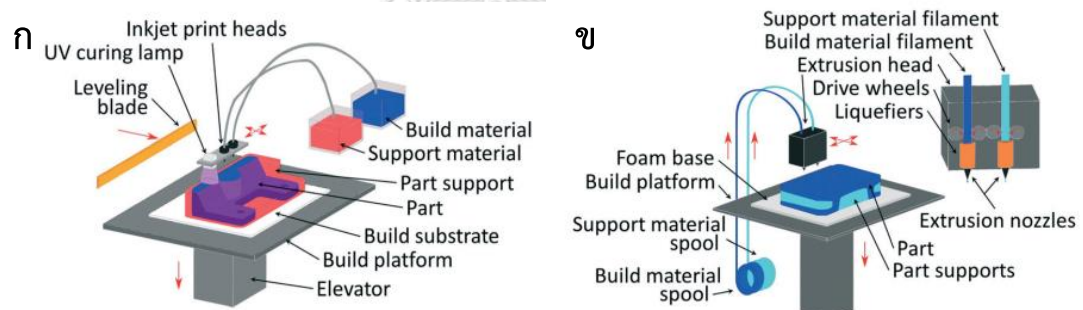
(3) Photopolymer Inkjet Printing หรือ Multi Jet Modeling (MJM) [57]

เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานสามมิติโดยการลำเลียงโพลิเมอร์ไวต่อแสงเข้าไปที่หัวฉีด แล้วทำการฉายแสง UV ให้โพลิเมอร์แข็งตัวในทันที โดยที่หัวพิมพ์จะเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และโต๊ะงานจะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งมักนิยมในชิ้นงานที่มีโครงสร้างที่ยื่นออกมา (Overhanging Structures) หรือชิ้นงานที่มีความซับซ้อนที่ต้องการสาร Support (รูปที่ 2.41ก) วิธีการนี้สามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันในการพิมพ์ชิ้นงานได้ โดยคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สามารถเป็นได้ทั้ง พลาสติกแข็ง พลาสติกอ่อน, ยาง หรือวัสดุที่มีสีแตกต่างกันก็ได้ ซึ่งทำให้การผลิตชิ้นงานสามมิติด้วยวิธีนี้มีราคาที่สูงและเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อ (Rigorous Biocompatibility) การใช้งานที่นิยม จะใช้ในการสร้างแบบจำลองของอวัยวะ เช่น กล้ามเนื้อ, กระดูก, หัวใจ หรือกะโหลกศีรษะ เป็นต้น สำหรับการสร้างชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค วิธีการสร้างนี้มีประโยชน์ คือค่าความละเอียดสูงและสามารถพิมพ์งานวัสดุที่แตกต่างพร้อมกันได้ โดยการสร้างวัสดุสังเวตรงช่องทางไหลจุลภาคเพื่อสร้างช่องเติมสารในระบบของไหลจุลภาค ด้วยการพิมพ์ชิ้นงานในครั้งเดียว

(4) Fused Deposition Modeling (FDM) [57]

วิธีการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติโดยการป้อนเส้นพลาสติกเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งในปัจจุบัน ด้วยราคาเครื่องที่ถูกกว่าวิธีอื่น สามารถใช้วัสดุในการพิมพ์ได้หลากหลาย ซึ่งเหมาะกับการสร้างชิ้นงานโดยทั่วไป การทำงานของเครื่องพิมพ์นี้จะทำการป้อนเส้นพลาสติกไปที่หัวฉีดซึ่งบริเวณหัวฉีดนี้จะมีตัวให้ความร้อนเพื่อให้พลาสติกหลอมละลาย แล้วทำการฉีดไปที่ฐานของชิ้นงานจนครบหนึ่งชั้น ก่อนที่จะทำการเคลื่อนโต๊ะงานลงและทำการฉีดในชั้นถัดไป จนได้ชิ้นงานสามมิติดังรูปที่ 2.41 ข

วัสดุที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติประเภทนี้ จะมีราคาถูกและสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ เช่น Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Poly- Lactic Acid (PLA), Polycarbonate, Polyethylene Terephthalate (PET), Polyamide and Polystyrene การสร้างช่องทางไหลจุลภาคด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติประเภทนี้ จะมีความท้าทายอยู่ 3 ประการ คือ การฉีดเส้นพลาสติกไม่สามารถฉีดให้ต่อเนื่องได้ในช่วงรอยต่อของช่องทางไหลจุลภาค, ชิ้นงานสามารถเกิดรอยร้าวได้ง่ายเนื่องจากโครงสร้างขาดความสมบูรณ์ระหว่างชั้นที่ทำการฉีดพลาสติก และขนาดของเส้นพลาสติกที่ใหญ่กว่าช่องทางไหลจุลภาค



รูปที่ 2.41 โครงสร้างเครื่องพิมพ์สามมิติ (ก) Photopolymer Inkjet Printing [57] (ข) Fused Deposition Modeling [57]

กระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาในข้างต้นนี้ สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะที่สำคัญของเทคนิคการผลิตชิ้นงานสามมิติดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ [57], [56]

	SLA	2PP	MJM	FDM
ความสามารถ การสร้าง ชิ้นงาน สาม มิติ	N/A	สามารถสร้าง ชิ้นงานที่มีความ ซับซ้อนสูงได้	N/A	มีข้อจำกัดการสร้าง ช่องทางไหลจุลภาค แบบวงกลมและ จุดเชื่อมต่อที่เป็นมุม ฉาก
ความละเอียด (Resolution)	สูง ได้ผิวงาน สุดท้าย	สูงมาก	ต่ำ	ต่ำ
แหล่งพลังงาน	Laser/UV	Near Infrared	UV	Thermal
วัสดุ	Photocurable resin/polymer	Photocurable resin/polymer	Photocurable resin/polymer	Thermoplastics
การสร้างด้วย วัสดุหลาย ชนิดพร้อมกัน	สามารถทำได้ด้วย เครื่องพิมพ์ที่มี คุณสมบัติการ พิมพ์หลากหลาย	ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเป็น การโฟกัสจุดไฟ ตอนในน้ำยาเร ซิน	สามารถทำได้	เป็นไปได้ สามารถทำ ได้ทั้งการเปลี่ยนวัสดุ ในการพิมพ์ในแต่ละ ชั้น หรือหัวพิมพ์ 2 หัว
เวลาในการ สร้าง	SLA ต้องทำการ อบหลังจากพิมพ์ ชิ้นงานและกำจัด Support DLP สร้างได้น้อย	ใช้เวลาในการ สร้างนาน	สร้างได้เร็ว	ใช้เวลาในการสร้าง นาน

2.5.5 เทคนิคการเชื่อมประสาน

จุดที่วิกฤตมากที่สุดในการออกแบบสำหรับในการพัฒนาระบบของไหลจุลภาคที่สร้างมาจาก PDMS คือ การประสานชั้นงาน 2 ชั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการประสานชั้นงานมีตั้งแต่ เทคนิคในการประสานชั้นงาน, การทำความสะอาดผิวชั้นงาน, อัตราส่วนผสมระหว่าง PDMS:Syglad184, อุณหภูมิที่ใช้และช่วงเวลาในการปล่อยให้แข็งตัว

หลังจากที่ทำการสร้างชั้นงานช่องทางไหลจุลภาคและฟิล์มบางแล้ว การประสานชั้นงานเพื่อประกอบชั้นงานเข้าด้วยกัน จะขึ้นกับชนิดของวัสดุเป็นหลัก โดยส่วนมากแล้วจะเป็นการประสานชั้นงาน PDMS-PDMS หรือ PDMS-กระจกสไลด์ เข้าด้วยกัน

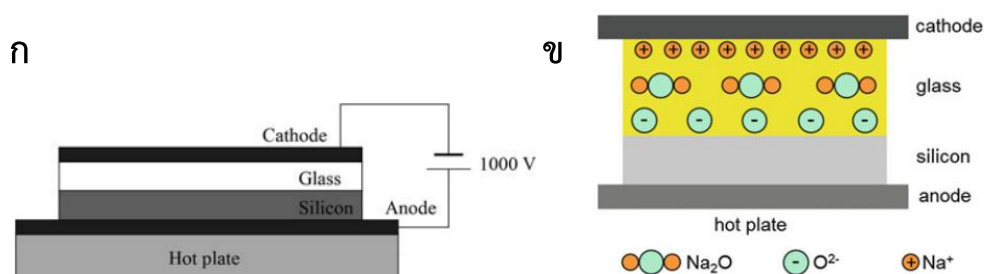
การเชื่อมประสานในงานระบบช่องทางไหลจุลภาค มีความจำเป็น เมื่อมีโครงสร้างตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นได้ทั้งการสร้างโครงสร้างเฉพาะให้ซับซ้อน, การติดตั้งอุปกรณ์บางอย่าง หรือการสร้างระบบช่องทางไหลจุลภาค เพื่อนำไปใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะอย่าง การเชื่อมประสานในระบบของไหลจุลภาค สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบใหญ่ๆ [59] ได้ดังนี้

(1) การเชื่อมประสานซิลิกอนโดยตรง (Silicon Direct Bonding)

การเชื่อมประสานซิลิกอนโดยตรงเป็นการประสานชั้นซิลิกอน 2 ชั้น โดยการเพิ่มความร้อนเพื่อให้พันธะโควาเลนต์กลุ่มไฮดรอกไซด์ (-OH) หลุดออก เป็นการประสานพันธะระหว่างซิลิกอน-ซิลิกอน หรือ ซิลิกอน-ออกซิเจน

(2) Anodic Bonding

เป็นการประสานชั้นงาน 2 ชั้นเข้าด้วยกัน โดยที่ชั้นแรกจะเป็นโลหะหรือซิลิกอน ในขณะที่ชั้นที่สองจะเป็นแก้ว (Glass) borosilicate glass โดยการสร้างสนามไฟฟ้าด้วยแท่งอิเล็กโทรดที่ (200-1000V) และให้ความร้อน (350-400 °C) โดยการให้อิออนของโซเดียมด้วย NaO_2 ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 การประสานชิ้นงานระหว่างกระจกกับซิลิกอน [60] ลักษณะของไอออนที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมประสาน

(3) การประสานกระจก (Glass Bonding)

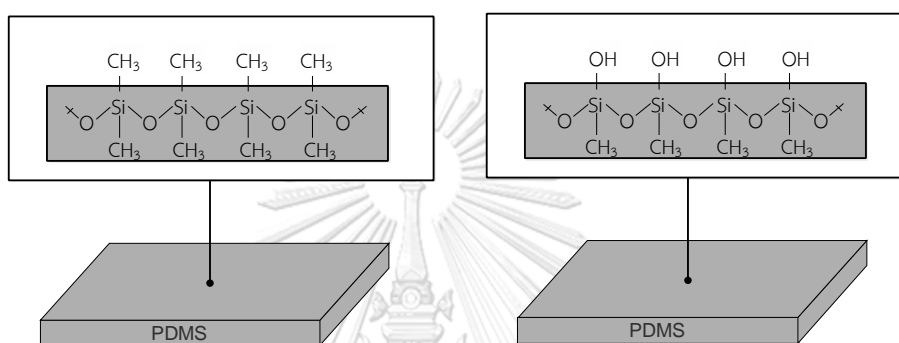
Glass Bonding เป็นการประสานกระจก 2 ชั้นเข้าด้วยกันโดยที่จะต้องมามีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและการถ่ายเทอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งชิ้นงานทั้ง 2 ก่อนนำมาทำการเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน จะต้องไปทำออกซิเจนพลาสมาหรือกัดด้วยน้ำยาปรีนยา (peroxymonosulfuric acid H_2SO_5) เพื่อให้มี OH-groups บนผิวชิ้นงาน แล้วนำไปเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ $500\text{-}600^\circ\text{C}$ ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งจะใช้เวลาอยู่หลายชั่วโมง เพื่อให้ประสานกันได้

(4) การเชื่อมประสานโดยมีชั้นตัวกลาง (Bonding with Intermediate Layers)

การเชื่อมประสานด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ทั้งประเภทโลหะ ซึ่งโลหะทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่แตกต่างกัน เช่น การประสานดีบุกเข้ากับทองแดงหรือทองคำ โดยการให้อุณหภูมิที่สูงพอให้ดีบุกหลอมละลายและเข้าประสานกับทองแดงหรือทองคำ เรียกว่า solid-liquid interdiffusion bonding นอกจากนี้การเชื่อมประสานด้วยสารยึดเกาะ ซึ่งอยู่ในรูปสารเคมีหรือโพลิเมอร์ที่ยังไม่แข็งตัว สามารถทำได้แต่จำเป็นต้องมีความรู้ทางเคมี คุณสมบัติทางกลของสารดังกล่าว เช่น เทปกาว เป็นต้น [61] หรือจะเป็นการเชื่อมประสานระหว่าง PDMS-PDMS ในช่วงที่ยังไม่แข็งตัว โดยสมบรูณ์มาทำการประสานชิ้นงาน [62]

(5) การเชื่อมประสานโดยการกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Bonding)

เป็นการใช้การกระตุ้นพลาสมาในการเปลี่ยนคุณสมบัติของพื้นผิว วิธีการดังกล่าวนี้ จะเป็นการเปลี่ยนโมโนเมอร์ $\text{O-Si(CH}_3)_2$ บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานให้กลายเป็นกลุ่มไฮดรอกซี ซึ่งเมื่อรวมกับซิลิกอนจะเรียกว่า SiOH ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างพื้นผิวชิ้นงานซึ่งจะเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวจากไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งทำให้การเชื่อมประสานของ PDMS-PDMS ประสานกันได้ดียิ่งขึ้น [63] ดังรูปที่ 2.43



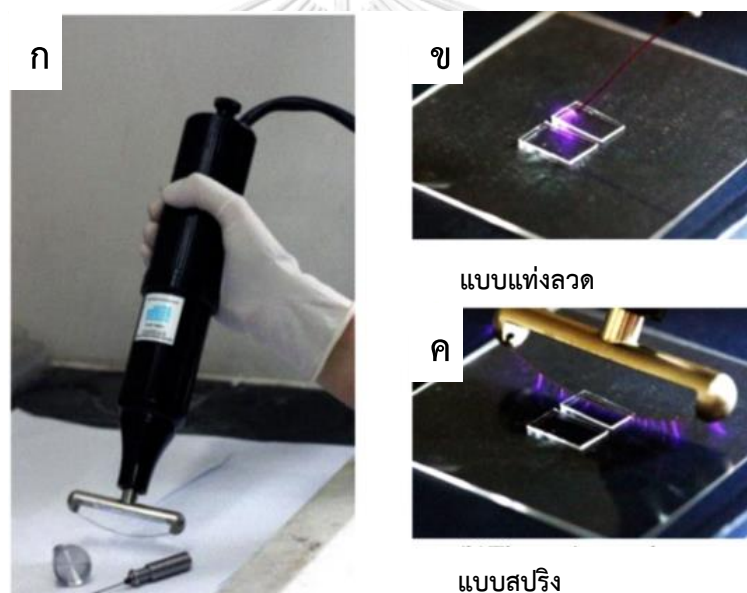
รูปที่ 2.43 การเปลี่ยนสภาพของผิว PDMS ด้วยเทคนิคการเชื่อมประสานด้วยพลาสมา (Plasma-Activated Bonding Technique)

วิธีการออกซิเจนพลาสมา (Oxygen Plasma) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยการกระตุ้นให้แก๊สในห้องปิดระบบสุญญากาศเกิดการแตกตัว และประจุไอออนไปทำปฏิกิริยาที่ผิวชิ้นงาน วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ [63] คือ ความดันอากาศในถัง, ความถี่ที่ใช้งาน และเวลาที่ใช้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่แพง อุปกรณ์มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีการดูแลรักษาอย่างดี ซึ่งใช้งานยากต้องมีผู้เชี่ยวชาญในการใช้งาน อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ใช้ในการเชื่อมประสานได้ช้า เพราะขนาดของห้องที่ใส่ชิ้นงานมีขนาดจำกัด และต้องใช้เวลาในการเปิดและปิดระบบสุญญากาศในช่วงการนำชิ้นงานเข้าหรือออกจากห้อง อีกทั้งยังต้องทำในห้องสะอาดเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมอีกด้วย [64], [65]

การทดสอบความแข็งแรงในการเชื่อมประสานด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมา โดยการใช้แรงดึง [63] ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อความแข็งแรงในการเชื่อมประสาน คือ ระดับแรงดันอากาศ ระดับพลังงาน และเวลาที่ใช้ในการให้ออกซิเจนพลาสมา ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่เวลาที่มากกว่าจะให้ความแข็งแรงของการเชื่อมประสานสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

วิธีการคายประจุโคโรน่าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถทำงานได้ในความดันบรรยากาศปกติและที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีระบบจ่ายแก๊สและระบบสุญญากาศ ทำให้ราคาอุปกรณ์ถูกลงมาก อีกทั้งขนาดเครื่องมือของวิธีการคายประจุโคโรน่ามีขนาดที่ไม่ใหญ่มาก สามารถเคลื่อนย้ายได้โดยง่าย [65] ซึ่งในการใช้งานควรมีแพลตฟอร์มที่ไม่นำไฟฟ้ามาปูรองพื้นที่ทำการเชื่อมประสานชิ้นงาน (รูปที่ 2.44ก)

การใช้งานทำได้ง่าย โดยการเปิดเครื่องคายประจุโคโรน่า ซึ่งจะสร้างประจุไอออนในบรรยากาศโดยใช้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่สูง หลังจากนั้นจะเกิดย่านการคายประจุโคโรน่า เมื่อทำการเคลื่อนอิเล็กโทรดเข้าใกล้ชิ้นงานมากพอ จะเห็นเป็นลักษณะสายฟ้าสีม่วงจากอิเล็กโทรดลงไปที่ชิ้นงาน และสายฟ้าสีม่วงจะกระจกออกโดยรอบก่อนที่จะหายไปในบรรยากาศ ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้จะที่อยู่ 2 ประเภท คือ แบบแท่งลวดตรง (รูปที่ 2.44ข) และแบบสปริง (รูปที่ 2.44ค)



รูปที่ 2.44 (ก) เครื่องคายประจุโคโรน่า แท่งอิเล็กโทรดแบบแท่งลวดและสปริง กับแพลตฟอร์มที่ไม่นำไฟฟ้า (ข) การเชื่อมประสานชิ้นงานด้วยอิเล็กโทรดแบบแท่งลวด (ง) การเชื่อมประสานชิ้นงานด้วยอิเล็กโทรดแบบสปริง [65]

วิธีการนี้จะมีความยากในการปริมาณค่าพารามิเตอร์ที่ [64] แนนอน โดยจะขึ้นกับระดับพลังงานแบบไม่เป็นเชิงตัวเลข (non-numerical) ที่เกิดขึ้นจากเครื่องคายประจุโคโรน่า (แรงดันไฟฟ้าและความถี่) ระยะห่างระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรด ขนาดของชิ้นงาน เวลาที่ให้ประจุ และรูปแบบการให้ประจุ เป็นต้น นอกจากนี้อาจมีปัจจัยสภาพแวดล้อมภายนอกมาเกี่ยวข้องอีกด้วย

วิธีการคายประจุโคโรน่า มีข้อได้เปรียบอีกอย่างที่ชัดเจนกว่าวิธีอื่น กล่าวคือ สามารถลอกชิ้นงานออกจากกันและทำการติดตั้งใหม่ได้ในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที -1 ชั่วโมงแรก โดยที่ไม่ทำให้สมบัติของการเชื่อมประสานเสียไป [65] ซึ่งเหมาะต่อการประสานชิ้นงานที่มีหลายชั้น ซึ่งช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้ประจุโคโรน่าสำหรับการประสานชิ้นงานขนาด 1 cm^2 จำนวน 2 ชั้นเข้าด้วยกันคือช่วงเวลา 30-40 วินาที

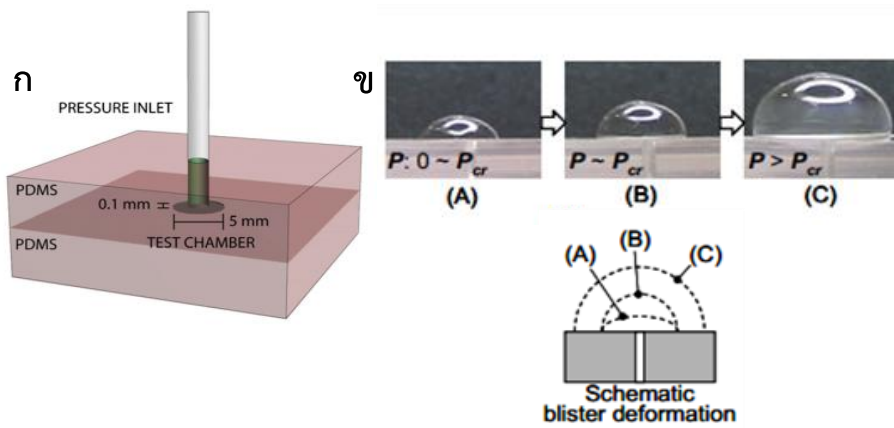
2.5.6 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานชิ้นงาน

หัวข้อนี้จะรวบรวมรูปแบบการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานชิ้นงานนี้ ซึ่ง 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีการเพิ่มแรงดันอากาศจนชิ้นงานเสียหายหรือเกิดการรั่วไหลของลมอัด และวิธีการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานออกจากกันจนชิ้นงานขาดออกจากกัน

(1) วิธีการเพิ่มแรงดันอากาศจนชิ้นงานเสียหายหรือเกิดการรั่วไหลของลมอัด

การเชื่อมประสานชิ้นงาน PDMS มีความจำเป็นต่อการพัฒนาระบบของไหลจุลภาคและแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งในปัจจุบันการเชื่อมประสานยังเป็นการลองผิดลองถูก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม [66]

การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน PDMS-PDMS [62] โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคต่างๆ ที่นำมาใช้ในการเชื่อมประสาน (รูปที่ 2.45ก) โดยการสร้างชิ้น PDMS ขึ้นมา 2 ชั้น โดยชั้นล่างนั้นจะเป็น PDMS รูปทรงตัน ในขณะที่ชั้นบนจะมีท่อสำหรับใส่ท่อลมและห้องทรงกระบอกที่มีความกว้าง 5 mm. และสูง 0.1 mm. โดยหลังจากทำการประสานด้วยวิธีต่างๆแล้ว จะทำการเพิ่มระดับแรงดันอากาศเป็นขั้นบันได โดยเริ่มจากที่ 0 kPa ดดยเพิ่มขึ้นที 35 kPa ทุก 5 วินาที จนเกิดการรั่ว ซึ่งจากการทดสอบทั้ง 5 วิธีพบว่า วิธีการ ออซิเจนพลาสมา กับวิธีการคายประจุโคโรน่า จะมีความแข็งแรงในการเชื่อมประสานต่ำกว่าอีก 3 วิธีที่เหลือ อีกวิธีการวัดค่าความแข็งแรงของการเชื่อมประสานจากแรงที่เกิดขึ้นที่ฟิล์มบางและชิ้นงานบริเวณขอบของตุ่มอากาศ (Bilister) [66] และดูค่าความแข็งแรงก่อนที่แรงดันอากาศจะชนะแรงที่ยึดฟิล์มบางกับชิ้นงาน (รูปที่ 2.45ข) ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบการทดสอบได้ในตารางที่ 2.10

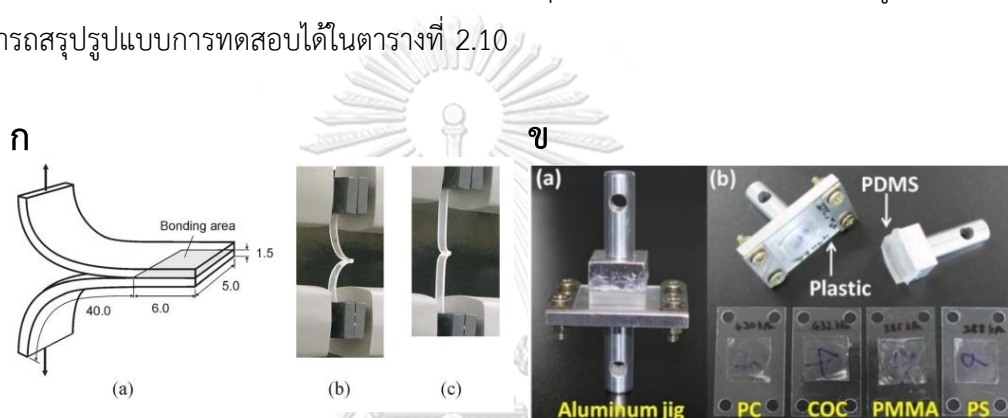


รูปที่ 2.45 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานโดยการเพิ่มแรงดันอากาศแบบขั้นบันได [62, 66]



(2) วิธีการทดสอบโดยการดึงชิ้นงานออกจากกันจนชิ้นงานขาดออกจากกัน

นำชิ้นงานที่เชื่อมประสานแล้วจะทำการดึงชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นออกจากกันจนขาดซึ่งจะสามารถวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบได้ เช่น การดึงชิ้นงาน PDMS-PDMS ให้ขาดโดยที่บริเวณปลายข้างหนึ่งของชิ้นงานจะถูกจับกับอุปกรณ์จับชิ้นงาน ในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งจะถูกเชื่อมประสานด้วยวิธีออกซิเจนพลาสมา [63] (รูปที่ 2.46ก) หรือการเชื่อมประสานชิ้นงานระหว่าง PDMS กับแผ่นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีอยู่ 4 ชนิดด้วยกัน [67] คือ polycarbonate (PC), cyclic olefin copolymer (COC), polystyrene (PS) และ polymethylmethacrylate (PMMA) โดยทำการเชื่อมประสานด้วยออกซิเจนพลาสมา และนำไปทดสอบโดยการใช้อุปกรณ์จับชิ้นงานดึงชิ้นงาน (รูปที่ 2.46ข) ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบการทดสอบได้ในตารางที่ 2.10



รูปที่ 2.46 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานด้วยการดึงชิ้นงานให้หลุดออกจากกัน (ก) PDMS-PDMS [63] (ข) PDMS-PC/COC/PMMA/PS [67]

ตารางที่ 2.10 การทบทวนวรรณกรรมการทดสอบการเชื่อมประสานชิ้นงาน

ผู้แต่ง	รูปแบบการทดสอบ	เทคนิคการทดสอบ
Mark et al., 2008 [62]	แรงดันอากาศ	ทำการเพิ่มแรงดันอากาศเป็นขั้นบันไดที่ละ 35 kPa ทุก 5 วินาที จนกว่าจะเกิดการรั่ว
Lu et al., 2007 [66]	แรงดันอากาศ	ทำการเพิ่มแรงดันอากาศ จนเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้เกิดการขยายเพิ่มเกิน 5% เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นจากกล้องจุลทรรศน์
Chen and Wharton, 2017 [63]	แรงดึง	ทำการดึงชิ้นงาน PDMS-PDMS จนบริเวณที่ประสานจะหลุดออกจากกัน
Sunkara et al., 2011 [67]	แรงดึง	ทำการดึงชิ้นงาน PDMS-PC/COC/PMMA/PS ซึ่งเป็นฟิล์มพลาสติกบางจนบริเวณที่ประสานจะหลุดออกจากกัน

2.5.7 เทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค

ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบของไหลจุลภาค คืออุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างระบบของไหลจุลภาคกับอุปกรณ์ภายนอก (เช่นภายนอกปั๊ม, วาล์ว, ท่อ, ฯลฯ) ซึ่งในการออกแบบระบบของไหลจุลภาคส่วนมากมักละเลยผลที่เกิดจากระบบการเชื่อมต่อของระบบของไหลจุลภาค โดยอุปกรณ์เชื่อมต่อเหล่านี้จะเป็นจำกัดประสิทธิภาพของระบบของไหลจุลภาค

ระบบการเชื่อมต่อในอุดมคติ จะต้องมิดังต่อไปนี้ มี (1) dead volume น้อยที่สุด (2) หลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของกลุ่มตัวอย่าง (3) จะง่ายต่อการเสียบ (4) ต้องถอดออกได้และนำมาใช้ใหม่ (5) มีความน่าเชื่อถือที่ความดันสูง (6) จะมีขนาดเล็กพอที่จะช่วยให้การเชื่อมต่อความหนาแน่นสูง (7) สามารถสร้างได้โดยใช้เทคนิคที่ง่ายและต้นทุนต่ำ (8) ทนต่อการปฏิกิริยาทางเคมีและ (9) เข้ากันได้กับอุปกรณ์และท่อที่ขายในเชิงพาณิชย์

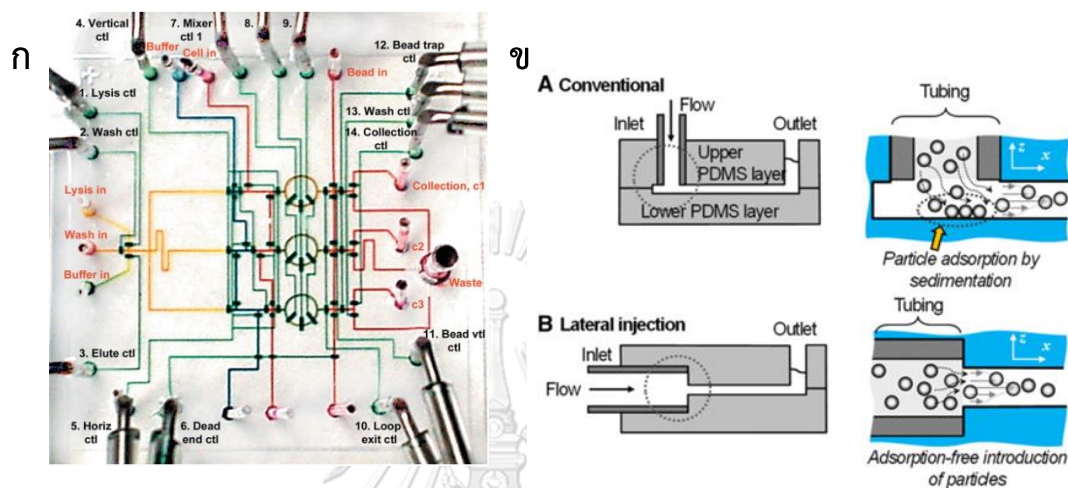
การจัดหมวดหมู่ของรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อ สามารถจัดได้หลายรูปแบบ เช่น การวางแนวเสียบ (เช่น In-Plane หรือ Out-plane) วัสดุของระบบของไหลจุลภาค (เช่น PDMS พลาสติกแก้ว / ซิลิกอน ฯลฯ) ความสามารถในการทนแรงดันและจำนวนการเชื่อมต่อสูงสุดในระบบของไหลจุลภาค เป็นต้น ซึ่งในนี้ขอแบ่งตามรูปแบบการเชื่อมต่อ

เทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาคสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ตามลักษณะการติดตั้งและต่อพอร์ต [68] คือ (1) แบบแทรกสอดด้วยเข็มหรือท่อโดยตรง จำเป็นต้องประกอบและถอดออกทุกจุด (2) แบบสัมผัส มักนิยมใช้ในกรณีที่มีพอร์ตเชื่อมต่อจำนวนมาก หรือต้องการประกอบหรือถอดออกอย่างรวดเร็ว (3) แบบถาวร เหมาะสำหรับการใช้งานในกรณีที่มีความดันสูงกว่า 1 MPa หรือต้องการยึดติดตายตัว (4) แบบเฉพาะงาน (Monolithic) เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อที่ต้องการคุณลักษณะหรืออุปกรณ์การใช้งานเฉพาะงาน

(1) แบบแทรกสอดด้วยเข็มหรือท่อโดยตรง

การเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาคในช่วงแรกจะเป็นการเชื่อมต่อโดยตรง โดยการใช้เข็มหรือท่อต่อตรงเข้ากับระบบของไหลจุลภาค ซึ่งจำนวนเข็มหรือท่อที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะขึ้นกับจำนวนอินเล็ตและเอาต์เล็ต โดยในการติดตั้งจะต้องทำการเชื่อมต่อเข็มและท่อทุกตำแหน่งที่ใช้งาน ถือเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อจากด้านบนของระบบของไหลจุลภาค [69] (รูปที่ 2.47ก) ซึ่งมีโอกาสที่ทำให้เซลล์หรือไมโครปิดส์เคลื่อนที่ได้ยาก การเชื่อมต่อโดยใช้เข็มต่อเข้ากับแนวเดียวกับช่องทางไหลจุลภาค เพื่อให้การเคลื่อนที่ทำได้ง่ายขึ้น [70] (รูปที่ 2.47ข) นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์การเชื่อมต่อโดยสร้างอุปกรณ์ที่สามารถหยุดสารที่ต้องการเข้าไปในระบบร่วมกับปั๊มเข็มฉีดยาได้ [71] ซึ่งเป็นพอร์ตเชื่อมต่อสแตนเลสที่สามารถใส่สารในปริมาตร (1-20 μL) ซึ่งทำให้ความสามารถในการใช้

งานสูงขึ้น อีกวิธีหนึ่งในการใช้งานการเชื่อมต่อให้รวดเร็วขึ้น คือ การออกแบบชุดเชื่อมต่อ โดยอาศัยแนวคิดของปลั๊กและเต้ารับที่ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [72] , [73] เช่น คอมพิวเตอร์ จะทำให้การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับระบบภายนอกทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น จากการติดตั้งที่ละจุด เป็นการติดตั้งชุดท่อในครั้งเดียว



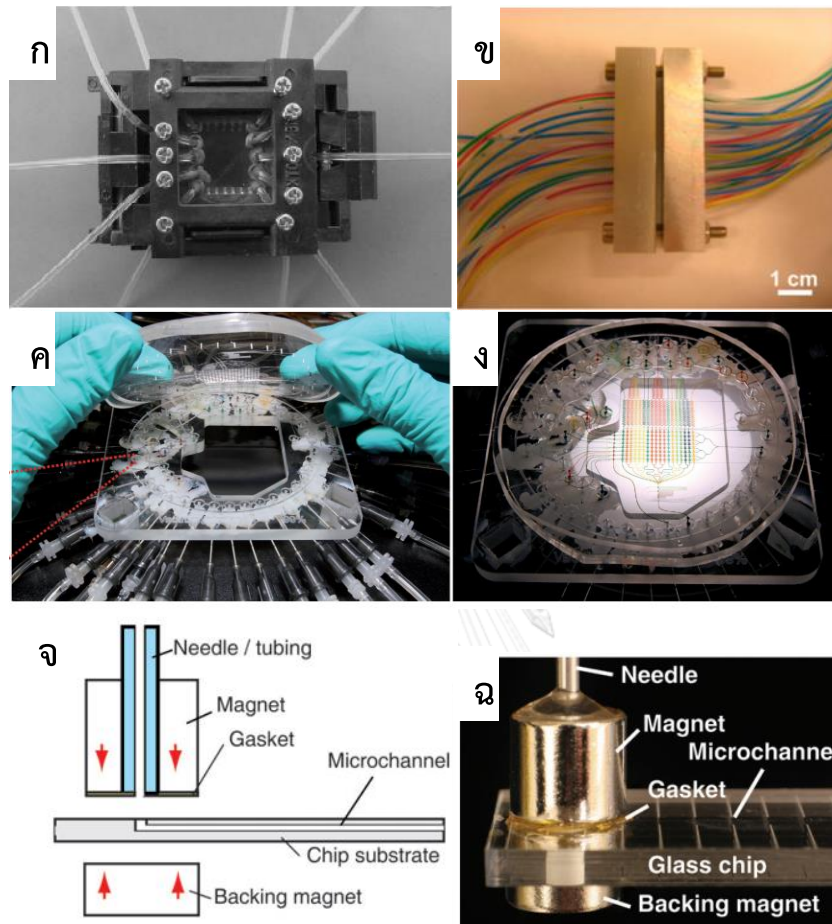
รูปที่ 2.47 (ก) ระบบของไหลจุลภาคที่มีการเชื่อมต่อด้วยเข็ม [69] (ข) รูปแบบการติดตั้งท่อหรือเข็มในแนวตั้งตรงและแนวนอน และผลการเคลื่อนที่ของอนุภาค [70]

(2) แบบสัมผัส

ระบบของไหลจุลภาคเมื่อมีจำนวนอินเล็ตและเอาท์เล็ตจำนวนมาก (>100) ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อแบบดั้งเดิมไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากต้องเสียเวลาในการติดตั้งและถอดอุปกรณ์ทุกชิ้น การพัฒนาระบบเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาคเมื่อมีจำนวนอินเล็ตและเอาท์เล็ตจำนวนมากสามารถทำได้โดยการสร้างชุดเชื่อมต่อกับชิ้นงานระบบของไหลจุลภาค เมื่อทำการใช้งานจะใช้แรงทางกลจากจิ๊ก [74] (รูปที่ 2.48ก) ,การใช้สกรูยึดเฟรมที่มีปะเก็นที่พอร์ตให้แน่น [75] (รูปที่ 2.48ข) หรือการใช้ระบบสุญญากาศ [76] (รูปที่ 2.48ค) ยึดชุดเชื่อมต่อกับชิ้นงานระบบของไหลจุลภาคให้ตำแหน่งท่อของทั้ง 2 อุปกรณ์นี้ตรงกันและแนบสนิทไม่เกิดการรั่วออกมา ซึ่งการใช้ระบบสุญญากาศนี้สามารถเชื่อมต่อพอร์ตนับร้อยพอร์ตได้ด้วยการเชื่อมต่อเพียงครั้งเดียวดังรูปที่ 2.48ง

นอกจากนี้การใช้พอร์ตแม่เหล็กที่มีราคาถูก, สร้างง่าย และสามารถใส่ซ้ำได้ โดยการออกแบบให้ก้อนแม่เหล็กถาวรถูกเจาะตรงกลาง แล้วสอดด้วยเข็มหรือท่อ แล้วประสานปิดด้วยกาว Epoxy โดยที่บริเวณปลายก้อนแม่เหล็กที่ติดตั้งเข็มหรือท่อ จะมีปะเก็นติดอยู่ไว้แนบกับผิวซีพของไหลจุลภาค (รูปที่ 2.48จ) ซึ่งจะใช้นามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร 2 ก้อนคูติดกัน โดยมีซีพของไหลจุลภาค

คั่นกลาง [77] ซึ่งเป็นลักษณะพอร์ตแบบแนบสัมผัสใช้งานง่ายกว่าระบบแรงกลจากจิ๊กหรือระบบ
 สูญญากาศดังรูปที่ 2.48 ฉ

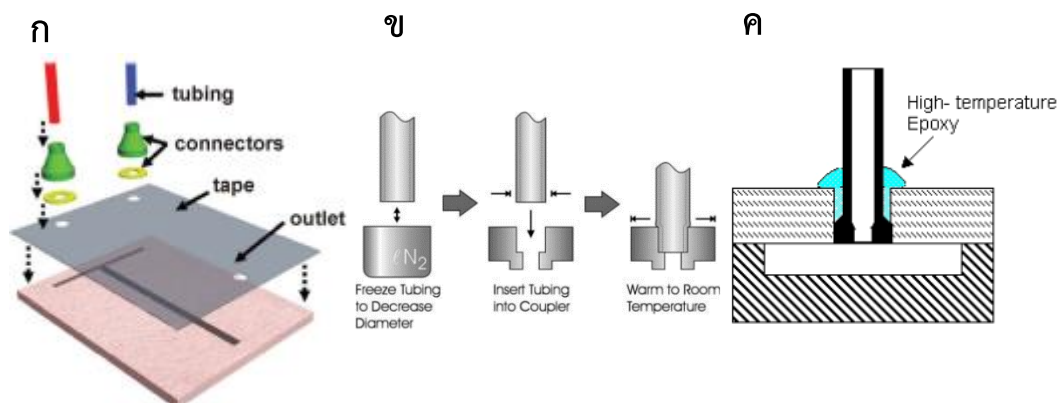


รูปที่ 2.48 รูปแบบพอร์ตแบบสัมผัส (ก) แรงจากอุปกรณ์จับชิ้นงาน [74] (ข) แรงจากสกรูและเฟรม
 [75] (ค-ง) ระบบสูญญากาศ [76] (ฉ) โครงสร้างการเชื่อมต่อด้วยแม่เหล็ก (จ) ส่วนประกอบ
 การเชื่อมต่อด้วยแม่เหล็ก [77]

(3) แบบถาวร

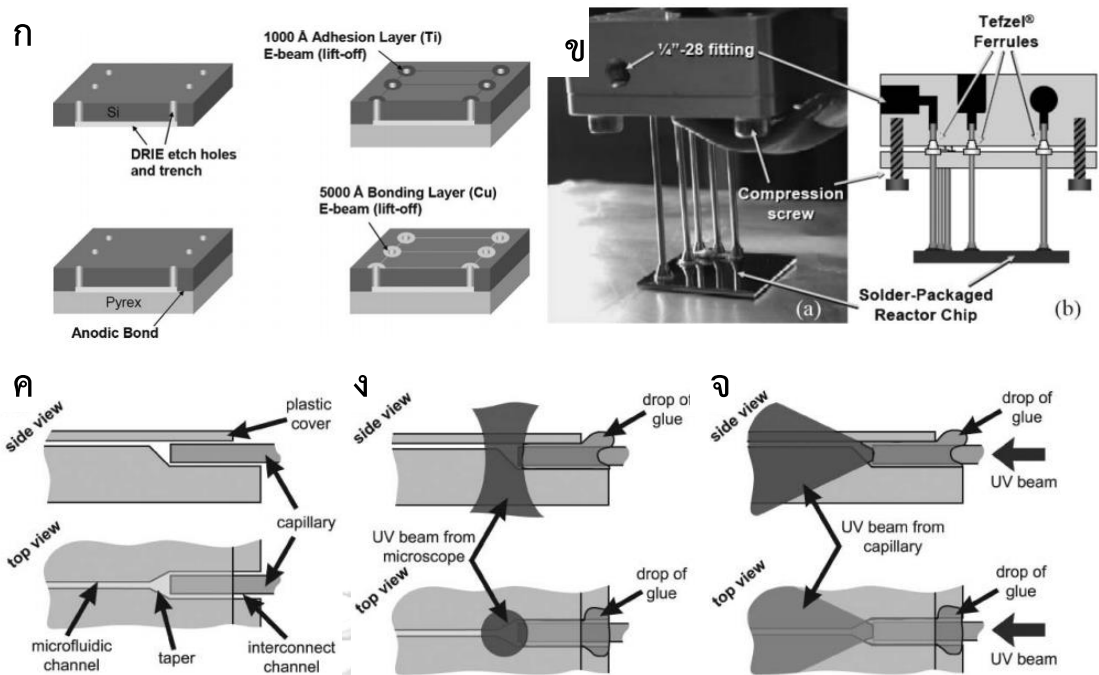
วิธีการเชื่อมต่อของไหลโดยทั่วไปที่เป็นที่นิยมจะอยู่ในรูปแบบการเชื่อมต่อกับเข็มหรือท่อโดยการเสียบ หรือการแนบสัมผัสโดยใช้ปะเก็น ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและสามารถถอดพอร์ตเข้าออกได้อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบของไหลจุลภาคในกรณีที่มีความดันสูง(มากกว่า 1 MPa) มักนิยมเป็นการเชื่อมต่อแบบถาวรโดยใช้สารยึดเกาะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพวัฏจักรและความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อของไหล [68] ความท้าทายหลักของการใช้สารยึดเกาะที่มีความเสี่ยงต่อการหลุดตัวของท่อและช่องทางไหลจุลภาคด้วยสารยึดเกาะ, ดังนั้นการควบคุมเวลานั้นจำเป็นต่อการเชื่อมประสานอุปกรณ์เชื่อมต่อกับระบบของไหลจุลภาคโดยมีสารยึดเกาะแบบถาวร ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีและตัวทำละลาย

การใช้แผ่นกาวยึดเกาะสามารถแก้ปัญหาการหลุดตัวของท่อได้ เช่น การใช้เทปกาวสองหน้าในการติดท่อเชื่อมต่อด้านหนึ่งกับระบบของไหลจุลภาคที่เป็นกระดาษอีกข้างหนึ่ง [78] ซึ่งการสร้างชีพของไหลจุลภาคด้วยกระดาษทำได้โดยการใช้มีดเขาระ่องสร้างช่องทางไหลจุลภาค จากนั้นนำกระดาษไปอบด้วย $C_{10}F$ เพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในสถานะเป็นกลาง (Omniphobic) แล้วนำเทปใสที่เจาะรูอินเล็ตและเอาท์เล็ตแล้วมาติดที่กระดาษแล้วนำแหวนที่มีกาวสองหน้าติดเข้าไปที่พอร์ตเชื่อมต่อกับท่อติดลงไปและติดตั้งท่อในตอนท้ายดังรูปที่ 2.49ก นอกจากนี้การเชื่อมต่อแบบถาวรโดยการใช้อุณหภูมิเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของพอร์ตก่อนที่จะเปลี่ยนสู่อุณหภูมิห้องทำได้หลายวิธี เช่น การเชื่อมต่อพอร์ตที่สร้างจากซิลิกอนแล้วใช้ในโตรเจนเหลวในการทำให้ท่อหดตัวก่อนนำมาใส่พอร์ตเพื่อให้ท่อแนบแน่นกับพอร์ตเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง [79] (รูปที่ 2.49ข) หรือ การใส่ท่อแล้วเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้ปลายท่อละลายเข้ากับชีพของไหลจุลภาค [80] (รูปที่ 2.49ค) โดยการใส่ท่อเทฟลอน (PTFE) เข้าไปในชีพของไหลจุลภาคซึ่งรูที่ชั้น Pyrex จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของท่อทำให้สามารถใส่ท่อเข้าไปได้ง่าย เมื่อต้องการติดตั้งท่อให้ใส่ท่อที่มีลวดเหล็กสอดใส่เพื่อไม่ให้ท่อเสียหายในช่วงที่ใส่เข้าไป โดยที่เปิดเตาร้อนที่อุณหภูมิ 380°C บริเวณปลายท่อจะเริ่มละลายก็ทำการดึงขึ้นให้บริเวณปลายท่ออยู่ที่ชั้น Pyrex ให้ปลายท่อละลายติดแล้วทำการใส่อีพ็อกซี (Epoxy) ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ให้อีพ็อกซีแข็งตัว



รูปที่ 2.49 (ก) การใช้เทปกาวติดพอร์ตเชื่อมต่อ [78] (ข) การใช้ไนโตรเจนเหลวลดขนาดท่อก่อนติดตั้งกับพอร์ตแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ท่อติดกับพอร์ต [79] (ค) กระบวนการเชื่อมต่อท่อกับซีพของไหลจุลภาคโดยใช้อุณหภูมิจากเตาร้อนและกาวอีพ็อกซี [80]

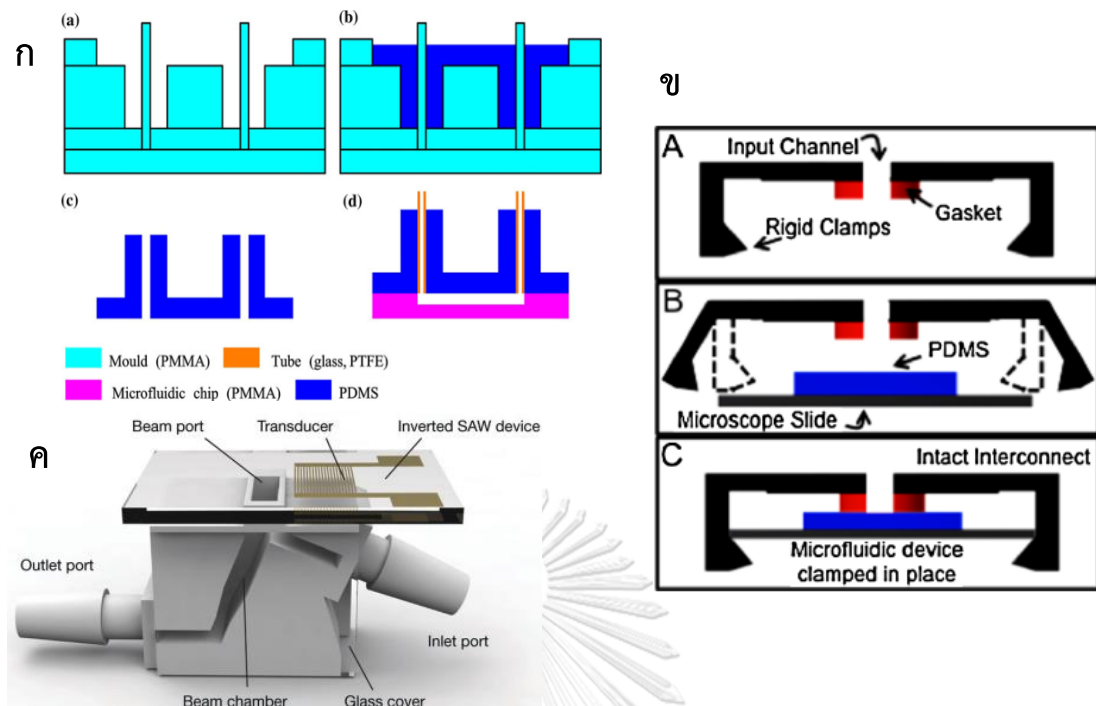
การหลีกเลี่ยงปัญหาการอุดตันของสารยึดติดสามารถทำได้ด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น การออกแบบซีพของไหลจุลภาคที่ใช้การบัดกรีในการเชื่อมต่อ [81] ซึ่งสร้างจากชั้นซิลิกอนที่มีช่องทางไหลจุลภาคมาประสานกับชั้น Pyrex โดยที่ตำแหน่งเชื่อมต่อพอร์ตออกสู่ภายนอกจะทำการสร้างลวดลายขงโลหะจำพวกทองแดงหรือไททานเนียมเพื่อไว้สำหรับบัดกรีกับท่อเชื่อมต่อโลหะด้วยตะกั่ว (รูปที่ 2.50ก) ซึ่งการเชื่อมต่อที่ออกจากซีพของไหลจุลภาคจะมีชุดสำหรับเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ขายในเชิงพาณิชย์ (รูปที่ 2.50ข) โดยที่สามารถทนความดันอากาศได้สูงถึง 200 atm. นอกจากนี้ยังมีวิธีการเชื่อมต่อท่อซึ่งเป็นการเชื่อมต่อท่อในแนวระดับโดยที่มีการใส่กาวเพื่อให้ยึดติดที่บริเวณจุดที่ใส่ท่อเข้าไป [82] โดยท่อที่ใส่เข้าไปจะชนกับบริเวณจุดที่ลดขนาดของช่องทางไหลจุลภาค ทำให้ท่อจะไม่สามารถถูกดันเข้าไปได้ เมื่อท่อทำการใส่ท่อแล้วจึงทำการใส่กาวตรงบริเวณจุดที่ใส่ท่อด้านนอกของซีพของไหลจุลภาค (รูปที่ 2.50ค) ซึ่งกาวตัวนี้จะใช้แสง UV ในการแข็งตัว โดยเทคนิคการฉายแสง UV มี 2 วิธี คือ วิธีที่ไม่ต้องใช้ตัวนำแสง (Non-Light-Guide Method) เป็นการฉายแสง UV ด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อให้กาวแข็งตัว (รูปที่ 2.50ง) และวิธีที่ใช้ตัวนำแสง (Light-Guide Method) เป็นการฉายแสง UV ผ่านเข้ามาที่ท่อให้กาวแข็งตัว (รูปที่ 2.50จ)



รูปที่ 2.50 (ก) กระบวนการสร้างชิพของไหลจุลภาคสำหรับการเชื่อมต่อด้วยการบัดกรี (ข) ภาพการประกอบชิพของไหลจุลภาคกับชุดสำหรับเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ขายในเชิงพาณิชย์ [81] (ค) ภาพการใส่ท่อก่อนทำการใส่กาว (ง) การฉายแสง UV จากกล้องจุลทรรศน์เพื่อให้กาวแข็งตัว (จ) การฉายแสง UV เข้าที่ท่อเพื่อให้กาวแข็งตัว [82]

(4) แบบเฉพาะงาน (Monolithic)

วิธีการเชื่อมต่ออีกรูปแบบหนึ่ง คือ การสร้างชิ้นงานหรือพอร์ตที่มีรูปแบบเฉพาะสำหรับการใช้งาน (Monolithic) อาจมีการสร้างส่วนหนึ่งของระบบของไหลจุลภาคกับพอร์ตเชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การหล่อชิ้นบนที่มีพอร์ตด้วย PDMS ซึ่งพอร์ตสามารถใช้ท่อในการแทรกที่พอร์ตได้ [83] (รูปที่ 2.51ก), การเท PDMS หล่อในแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะที่สามารถถอดประกอบได้ [84], การประสานพอร์ต PMMA กับช่องทางไหลจุลภาค PMMA เข้าด้วยกันด้วยคลื่นอัลตราโซนิกโดยที่ [85], การใช้โพลียูรีเทน (Polyurethane) ทาที่พอร์ตเชื่อมต่อกับชิ้น โพลียูรีเทน (Polyurethane) ที่แข็งตัวแล้ว โดยติดเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการเจาะที่ตำแหน่งรู [86], การสร้างพอร์ตเชื่อมต่อพลาสติกที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับการเชื่อมต่อท่อซึ่งติดตั้งปะเก็นไว้ โดยมีจิ๊กจับกดให้ท่อแนบติด [87] (รูปที่ 2.51ข), หรือการสร้างพอร์ตเชื่อมต่อที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีวงจรรไฟฟ้าหรือเซนเซอร์อยู่ภายในพอร์ตเชื่อมต่อ [88] (รูปที่ 2.51ค)



รูปที่ 2.51 (ก) กระบวนการสร้างชั้นบนที่มีพอร์ตด้วยการหล่อ PDMS สำหรับการแทรกท่อ [83] (ข) การสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อท่อด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีปะเก็นไว้กดแนบกับชิพ [87] (ค) โครงสร้างพอร์ตที่มีอุปกรณ์ SAWs ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ [88]

การทบทวนวรรณกรรมระบบช่องทางไหลจุลภาคในเรื่องพอร์ตเชื่อมต่อ โดยพิจารณารูปแบบทางเชื่อมต่อทั้ง 4 แบบ ตามลักษณะการติดตั้งและต่อพอร์ต [68] คือ (1) แบบแทรกสอดด้วยเข็มหรือท่อโดยตรง จำเป็นต้องประกอบและถอดออกทุกจุด (2) แบบสั้มผัส มักนิยมใช้ในกรณีที่มีพอร์ตเชื่อมต่อจำนวนมาก หรือต้องการประกอบหรือถอดออกอย่างรวดเร็ว (3) แบบถาวร เหมาะสำหรับการใช้งานในกรณีที่มีความดันสูงกว่า 1 MPa หรือต้องการยึดติดตายตัว (4) แบบเฉพาะงาน (Monolithic) เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อที่ต้องการคุณลักษณะหรืออุปกรณ์การใช้งานเฉพาะงาน โดยจะสรุปในส่วนของรูปแบบการเชื่อมต่อและเทคนิคการเชื่อมต่อดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค

ผู้แต่ง	รูปแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อ [68]	เทคนิคการเชื่อมต่อ
Hong et al., 2004 [69]	เข็ม/ท่อ (แทรกสอด)	ต่อเข็มเข้าชิพโดยตรงจากด้านบน
Lee and Park, 2013 [70]	เข็ม/ท่อ (แทรกสอด)	ต่อเข็มเข้าชิพโดยตรงจากด้านข้าง
van Swaay, Machler et al. 2014 [71]	เข็ม/ท่อ (แทรกสอด) สามารถใส่สารได้	พอร์ตเชื่อมต่อที่มีจุดต่อท่อจากภายนอกและ เข็มสำหรับต่อชิพ โดยมีรางสไลด์สเตนเลส สำหรับหยดสาร
Chen and Pan, 2011 [72]	เข็ม/ท่อ (แทรกสอด) พอร์ตแบบคอมพิวเตอร์	พอร์ตเชื่อมต่อถูกจัดให้อยู่ในรูปอุปกรณ์ เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถติดตั้งและ ถอดออกได้เร็วขึ้น
Scott et al., 2013 [73]	เข็ม/ท่อ (แทรกสอด) พอร์ตแบบคอมพิวเตอร์	พอร์ตเชื่อมต่อถูกจัดให้อยู่ในรูปอุปกรณ์ เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถติดตั้งและ ถอดออกได้เร็วขึ้น
Yang and Maeda, 2003 [74]	ตัวจับชิ้นงานกวดพอร์ต (แนบสัมผัส)	พอร์ตทั้ง 8 จะถูกดันติดเข้ากับชิพ โดยการใช้ อุปกรณ์จับชิ้นงานกวด ซึ่งตำแหน่งพอร์ต ภายนอก กับพอร์ตของชิพจะตรงกัน
Wilhelm et al., 2013 [75]	สกรูไขแน่น (แนบสัมผัส)	พอร์ตจะถูกติดกับเฟรมอะลูมิเนียมที่มีรูในการ ร้อยสกรูสำหรับไขล็อกให้แน่น จำนวน 2 รู ที่ บริเวณหัวและท้ายของแท่ง ที่ตำแหน่งพอร์ต จะมีลักษณะปะเก็นติดอยู่ ในการเชื่อมต่อท่อ ทำโดยการใส่สกรูที่รูทั้ง 2 ของทั้ง 2 เฟรมมา ประกบกันและไขล็อกให้แน่น
Cooksey et al., 2009 [76]	สุญญากาศยึดพอร์ต (แนบสัมผัส)	พอร์ตจำนวนมากจะถูกดูดติดเข้ากับชิพ ด้วย ระบบสุญญากาศ ซึ่งตำแหน่งพอร์ตภายนอก กับพอร์ตของชิพจะตรงกัน

ตารางที่ 2.11 การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค (ต่อ)

ผู้แต่ง	รูปแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อ [68]	เทคนิคการเชื่อมต่อ
Atencia et al., 2010 [77]	แม่เหล็ก (แนบสัมผัส)	สามารถถอดพอร์ตเข้าออกได้อย่างง่ายดาย โดยที่พอร์ตจะต้องติดตั้งปะเก็นเพื่อป้องกันการรั่วไหล
Glavan et al., 2013 [78]	การใช้เทปกาวติดชั้นของไหลจุลภาค (ถาวร)	การใช้เทปกาวในการติดกระดาดและพอร์ตเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน
Meng et al., 2001 [79]	การใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเชื่อมต่อพอร์ต (ถาวร)	การใช้ไนโตรเจนเหลวลดขนาดท่อก่อนนำมาติดกับพอร์ตแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ท่อแนบติดกับพอร์ตเชื่อมต่อ
Ashish and Mayuresh, 2003 [80]	การใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเชื่อมต่อพอร์ต (ถาวร)	การใช้เตาร้อนละลายปลายท่อเทฟลอนให้ติดกับซีพของไหลจุลภาคก่อนการใช้ไอพ็อกซี่ซีลที่จุดเชื่อมต่ออีกทีหนึ่ง
Murphy et al., 2007 [81]	เชื่อมต่อด้วยการบัดกรี (ถาวร)	การสร้างซีพของไหลจุลภาคโดยที่บริเวณที่เชื่อมต่อจะมีลวดลายของโลหะสำหรับบัดกรีท่อโลหะ ก่อนนำซีพของไหลจุลภาคไปเชื่อมต่อกับชุดสำหรับเชื่อมต่อกับพอร์ตที่ขายในเชิงพาณิชย์
Hartmann et al., 2008 [82]	เชื่อมต่อด้วยกาวที่แข็งตัวด้วย UV (ถาวร)	การสอดท่อเข้าไปจุดที่ใส่ท่อในแนวเดียวกับช่องทางไหลจุลภาค โดยมีจุดที่ขนาดท่อเชื่อมจะลดขนาดเป็นช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งจะหยุดตำแหน่งท่อไว้ จากนั้นจึงใช้กาวที่ต้องใช้แสง UV ในการแข็งตัวใส่ที่บริเวณจุดใส่ท่อนอกซีพของไหลจุลภาคก่อนทำการฉายแสง UV

ตารางที่ 2.11 การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค (ต่อ)

ผู้แต่ง	รูปแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อ [68]	เทคนิคการเชื่อมต่อ
Chang et al., 2012 [83]	ชิ้นงานชิ้นบนรวมพอร์ต ที่หล่อด้วย PDMS (Monolithic)	การหล่อชิ้นงานชิ้นบนที่พอร์ตที่ใช้แทรกท่อ PTFE ด้วย PDMS ซึ่งชิ้นบนและพอร์ตที่ถูกหล่อจะเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปประสานชั้นช่องทางไหลจุลภาคที่ทำจากแผ่นอะคลิลิคด้วยประจุโคโรน่า
Waldbaur et al., 2013 [84]	ชิ้นงานชิ้นบนรวมพอร์ต ที่หล่อด้วย PDMS (Monolithic)	การหล่อชิ้นงานจากแม่พิมพ์ที่ทำจากโลหะ โดยที่ตำแหน่งทางเข้าจะถูกติดตั้งพอร์ตให้สามารถรับเข็มปิเปตได้
Ng et al., 2009 [85]	ประสานพอร์ต PMMA เข้ากับแผ่น PMMA ด้วยอัลตราโซนิก (Monolithic)	การต่อพอร์ตสำหรับการเสียบท่อ โดยการเชื่อมต่อชิ้นงานระหว่างแผ่นอะคลิลิคกับพอร์ตอะคลิลิคด้วยการเชื่อมอัลตราโซนิก โดยการใส่ Blockage เพื่อป้องกันไม่ให้อะคลิลิคมาละลายปิดช่องพอร์ต ก่อนจะนำไปเชื่อมกับชิ้นช่องทางไหลจุลภาค
Wu et al., 2012 [86]	การเชื่อมต่อท่อ และชิ้น โพลียูรีเทนให้เป็นเนื้อ เดียวกันแบบถาวรด้วยเร ซินโพลียูรีเทน (Monolithic)	การสร้างชิ้นบนที่มีพอร์ตที่เป็นวัสดุโพลียูรีเทน โดยการพอกโพลียูรีเทนที่ปลายท่อ ก่อนนำไปต่อกับชิ้นโพลียูรีเทนปล่อยให้แข็งตัว และทำการลอกชิ้นบนออกจากแม่พิมพ์แล้วทำการเจาะรู ซึ่งท่อที่ใช้ต่อจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งใช้เป็นอ่าง (reservoir) สำหรับด้านอินเล็ตและเอาท์เล็ต
Paydar et al., 2014 [87]	การสร้างอุปกรณ์ เชื่อมต่อด้วยเครื่องพิมพ์ สามมิติที่มีปะเก็นและ clamp ล็อคให้ติดกับชิพ (Monolithic)	การสร้างชิ้นงานสำหรับการต่อท่อด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยที่ตัวที่สร้างนี้จะมีปะเก็นไว้แนบติดกับพอร์ตของชิพและมีตัวล็อคไว้ล็อคชิพให้แน่นเพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหล

ตารางที่ 2.11 การทบทวนวรรณกรรมเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค (ต่อ)

ผู้แต่ง	รูปแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อ [68]	เทคนิคการเชื่อมต่อ
Dentry et al., 2014 [88]	การสร้างพอร์ตที่มีอุปกรณ์ SAWs ในตัว (Monolithic)	การสร้างพอร์ตเชื่อมต่อที่มีอินเล็ตและเอาท์เล็ต โดยที่ติดตั้งอุปกรณ์สร้างคลื่นเสียง (Surface Acoustic Wave) ไว้เพื่อสร้างอัตรการไหลจากอ่าง (reservoir) โดยอุปกรณ์นี้จะสร้างมาจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

สรุปเทคนิคการเชื่อมต่อระบบของไหลจุลภาค

การเชื่อมต่อระบบแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ และระบบของไหลจุลภาค ซึ่งมีจำนวนพอร์ตเชื่อมต่อไม่มาก (<10 พอร์ต) การเลือกใช้แบบต่อด้วยเข็มหรือท่อโดยตรง เป็นทางเลือกที่เหมาะสมและไม่จำเป็นต้องหาอุปกรณ์มาสนับสนุนเพิ่ม หรือคต้องออกแบบพอร์ตเชื่อมต่อเฉพาะ

2.5.8 เทคนิคการควบคุมแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์

การควบคุมอุปกรณ์ในระดับไมโครอนั้น ถือเป็นเรื่องที่มีความละเอียดอ่อนและควรให้ความสำคัญอย่างยิ่งยวด เพราะในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค หรือการจ่ายระดับแรงดันอากาศให้แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์นั้น เราต้องการความเที่ยงตรงของค่าที่เราป้อนเข้าระบบ LOCs เพื่อให้อุปกรณ์นั้นทำงานได้ตามที่เราต้องการ

การออกแบบระบบควบคุมแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ภาคควบคุม และภาคกำลัง ซึ่งภาคควบคุม คือ ภาคที่มีระบบควบคุมซึ่งในที่นี้คือไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเราสามารถสั่งงานผ่านอุปกรณ์ดังกล่าวโดยสัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะไปยังอุปกรณ์ที่ใช้ขยายแรงดัน เช่น รีเลย์ หรือออปโตไอโซเลเตอร์ เป็นต้น ซึ่งจะได้แรงดันไฟที่สูงขึ้นก่อนที่จะไปสั่งงานโซลินอยด์วาล์วซึ่งทำให้นิวเมติกส์วาล์วทำงาน และมีอากาศไปดันแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์

ส่วนรูปแบบการต่อสัญญาณ เพื่อไปสั่งแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ มีอยู่ 2 ประเภท คือ กรณีส่งสัญญาณให้ไปสั่งนิวเมติกส์วาล์วทำงาน และลมอัดที่ได้จากนิวเมติกส์วาล์วจะทำงานแบบวงจรดิจิตอลไปสั่งแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์อีกทีหนึ่ง (ทางอ้อม) [89] เช่น วงจร NOR-GATE ดังรูปที่ 2.52 กับกรณี

ส่งสัญญาณให้ไปสั่งนิวเมติกส์วาล์วทำงานและลมอัดจะส่งไปดันแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์โดยตรง (ทางตรง) เช่น การสั่งให้ไมโครปั๊มทำงาน [6] ดังรูปที่ 2.53

(1) กรณีการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทางอ้อม

วิธีการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์แบบทางอ้อม เป็นการสั่งแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ต้องการใช้งาน โดยการสั่งลมอัดแบบวงจรถิจิตอล หรือชุดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ตัวอื่นที่ทำหน้า ารับสร้างวงจรถิจิตอลในการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ใช้ในการควบคุมวาล์วในการเปิดปิด ช่องทางไหลจุลภาค เช่น วงจรวาล์ว NOR-GATE ซึ่งจะแสดงการออกแบบ CAD ของวงจรวาล์ว NOR-GATE โดยที่ชั้นควบคุม (สีน้ำเงิน) จะอยู่ชั้นล่าง ส่วนชั้นทางไหล (สีแดง) จะอยู่ชั้นบน โดยพื้นที่ที่ ซ้อนทับกันจะแสดงสีม่วง (

รูปที่ 2.52ก) สามารถ แสดงรูปแบบการให้สัญญาณสำหรับการใช้งานของแอกซ์เวเตอร์ (

รูปที่ 2.52ข) จากวงจรวาล์วซึ่งจะขึ้นกับการส่งสัญญาณลมในช่องอินพุต1 และอินพุต2 ซึ่งจะส่ง เอาต์พุต1 ในการควบคุมช่องทางไหลจุลภาค โดยจะมีทั้งสิ้น 4 กรณี จากจำนวนอินพุต 2 ตัว คือ

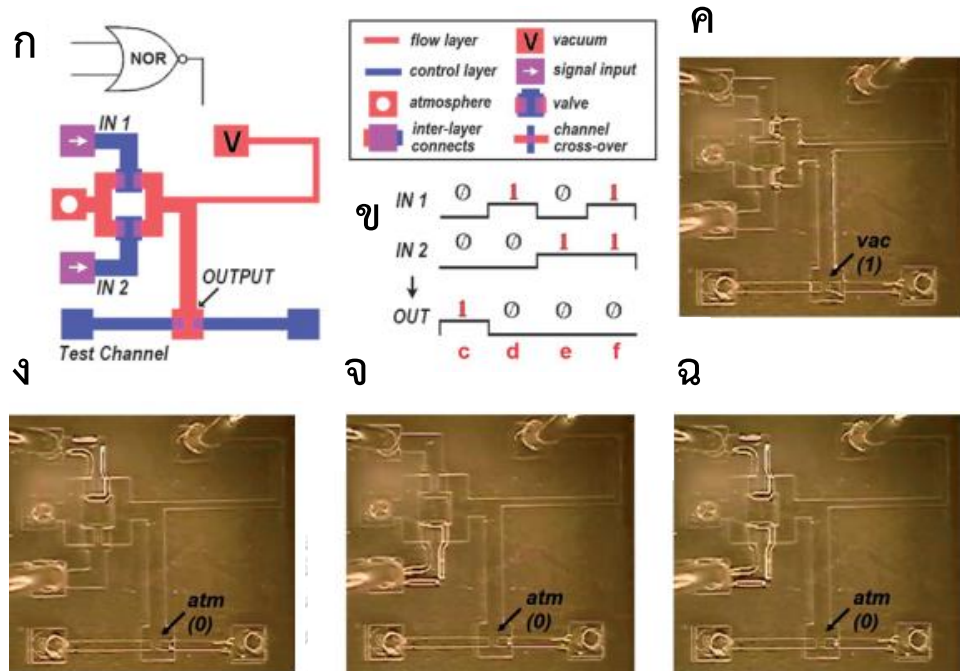
กรณีที่ 1 : แสดงอินพุต1และอินพุต2 (0-0) จะได้เอาต์พุต 1 (

รูปที่ 2.52ค) กรณีที่ 2 : แสดงกรณีอินพุต1และอินพุต2 (1-0) จะได้เอาต์พุต0 (

รูปที่ 2.52ง) กรณีที่ 3 : แสดงกรณีอินพุต1และอินพุต2 (0-1) จะได้เอาต์พุต0 (

รูปที่ 2.52จ) กรณีที่ 4 : แสดง กรณีอินพุต1และอินพุต2 (1-1) จะได้เอาต์พุต0 (

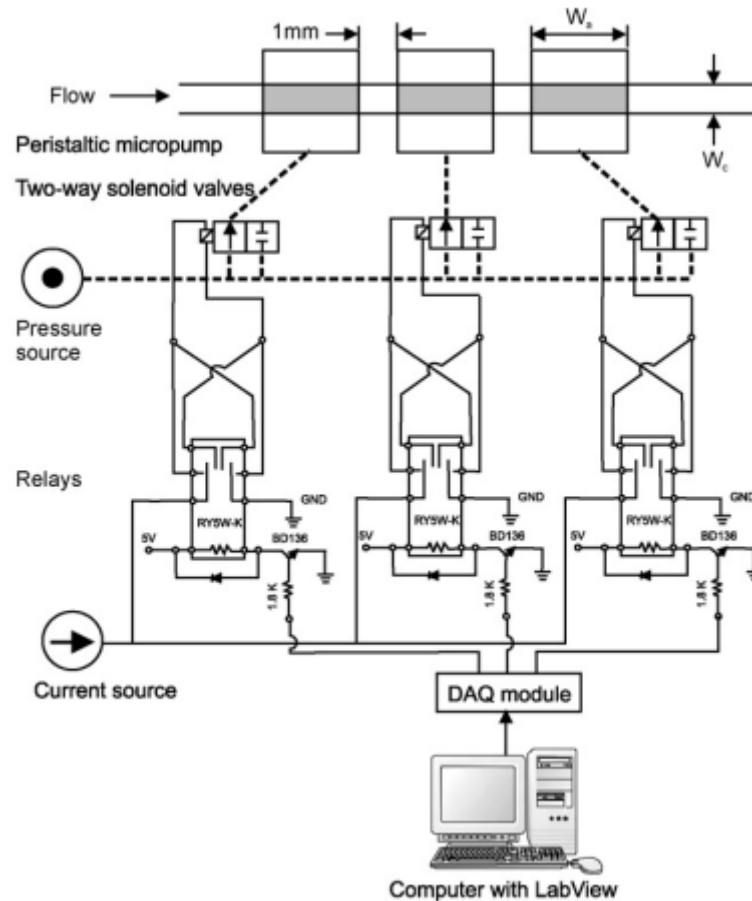
รูปที่ 2.52ฉ)



รูปที่ 2.52 อุปกรณ์วงจรไมเมติกส์ NOR-GATE และหลักการทำงาน [89]

(2) กรณีการควบคุมแควซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทางตรง

เมื่อทำการส่งสัญญาณให้ไปสั่งนิวเมติกส์วาล์วทำงานและลมอัดจะส่งไปดันแควซ์เอเตอร์นิวเมติกส์โดยตรง (ทางตรง) ซึ่งจะสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ผ่าน (Data Acquisition-DAQ) ซึ่งจะทำให้การแปลงคำสั่งในคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อไปสั่งการใช้งานรีเลย์ให้ทำงานตามต้องการ โดยปกติระบบนิวเมติกส์นี้จะเป็นปกติเปิด (Normally Open) เมื่อสั่งให้รีเลย์ทำงาน หน้าสัมผัสในตัวรีเลย์จะต่อระหว่างขาร่วม (Common) และขาเปิดปกติ (Normally Open) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านหน้าสัมผัสนี้ได้ และกระแสไฟฟ้านี้จะไปกระตุ้นโซลินอยด์วาล์วให้ทำงาน ซึ่งเมื่อโซลินอยด์วาล์วทำงานจะทำให้นิวเมติกส์วาล์วเคลื่อนที่ และทำให้อากาศที่อัดไว้สามารถไหลเข้าไปที่นิวเมติกส์ไมโครปั๊มได้ โดยที่เมื่อแรงดันอากาศสูงขึ้นจะทำให้ฟิล์มบางเกิดการขยายตัว ดังรูปที่ 2.53

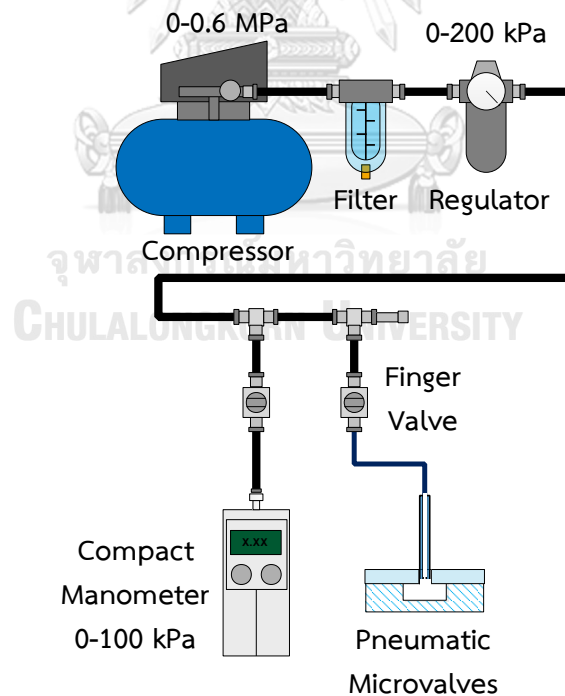


รูปที่ 2.53 แผนภาพแสดงระบบควบคุมแควซ์เอเตอร์นิวเมติกส์กรณีสั่งโดยตรง [6]

2.5.9 ระบบนิวเมติกส์

การออกแบบระบบนิวเมติกส์จำเป็นคำนึงถึงคุณภาพของลมอัดที่เราใช้ในการทดลอง ดังนั้น การปรับคุณภาพลมก่อนที่ลมเข้าไปในแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์เป็นสิ่งจำเป็น อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบนิวเมติกส์ ดังรูปที่ 2.54 ประกอบด้วย ปัมลม(PUMA/mini pancake OL-1204) สำหรับการสร้างลมอัด (0-0.6 MPa) ก่อนจะส่งลมไปยัง ตัวกรองลมคักน้ำ(SMC/AF20-02BC-A) ซึ่งจะดักไปน้ำในลมอัดและฝุ่น เพื่อไม่ให้เข้าไปในระบบ จากนั้นจึงทำการปรับแรงดันอากาศด้วยตัวควบคุมแรงดัน(SMC/IR2000-02BG) ซึ่งสามารถปรับแรงดันอากาศได้ในช่วง 0-200 kPaและมานอมิเตอร์(SMC/ PPA100 และ PPA102) ไว้สำหรับวัดความดันอากาศโดยจะมีฟิงเกอร์วาล์วคอยป้องกันอุปกรณ์ เนื่องจากมานอมิเตอร์รุ่น PPA100 วัดความดันอากาศได้ในช่วง 0-200 kPa และมานอมิเตอร์รุ่น PPA102 วัดความดันอากาศได้ในช่วง 0.1-1 MPa

อุปกรณ์นิวเมติกส์นี้จะทำการปรับระดับแรงดันอากาศให้อยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งานได้ และในส่วนการเชื่อมต่อกับมานอมิเตอร์จะมีวาล์วสำหรับป้องกันแรงดันอากาศในช่วงที่ไม่ได้อยู่ในการใช้งาน

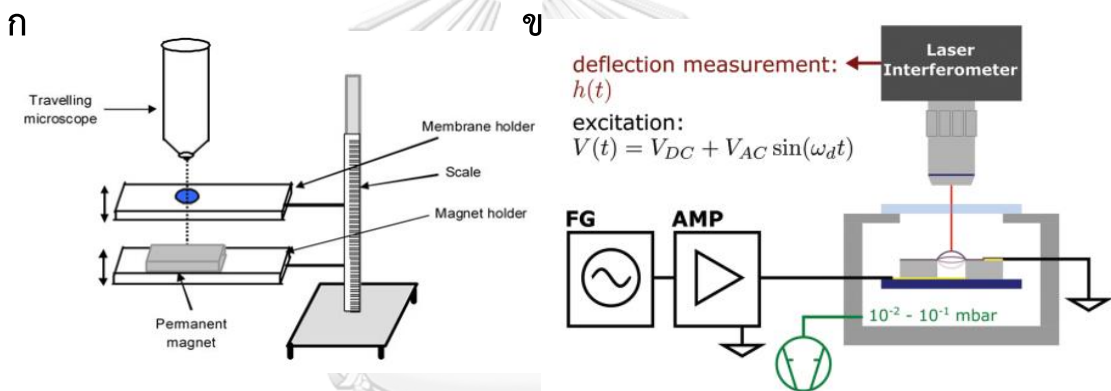


รูปที่ 2.54 ชุดอุปกรณ์บริการลมสำหรับใช้ในงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์

2.3.10 เทคนิคการวัดภาพระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์

การวัดระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอากาศที่กระทำต่อฟิล์มบางของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ โดยการเปรียบเทียบกับระยะกระดกซึ่งจะเป็นการวัดในแนวตั้ง (แกน Z) เพื่อให้ง่ายต่อการวัดค่า ซึ่งเทคนิคการวัดมิติเรขาคณิตได้หลายรูปแบบ เช่น

การวัดระยะกระดกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับสเกลบาร์นั้น เหมาะสำหรับงานที่มีขนาดใหญ่ (ไมโครวาล์วมีความหนา 250 μm เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm) [90] (รูปที่ 2.55ก) หรือการใช้เลเซอร์ในการวัดระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ซึ่งจะแปลงค่าระยะที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (รูปที่ 2.55ข) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะไม่มีความไม่แน่นอนทางการวัดสูงซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นกับการติดตั้งอุปกรณ์

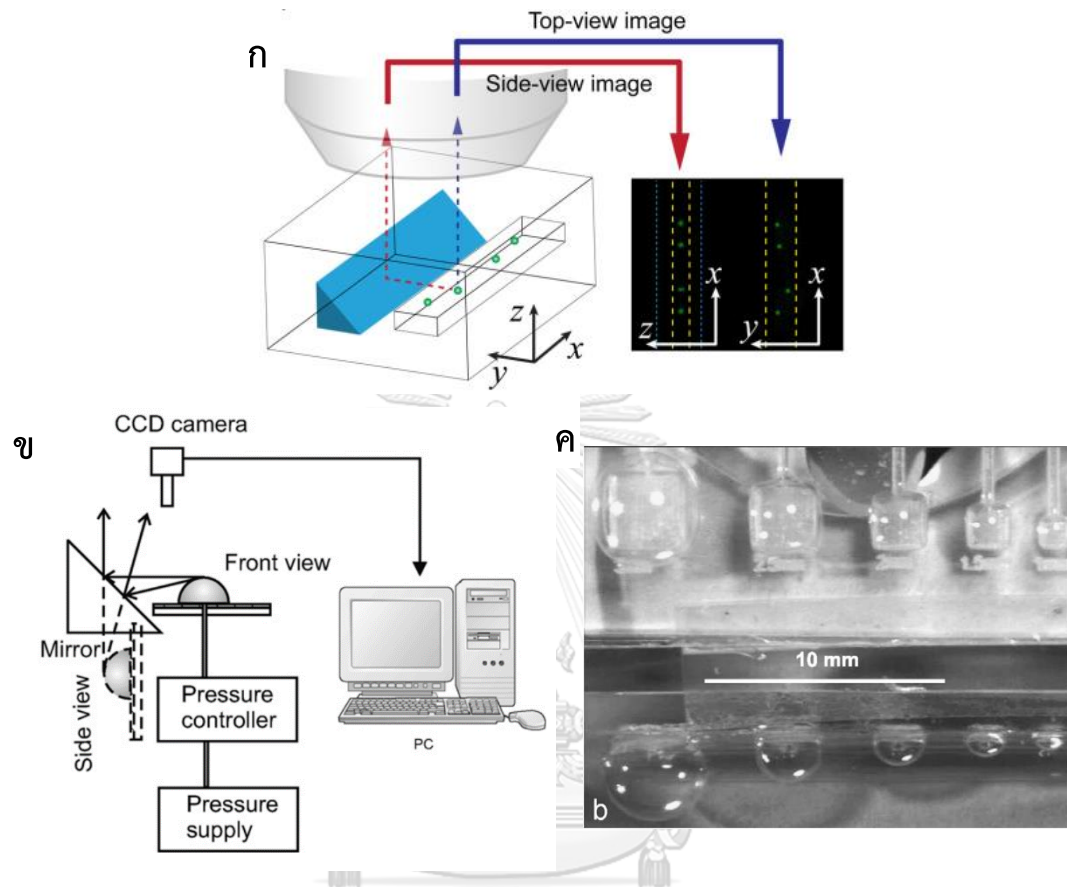


รูปที่ 2.55 (ก) การวัดระยะกระดกใช้กล้องจุลทรรศน์ร่วมกับสเกลบาร์ [90] (ข) การใช้เลเซอร์ในการวัดระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ [91]

การวัดภาพวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (Optical Microscope) จะได้ภาพจากด้านบนเพียงเท่านั้น ซึ่งหากต้องการวัดภาพด้านข้างของวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจำเป็นต้องมีการประยุกต์โดยการใช้อุปกรณ์บางอย่างเพื่อให้สามารถวัดภาพได้ทั้งด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน

การจับภาพเซลล์ที่ไหลผ่านช่องทางไหลจุลภาคโดยที่สามารถจับภาพได้ทั้งด้านบนและด้านข้าง สามารถทำได้โดยการฝังไมโครมิลเลอร์ที่สร้างขึ้นจากซิลิกอนเวเฟอร์ที่เคลือบอลูมิเนียมเพื่อให้สามารถสะท้อนภาพเซลล์ได้ในช่วงแสงขาว (400-700 นาโนเมตร) (รูปที่ 2.56ก) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก [92] แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดกับแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าโดยที่สามารถสะท้อนภาพได้ทั้งด้านบนและด้านข้าง การใช้กระจกฉากขนาด 45°

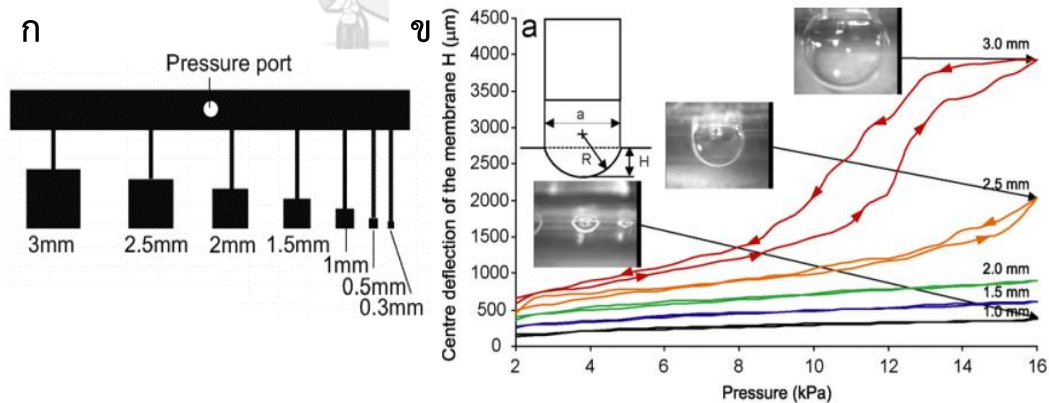
รูปที่ 2.56 ข ที่มีขนาดใหญ่ทำให้สามารถบันทึกภาพแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์หลายขนาดได้พร้อมกัน ด้วยการถ่ายภาพในครั้งเดียว [6] ดังรูปที่ 2.56 ค



รูปที่ 2.56 (ก) การวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์โดยการประยุกต์ใช้ไมโครมิลเลอร์ [92] (ข) การวัดระยะกระดกของแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์โดยใช้กระจกฉากขนาด 45° (ค) ภาพแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์ด้านบนและด้านข้าง [6]

2.5.11 การทดสอบและการคำนวณระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์

การทดสอบวัตรระยะกระดกตัวของแอกซ์เอเตอร์ของนิวมेटิกส์แอกซ์เอเตอร์ จะทำโดยการวัดขนาดของระยะกระดกตัวของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ด้วยกล้องจุลทรรศน์คอยรับภาพด้านบนของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์และกระจกฉากคอยรับภาพด้านข้างของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ (รูปที่ 2.56ข) [6] ซึ่งชุดที่ใช้ในการทดสอบระยะกระดกตัวของแอกซ์เอเตอร์ของนิวมेटิกส์ควรมีขนาดของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์หลายขนาดสำหรับการทดสอบ (รูปที่ 2.57ก) โดยการวัตรระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์ของนิวมेटิกส์ จะทำการวัดโดยการปรับค่าแรงดันอากาศเพื่อวัตรระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ ซึ่งทำการปรับแรงดันอากาศจากค่าแรงดันอากาศที่ต่ำไปยังค่าแรงดันอากาศที่สูง ก่อนที่จะทำการปรับค่าแรงดันอากาศที่สูงไปยังค่าแรงดันอากาศที่ต่ำ แล้วทำการเปรียบเทียบผลของระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์ของนิวมेटิกส์ที่ได้จากช่วงการเพิ่มแรงดันอากาศกับช่วงการลดแรงดันอากาศ ที่ค่าแรงดันอากาศค่าคงที่ใด ๆ ซึ่งค่าที่ได้จากทั้ง 2 กรณีดังกล่าว ควรที่จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่หากแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์มีขนาดใหญ่ จะเกิดปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ซึ่งค่าระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์ของนิวมेटิกส์ที่ได้จากช่วงการเพิ่มแรงดันอากาศกับช่วงการลดแรงดันที่ค่าแรงดันอากาศค่าคงที่เดียวกัน จะมีค่าระยะกระดกตัวที่ต่างกันมาก ทำให้ไม่สามารถนำแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ที่มีขนาดนั้นไปใช้งานได้ เช่น แอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ขนาด 2500 μm และแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ขนาด 3000 μm ดังรูปที่ 2.57 ข



รูปที่ 2.57 (ก) แอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหลายขนาด (ข) กราฟการวัตรระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์เทียบกับแรงดันอากาศ

การคำนวณหาระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น ขนาดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ ความหนาของฟิล์มบาง แรงดันอากาศ เป็นต้น ซึ่งการคำนวณหาระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส สามารถได้จากสมการที่ 2.1 [93]

$$\frac{w_0}{a} = 0.474 \left[\left(1 - v^2\right) \frac{Pa}{Eh} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

- P = แรงดันอากาศ
a = ระยะความยาวด้านเท่าของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
E = ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น
h = ความหนาของฟิล์มบาง
v = ค่าปัวซอง
 w_0 = ค่าระยะกระดก

ดังนั้นการเลือกใช้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์จำเป็นต้องควบคุมค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

2.6 สรุปปริทรรศน์วรรณกรรม

แอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก เป็นต้น ที่ทำให้เซลล์เกิดการแปรสภาพ เพราะพลังงานจากลมอัดที่ทำให้ฟิล์มบางเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยไม่ทำอันตรายกับเซลล์

กระบวนการสร้างแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ จะใช้ 2 รูปแบบการสร้างชิ้นงาน ซึ่งชั้นควบคุมและชั้นของไหล สามารถผลิตได้ด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยการหล่อ PDMS:Curing Agent ในอัตราส่วน 10:1 กับแม่พิมพ์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Stereolithography ซึ่งมีข้อดีกว่าการผลิตแม่พิมพ์แบบทั่วไปในแง่เวลาและราคา แต่ต้องแลกด้วยค่าความละเอียดในการผลิตที่ลดลง ส่วนการสร้างฟิล์มบางนั้น เราไม่สามารถใช้วิธีข้างต้นในการสร้างได้ เนื่องจากฟิล์มบางมีความหนา (<100 ไมครอน) อีกทั้งตัวฟิล์มบางไม่ใช่วัสดุแกร่งและเสีयरูปได้ง่าย ดังนั้นการสร้างฟิล์มบางบนชั้นสังเวทย์จะช่วยให้ฟิล์มบางสามารถคงรูปก่อนที่จะนำไปประสานชิ้นงานได้ ซึ่งชั้นสังเวทย์ที่ใช้นั้นคือ PVA ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถละลายน้ำได้และไม่เป็นพิษ

การประสานชิ้นงานเข้าด้วยกันมีอยู่หลายวิธีซึ่งวิธีการคายประจุโคโรน่า เป็นวิธีการหนึ่งที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงและสามารถเชื่อมประสานชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมทั่วไป โดยการให้ประจุกับชิ้นงานเพื่อปรับสภาพผิวให้สามารถประสานชิ้นงาน PDMS และกระจกสไลด์ให้สามารถติดกันได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีช่วย

การเชื่อมต่อออกสู่ระบบภายนอกก็มีหลายวิธี แต่เนื่องจากจำนวนอินพุตเอาต์พุตที่น้อยและค่าแรงดันอากาศไม่ได้สูงมาก การเชื่อมต่อแบบแทรกสอดด้วยเข็มหรือท่อ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

สรุปในส่วนการสร้าง เราสามารถหารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างได้ แต่จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ในการสร้างให้เหมาะสม ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ในส่วนการสร้างและประสานชิ้นงานนั้นจะอยู่ในบทที่ 3 ต่อไป

ส่วนการทดสอบวัตรระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ การใช้กระจกฉากขวาเพื่อใช้สะท้อนภาพด้านข้างของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ จะช่วยให้กล้องจุลทรรศน์สามารถจับภาพของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ทั้งจากด้านข้างและด้านบนได้ภายในภาพเดียวกัน ถือว่าเป็นการวัดค่าระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ได้ง่ายที่สุด ซึ่งจะเป็นแนวทางในการทำการทดลองตั้งแต่บทที่ 4 เป็นต้นไป

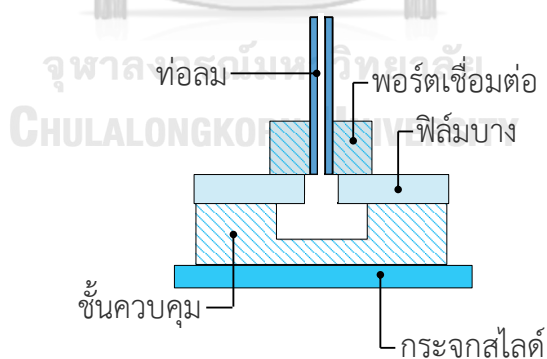
บทที่ 3

กระบวนการสร้างและประสานชิ้นงาน

บทที่ 3 จะเป็นการพัฒนาเทคนิคในการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ตั้งแต่การสร้างช่องทางไหลจุลภาคด้วยหลักการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยใช้แม่พิมพ์จากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งมีปัญหาในด้านความหยาบผิว การสร้างฟิล์มบางและชั้นสังเวย การเชื่อมประสานชั้นควบคุมและฟิล์มบางโดยวิธีการคายประจุโคโรน่า การล้างชั้นสังเวยออก การเชื่อมพอร์ตท่อลมและกระจกสไลด์เข้ากับชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า

3.1 โครงสร้างชีพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่าย

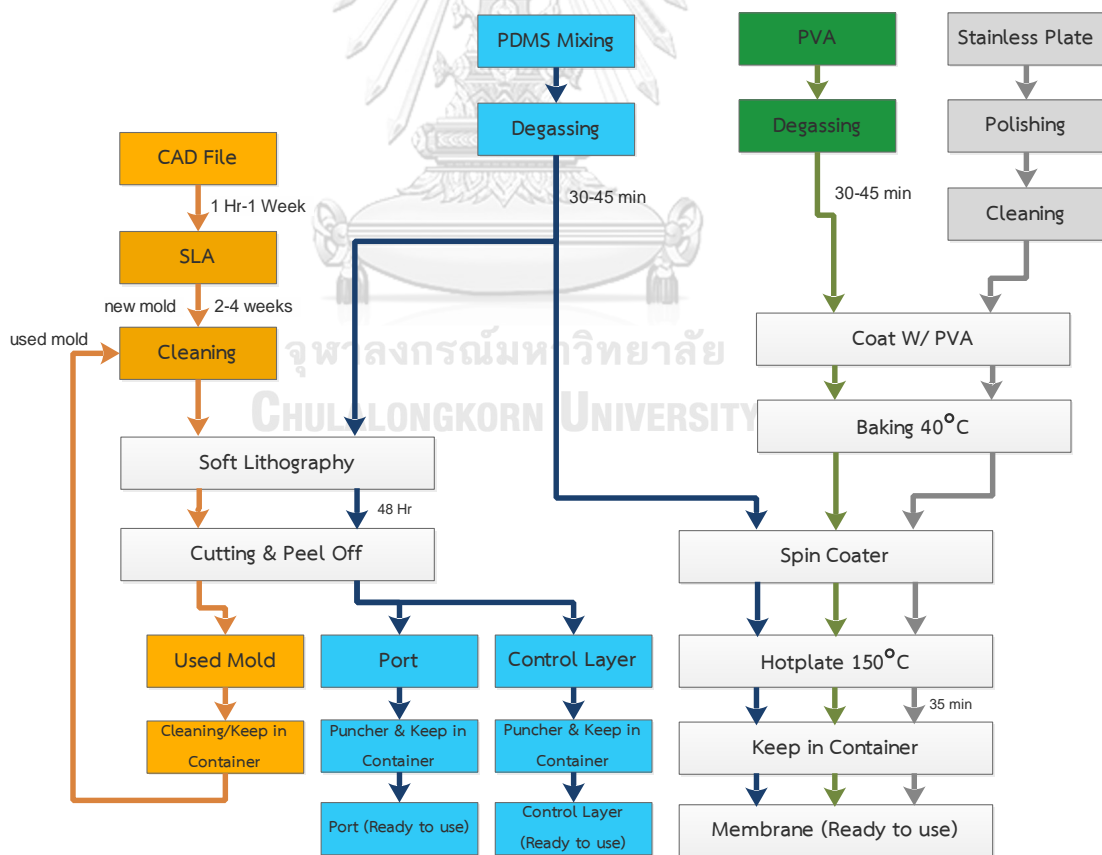
แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนการเชื่อมต่อระบบนิวเมติกส์ (ท่อลมและพอร์ตเชื่อมต่อ), ฟิล์มบาง และชั้นควบคุม ดังรูปที่ 3.1 โดยในที่นี้เราได้เลือกรูปแบบโครงสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ แบบปกติเปิด มีชั้นควบคุมอยู่ใต้ชั้นของไหล เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตระยะกระดกของฟิล์มบาง ซึ่งการหารูปแบบกระบวนการสร้างชีพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่ายจะขอกกล่าวในหัวข้อที่ 3.2 ต่อไป



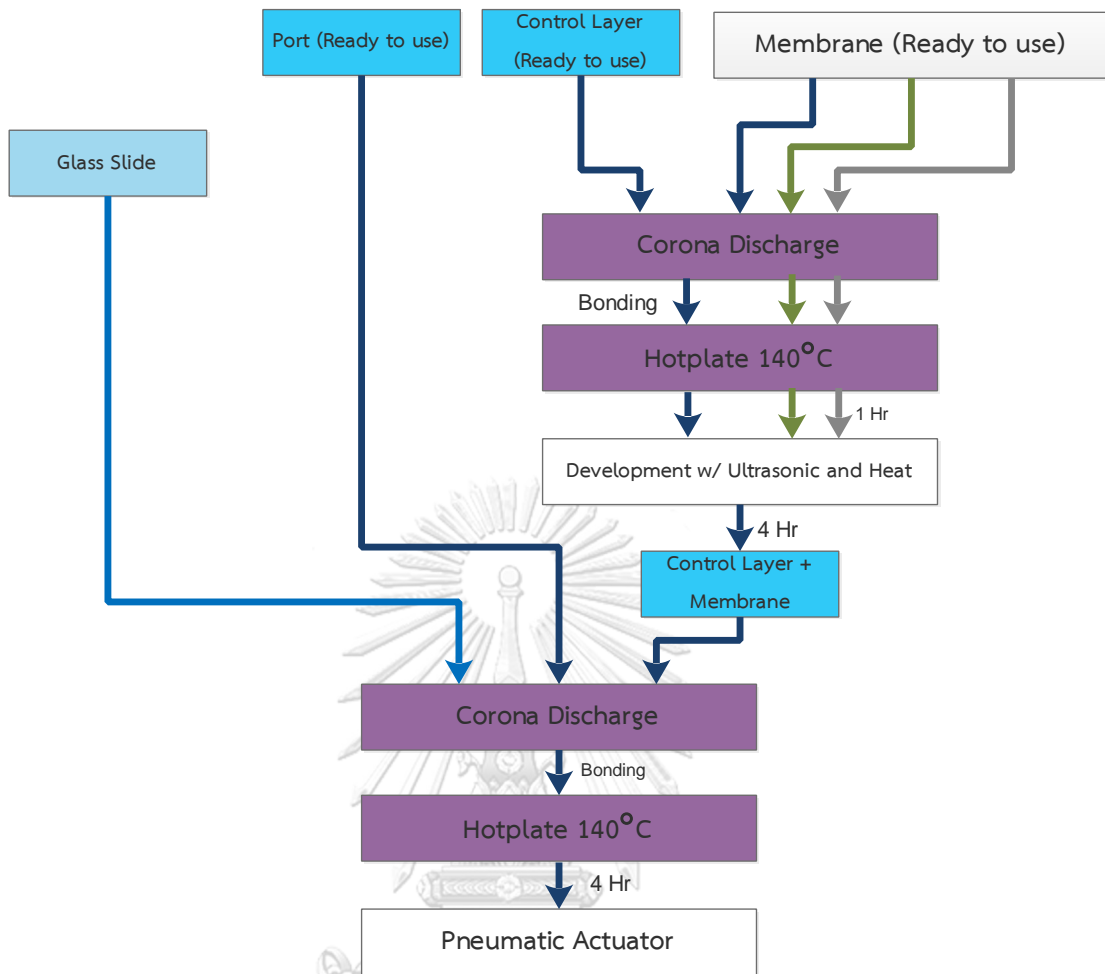
รูปที่ 3.1 โครงสร้างชีพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่าย

3.2 กระบวนการหารูปแบบการผลิตชิ้นงานสำหรับการทดลอง

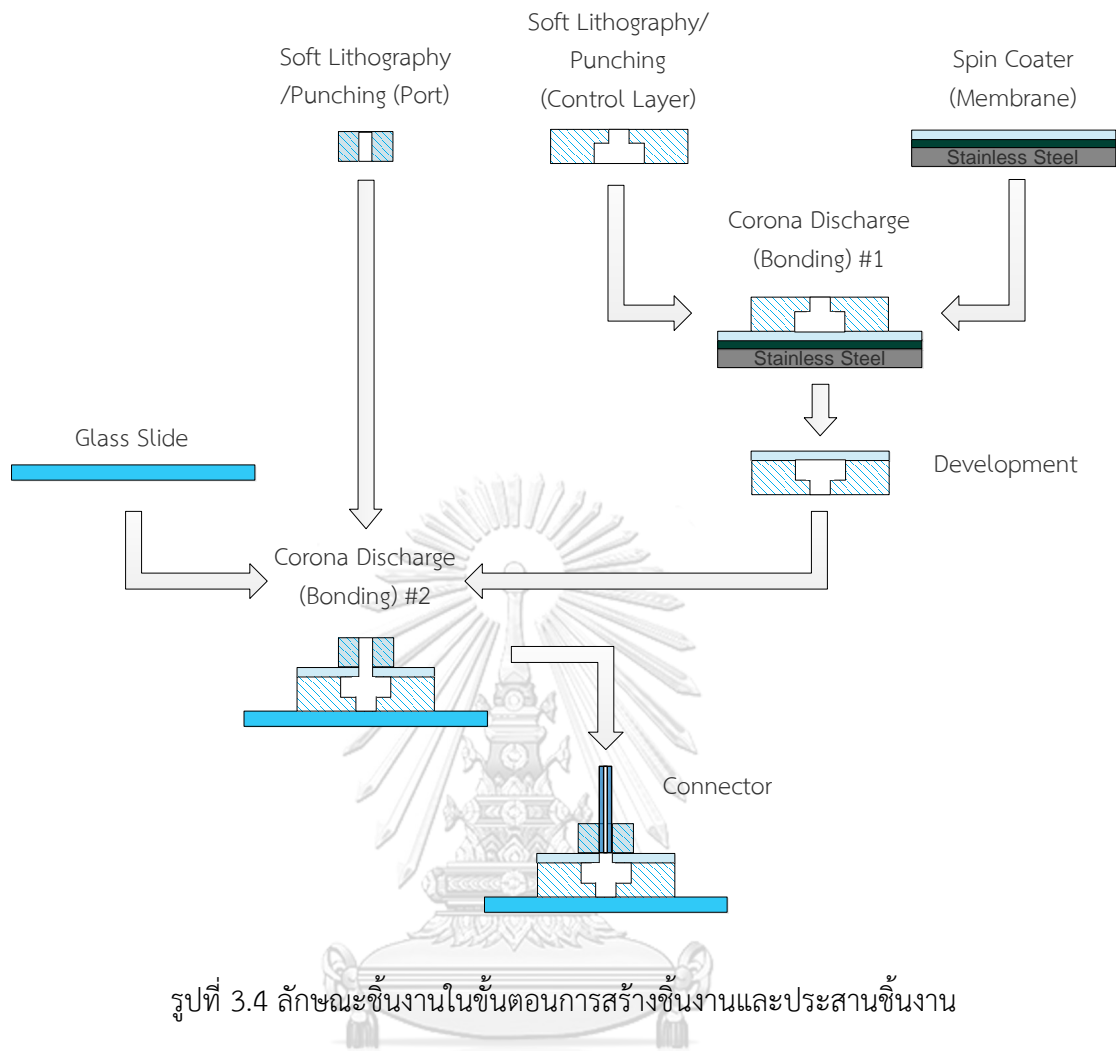
การหากระบวนการสร้างชิ้นงานจำเป็นต้องเข้าใจลักษณะชิ้นงานที่จะทำการสร้างขึ้นมาซึ่งชิ้นส่วนที่ต้องทำการสร้าง มีอยู่ 3 ชิ้นส่วน คือ ชั้นควบคุม พอร์ตควบคุมและฟิล์มบาง การสร้างชั้นควบคุมและพอร์ตควบคุมสามารถทำได้ด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ในขณะที่ฟิล์มบางจะใช้วิธีการปลูกฟิล์มบนชั้นสังเวทย์ ซึ่งการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นงานและการประสานชิ้นงานจะช่วยลดปัญหาด้านคุณภาพของชิ้นงาน และลดโอกาสสูญเสียชิ้นงานระหว่างกระบวนการผลิต โดยภาพรวมกระบวนการสร้าง (รูปที่ 3.2) และการประสานชิ้นงาน (รูปที่ 3.3) จะแสดงกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสำหรับการสร้างแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งชิ้นงานที่เสร็จจากการผลิตชั้นควบคุมและพอร์ตควบคุมด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) เมื่อนำมาประสานเข้ากับฟิล์มบางบนชั้นสังเวทย์ด้วยวิธีคายประจุโคโรน่าแล้วทำการล้างออกตามขั้นตอนที่แสดงใน รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 จะได้ลักษณะชิ้นงานตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 กระบวนการสร้างชิ้นงานก่อนการประสานชิ้นงาน



รูปที่ 3.3 กระบวนการประสานชิ้นงานเป็นแอดชัวเอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานในขั้นตอนการสร้างชิ้นงานและประสานชิ้นงาน

3.3 การสร้างแม่พิมพ์สำหรับการหล่อชิ้นงานและการสร้างชิ้นควบคุม

การสร้างชิ้นงานด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) เป็นการหล่อชิ้นงานโพลีเมอร์ PDMS ที่ได้จากแม่พิมพ์สำหรับการหล่อชิ้นงาน ซึ่งออกแบบระบบช่องทางไหลจุลภาคไว้ภายใน เมื่อทำการลอกชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงาน PDMS ที่ลอกออกมานั้นจะมีขนาดของช่องทางไหลจุลภาคเท่ากับขนาดของช่องทางไหลจุลภาคที่อยู่บนแบบแม่พิมพ์สำหรับการหล่อ

หัวข้อนี้จะเป็นการสรุปเทคนิคที่เหมาะสมในการสร้างชิ้นงานที่เกิดจากข้อจำกัดของแม่พิมพ์ ซึ่งได้มีการพัฒนารูปแบบชิ้นงานอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหยาบผิวต่ำ ชิ้นงานมีความหนาสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวชิ้นงาน และชิ้นงานมีความหนาที่ไม่มากจนเกินไปสำหรับเวลาเจาะรูระบายไอน้ำในระหว่างขั้นตอนการประสานชิ้นงาน PDMS-PDMS ด้วยวิธีการคายประจุไครโน

3.3.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน

ชั้นควบคุมและชั้นของไหล สามารถผลิตได้ด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยการหล่อ PDMS:Curing Agent ในอัตราส่วน 10:1 กับแม่พิมพ์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติแบบ Stereolithography ซึ่งกระบวนการสร้างชิ้นงานสามารถสรุปเป็นขั้นตอน (รูปที่ 3.5) ได้ดังนี้

1. ทำการผสม PDMS ในส่วนของ Monomer : Curing Agent อัตราส่วน 10:1 ในแก้วพลาสติกแล้วทำการคนให้เท่ากันด้วยอุปกรณ์ที่เป็นแผ่นยาวสำหรับใช้แล้วทิ้ง เช่น มีดพลาสติก ไม้ไอศกรีม เป็นต้น ซึ่งการคนให้คนไปในทิศทางเดียวจนเกิดฟองอากาศเป็นสารสีขาวขึ้นๆ
2. ทำการไล่ฟองอากาศในโถดูดความชื้น โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ 30-45 นาที ซึ่งในช่วงนี้การเปิดให้อากาศเข้าไปในโถดูดความชื้นเป็นระยะ จะช่วยให้การไล่ฟองอากาศเร็วขึ้น
3. นำแม่พิมพ์วางบนจานเพาะเชื้อ แล้วทำการเทสารผสม PDMS ที่ไล่แก๊สแล้วลงในจานเพาะเชื้อโดยการเท หากทำการผสม PDMS มากกว่าหนึ่งถ้วย ให้เลือกเทเฉพาะถ้วย อย่าทำการผสมเพราะอัตราส่วนของสารผสม PDMS จะไม่เท่ากัน โดยการเทให้เทรินต่ำที่ด้านนอกของแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองอากาศ (หากมีฟองอากาศให้ใช้ไม้ปลายแหลมขนาดเล็ก เขี่ยฟองอากาศให้ออกจากบริเวณแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์)
4. นำชิ้นงานที่เตรียมไว้ไปวางบน Hot Plate ที่ปัดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ที่ไว้ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 48 ชม.
5. ทำการตัดชิ้นงานที่ต้องการแล้วทำการลอกออกจากแม่พิมพ์
6. นำชิ้นงานออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยใส่ในภาชนะปิดที่บรรจุสารดูดความชื้น



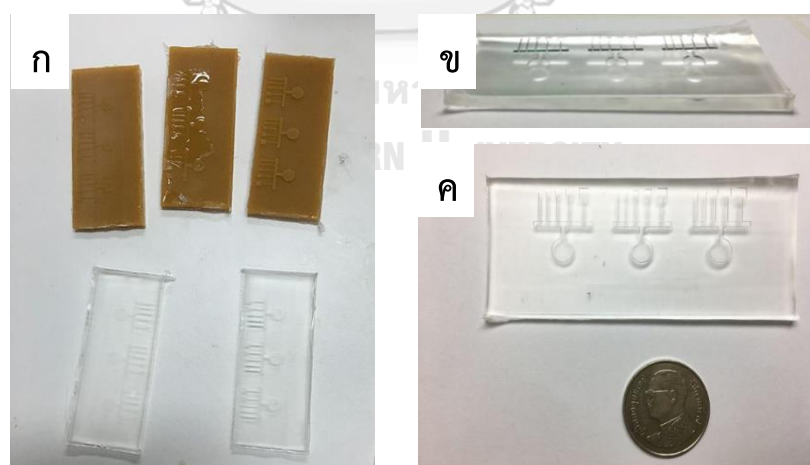
รูปที่ 3.5 กระบวนการผลิตชั้นควบคุมด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography)

3.3.2 การพัฒนาแม่พิมพ์

การหล่อชิ้นงานด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) เป็นการเทโพลีเมอร์ลงบนแม่พิมพ์ เพื่อหล่อชิ้นงานโดยหลังจากที่ชิ้นงานแข็งตัวแล้ว จึงทำการลอกชิ้นงานออก ซึ่งวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) เป็นวิธีที่นิยมในการหล่อชิ้นงานสำหรับการสร้างชิพของไหลจุลภาค โดยคุณภาพของชิ้นงานจะขึ้นกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดีจะช่วยให้การสร้างชิ้นควบคุมหรือชิ้นของไหลเป็นไปได้อย่างราบรื่น ซึ่งแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่ทำการสร้างเพื่อใช้ในการทดสอบนี้เป็นแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ประเภทสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งจะมีอยู่ทั้งหมด 5 ขนาด คือ ขนาด 500 ,1000 ,1500 ,2000 และ 2500 μm ตามลำดับ

(1) แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1

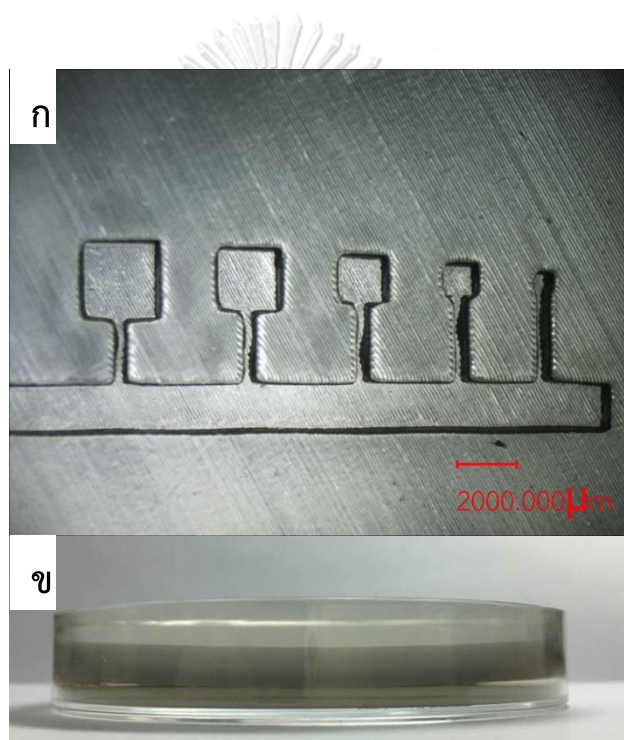
แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1 นี้ออกแบบโดยการสร้างชุดทดลองแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ สามชุดภายในแม่พิมพ์ตัวเดียวกัน ซึ่งในการหล่อชิ้นงานแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1 พบปัญหาที่สำคัญ 4 ประการคือ (1) ความหนาในการเท PDMS ซึ่งหากทำการเทความหนาที่น้อยเกินไปจะทำให้ไม่สามารถลอกชิ้นออกมาได้ดังรูปที่ 3.6ก (2) ความหนาของชั้นควบคุมไม่เท่ากันเนื่องจากเตาร้อนไม่ได้รับขนาด (3) การตัดชิ้นงานทำให้เกิดขอบของผิวงาน ทำให้เวลาประสานทำได้ยากดังรูปที่ 3.6ข (4) การวางตำแหน่งชุดทดลองแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ใกล้ขอบมากเกินไปและมีพื้นที่เปล่าสำหรับการเชื่อมประสานน้อยรูปที่ 3.6ค



รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1 และชิ้นงานที่ได้

(2) แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2

การแก้ปัญหาที่เกิดจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1 ทำการแก้ไขโดยการสร้างของชิ้นงานที่มีความหนา 2 มม. รอบชิ้นงาน โดยการคงความหนาของชิ้นงานที่ 5 มม. และลดชุดทดลองแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เหลือเพียงชุดเดียว ซึ่งจากการหล่อชิ้นงานพบปัญหาสำคัญ 2 ประการ คือ (1) ความเรียบผิวของชิ้นงานไม่เรียบทำให้การประสานชิ้นงานไม่ดี รูปที่ 3.7ก (2) การใช้อุณหภูมิที่สูงทำให้เรซินอ่อนตัวลงไป เกิดการโก่งเมื่อทำการหล่อชิ้นงานจะได้ชิ้นควบคุมที่ผิวโก่ง ทำให้การประสานกับฟิล์มบางทำได้ยาก เนื่องจากพื้นที่สัมผัสน้อยลง รูปที่ 3.7ข ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2 เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว



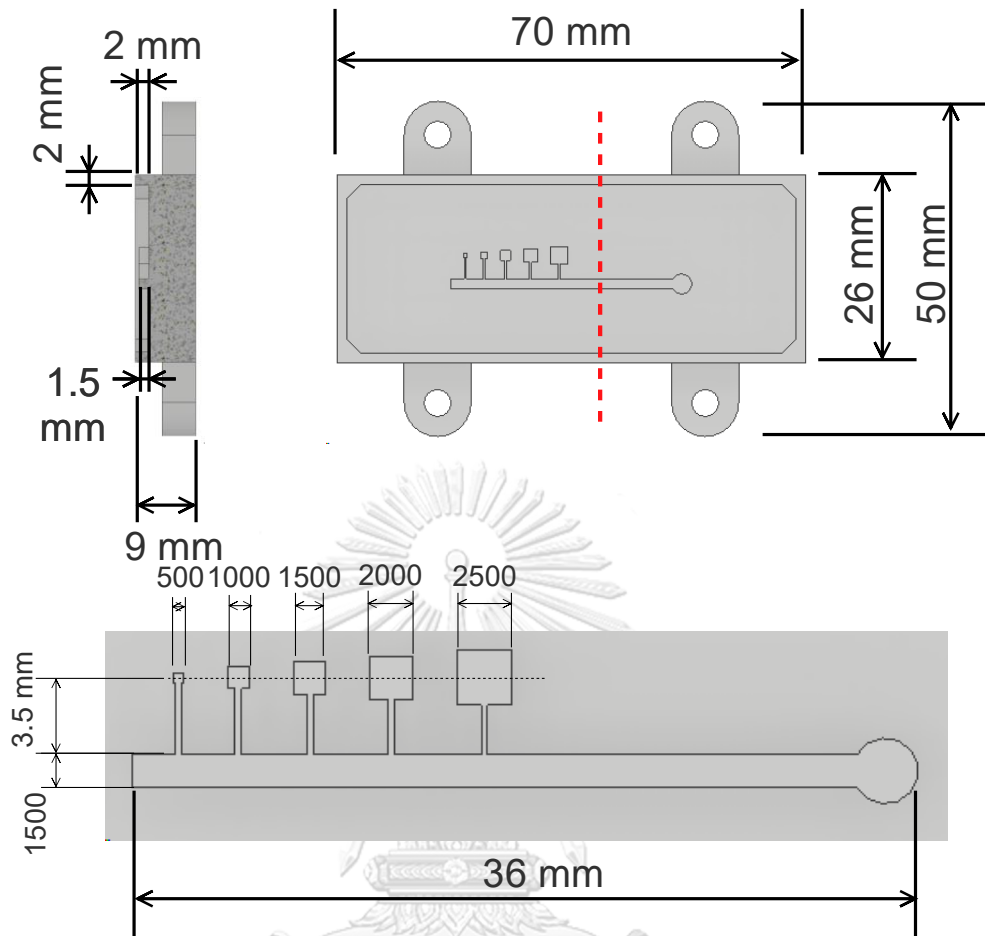
รูปที่ 3.7 (ก) ชิ้นงานชิ้นควบคุมหลังลอกออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งเห็นความหยวบผิวได้ด้วยตาเปล่า (ข) ชิ้นงานที่หล่อด้วยแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2 ซึ่งเกิดการโก่งตัวของแม่พิมพ์

(3) แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3

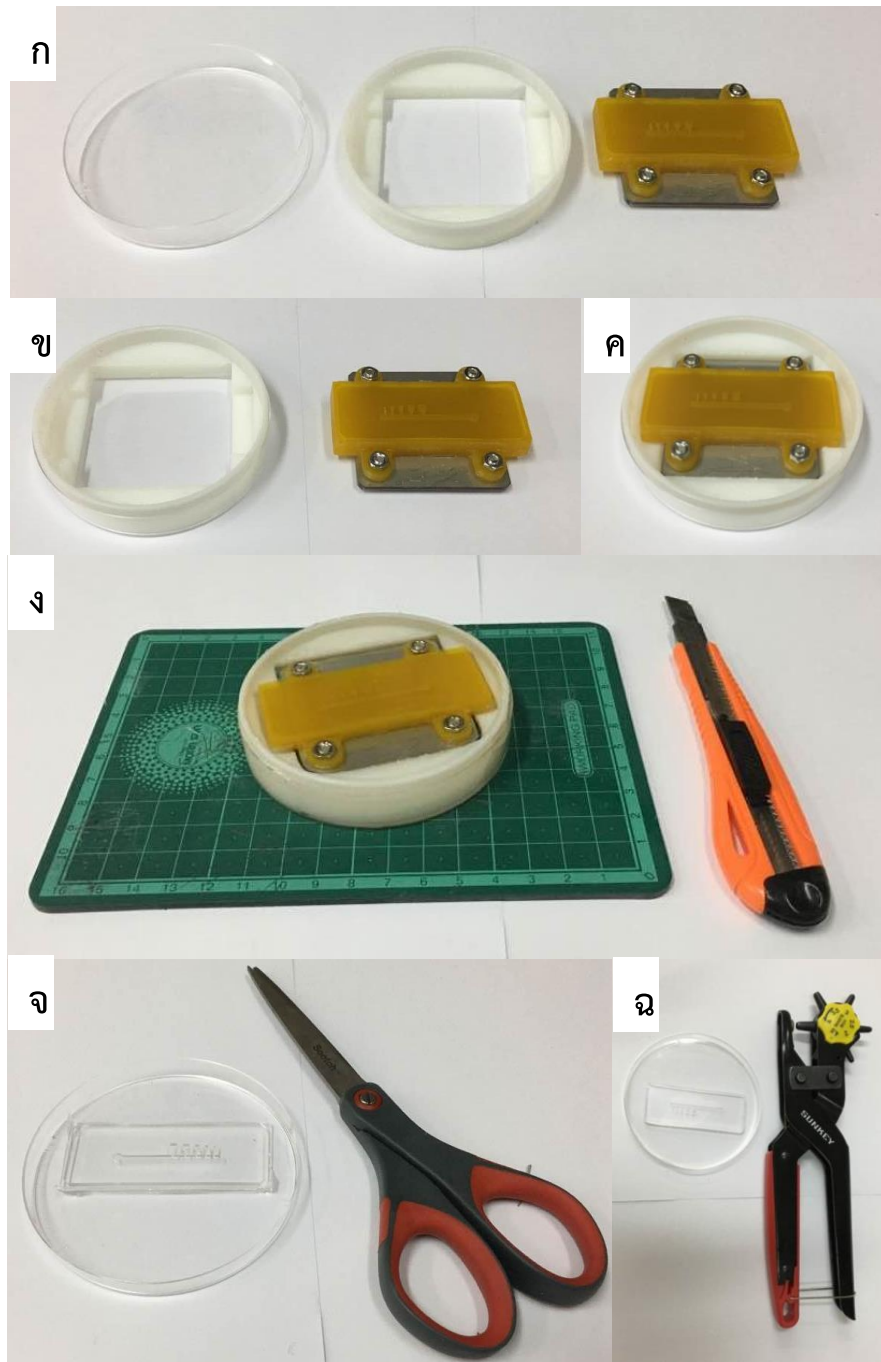
การให้ความร้อนแม่พิมพ์ในกระบวนการหล่อชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัว การใช้อุณหภูมิที่สูงเกินค่าอุณหภูมิการโก่งตัว (*Heat Deflection temperature, HDT*) ทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งที่มากขึ้น การแก้ไขจะต้องทำ 2 อย่าง เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว คือ การใช้อุณหภูมิของเตาร้อนในระหว่างรอชิ้นงานแข็งตัวให้ไม่สูงเกินค่าอุณหภูมิการโก่งตัว และการใช้แผ่นสแตนเลสร่วมกับสกรูและน็อตในการยึดให้แม่พิมพ์ตรึงกับแผ่นสแตนเลสเพื่อลดการโก่งของชิ้นงานหล่อ

แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 ได้ทำการแก้ไขใหม่โดยการปรับตัวแม่พิมพ์ให้มีความหนาขึ้น (รูปที่ 3.8) โดยการปรับรูปแบบการวางชิ้นงานบนโปรแกรมของเครื่องพิมพ์สามมิติ ให้ผิวชิ้นงานที่ใช้งานถูกสร้างด้วยความละเอียดจากแกน z ทำให้ความหนาผิวของชิ้นงานมีค่าที่น้อยลง ซึ่งได้ผิวงานที่เรียบขึ้น แต่เนื่องจากการใช้ซ้ำหลายรอบทำให้แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 เกิดการโก่ง จึงจำเป็นต้องหาอุปกรณ์ยึดจับเพื่อลดการโก่งซึ่งจะส่งผลเสียต่อการประสานชิ้นงานเข้ากับฟิล์มบางได้

อุปกรณ์ยึดจับแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 จะใช้แผ่นสแตนเลสร่วมกับสกรูและน็อตในการยึดให้แม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 ตรงกับแผ่นสแตนเลสเพื่อลดการโก่งของชิ้นงานหล่อ โดยอุปกรณ์ที่เตรียมสำหรับการสร้างแม่พิมพ์สำหรับงานหล่อชิ้นงานด้วยซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี(Soft Lithography) มี 3 ส่วน คือ งานเพาะเชื้อ ชิ้นงานพิมพ์สามมิติ และแม่พิมพ์ที่ถูกตรึงกับแผ่นสแตนเลสเพื่อลดการโก่ง (รูปที่ 3.9ก) ให้นำชิ้นงานพิมพ์สามมิติใส่ลงในงานเพาะเชื้อเนื่องจากขอบบนของแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 สูงเลยขอบงานเพาะเชื้อ จึงจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์เพื่อป้องกัน PDMS ไหลออกจากงานเพาะเชื้อ (รูปที่ 3.9ข) ก่อนจะนำแม่พิมพ์ที่ถูกตรึงกับแผ่นสแตนเลสใส่เป็นลำดับถัดมา (รูปที่ 3.9ค) การลอกชิ้นงานออกมาหลังจากชิ้นงานแข็งตัวแล้ว ทำได้โดยการใช้คัตเตอร์กรีดบริเวณขอบของแม่พิมพ์ (รูปที่ 3.9ง) แล้วทำการลอกออกจากแม่พิมพ์ซึ่งจะมีเศษ PDMSบริเวณขอบชิ้นงานที่ลอกออกมา ให้ใช้กรรไกรตัดเศษ PDMS ที่ไม่ได้ใช้งาน (รูปที่ 3.9จ) และทำการเจาะรูบริเวณตำแหน่งเชื่อมต่อท่อลม (รูปที่ 3.9ฉ) เพื่อระบายอากาศจากการอบชิ้นงานหลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีประจุโคโรน่า



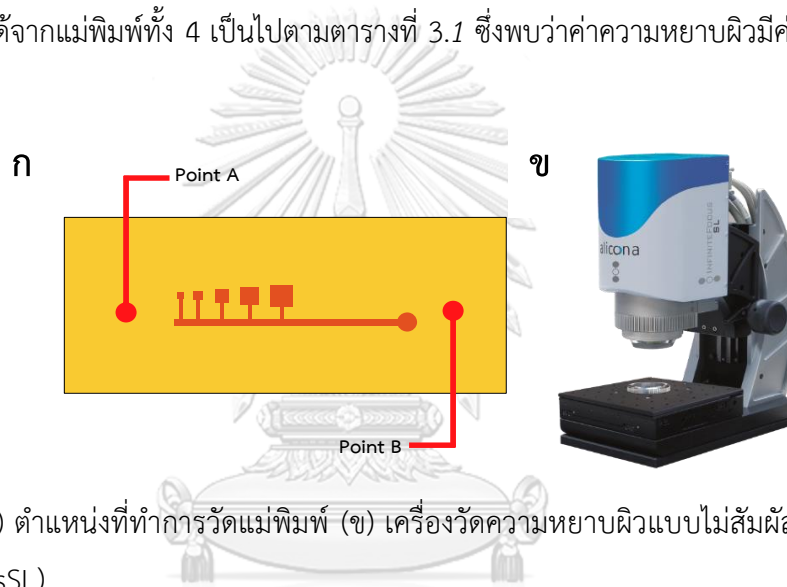
รูปที่ 3.8 แบบของแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3



รูปที่ 3.9 (ก) อุปกรณ์สำหรับแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 (ข) การวางชิ้นงานสามมิติลงในจานเพาะเชื้อเพื่อป้องกัน PDMS ไหล (ค) การวางแม่พิมพ์ลงบนภาชนะที่เตรียมไว้ (ง) ชิ้นงานที่จะทำการตัดและลอกชิ้นงานออกด้วยคัตเตอร์ (จ) การตัดเศษ PDMS ออกด้วยกรรไกร (ฉ) การเจาะรูก่อนการนำไปประสานชิ้นงาน

3.3.3 การวัดความหยาบผิวของแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3

การวัดความหยาบผิวแบบแม่พิมพ์ เพื่อตรวจสอบความหยาบผิวที่วัดค่าได้มีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานโดยทำการวัดแม่พิมพ์ที่ 2 ตำแหน่ง จุดละ 3 ครั้ง (รูปที่ 3.10) โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicon- InfiniteFocusSL) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสในระยะสามมิติ โดยใช้หลักการการปรับค่าระยะโฟกัส (Focus Variation) ซึ่งสามารถใช้วัดความหยาบผิวชิ้นงานได้โดยที่ไม่ทำลายสภาพผิว ไม่ต้องเปลืองวัสดุ อุปกรณ์ในการบำรุงรักษา และยังหลีกเลี่ยงปัญหาจากข้อจำกัดการวัด เช่น smoothing effect [94] โดยเครื่องมือนี้ตั้งอยู่ที่ศูนย์ทันตวัสดุศาสตร์ ที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค่าจากการวัดที่ได้จากแม่พิมพ์ทั้ง 4 เป็นไปตามตารางที่ 3.1 ซึ่งพบว่าค่าความหยาบผิวมีค่าที่น้อยมาก



รูปที่ 3.10 (ก) ตำแหน่งที่ทำการวัดแม่พิมพ์ (ข) เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicon- InfiniteFocusSL)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดความหยาบผิวของแม่พิมพ์

	Ra* (μm)	Rq* (μm)	Rz* (μm)
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 1 จุด A	3.6	6.4	37.4
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 1 จุด B	5.8	9.2	52.9
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 2 จุด A	0.5	1.1	9.3
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 2 จุด B	0.3	0.5	2.8
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 3 จุด A	2.9	4.2	32.7
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 3 จุด B	5.4	9.2	53.6
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 4 จุด A	1.0	2.5	16.8
แม่พิมพ์ชิ้นที่ 4 จุด B	1.4	3.2	23.4

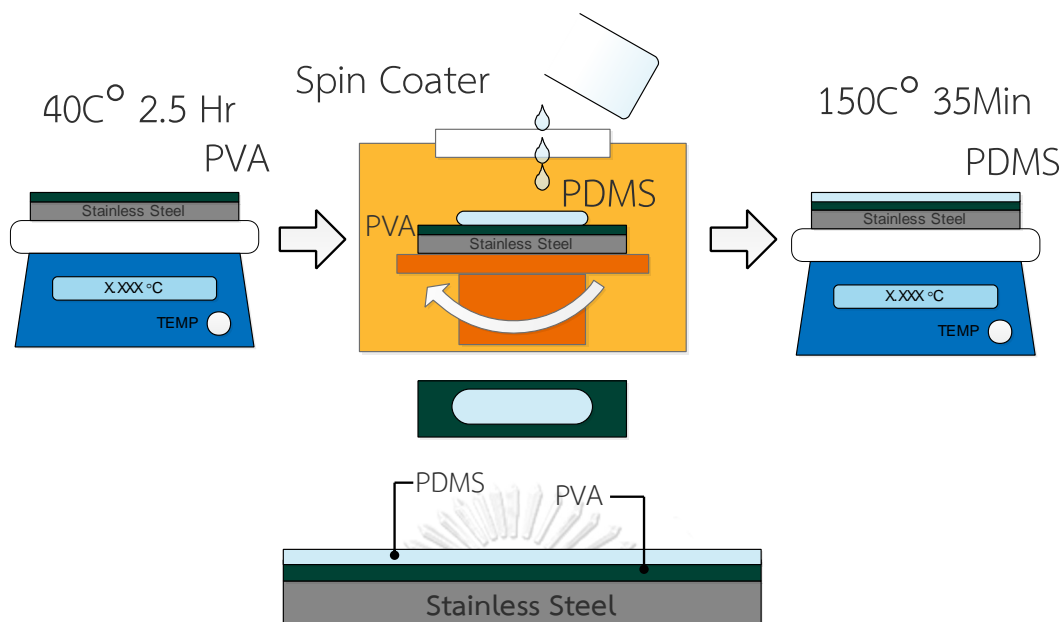
* เทคนิคการวัดค่าด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิวและผลทดสอบสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก

3.4 การสร้างชั้นสังเวยและฟิล์มบาง

การสร้างฟิล์มบางบนชั้นสังเวยจะช่วยให้สามารถสร้างฟิล์มบางที่สามารถนำไปประสานชั้นงานกับชั้นควบคุมได้อย่างดี โดยเทคนิคการสร้างนี้เรียกว่า เทคนิคการสร้างฟิล์มบางโดยวิธีการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวย โดยชั้นสังเวยที่นำมาใช้คือ สารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol-PVA) ซึ่งมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 100-120 °C และไม่เป็นพิษ

3.4.1 กระบวนการสร้างชั้นสังเวยและฟิล์มบาง

1. แผ่นให้ขัดกระดาษทรายทั้ง 2 ด้านให้เรียบ
2. ทำการผสม PDMS ในส่วนของ Monomer : Curing Agent ในอัตราส่วน 10:1 ในแก้วพลาสติกแล้วทำการคนให้เท่ากันด้วยอุปกรณ์ที่เป็นแผ่นยาวสำหรับใช้แล้วทิ้ง เช่น มีดพลาสติก ไม้ไอศกรีม เป็นต้น ซึ่งการคนให้คนไปในทิศทางเดียวจนเกิดฟองอากาศเป็นสารสีขาวขึ้นๆ
3. ทำการไล่ฟองอากาศในโถดูดความชื้น โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ 30-45 นาที ซึ่งในช่วงนี้การเปิดให้อากาศเข้าไปในโถดูดความชื้นเป็นระยะ จะช่วยให้การไล่ฟองอากาศเร็วขึ้น
4. ให้ทำความสะอาดแผ่นสแตนเลสด้วย DI water และ IPA ก่อนเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วชุบด้วย PVA จากนั้นนำแผ่นสแตนเลสที่ชุบ PVA แล้วไปตั้งบนเตาร้อนที่ปูด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ที่ไว้ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลาประมาณ 2.5 ชม. จนแห้ง (รูปที่ 3.11)
5. ทำการปลูกฟิล์มบาง PDMS ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มแบบปั่นเหวี่ยง (Spin Coater -CHEMAT KW-4A) ด้วยการกำหนดค่า 2 ขั้นตอน คือ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาทีสำหรับชั้นที่ 1 และ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที สำหรับชั้นที่ 2 โดยการเปิดตัวสุญญากาศสำหรับยึดแผ่นสแตนเลส ก่อนจะเท PDMS ด้วยถ้วยพลาสติกหรือใช้กระบอกฉีดยาขนาด 3 ml ดูด PDMS มาเทในแนวยาวเพื่อให้ PDMS กระจายไปทั่วแผ่นสแตนเลสเวลาปั่นเหวี่ยงชั้นงาน (รูปที่ 3.11)
6. นำชั้นงานที่ปลูกฟิล์มแล้ววางที่ บนเตาร้อน (IKA®C-MAG HP 7) ที่ปูด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ อุณหภูมิ 150°C รอประมาณ 35 นาที (รูปที่ 3.11)
7. ทำการเก็บชั้นงานอย่างมิดชิด โดยทำการเก็บไว้ในภาชนะปิดบรรจุสารดูดความชื้น

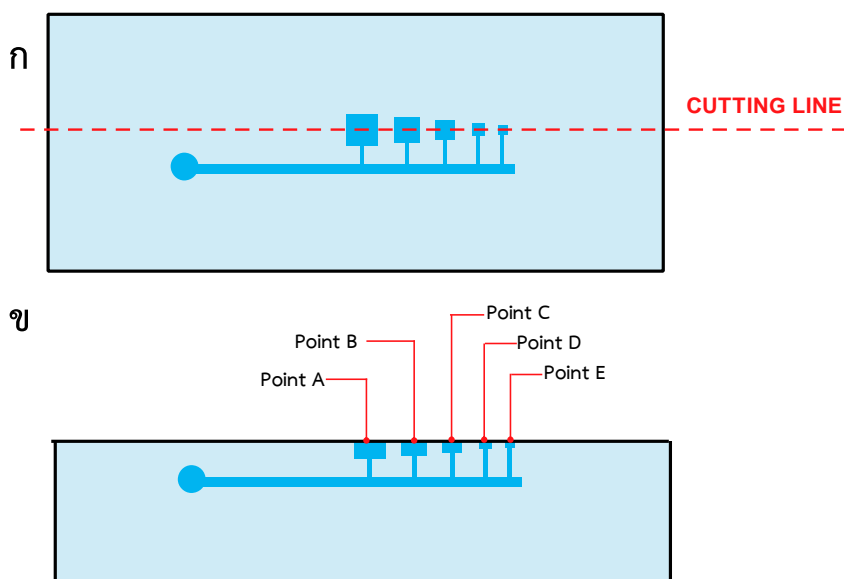


รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบาง

3.4.2 การวัดผลของความหนาจากการสร้างฟิล์มบาง

ความหนาของฟิล์มบางที่จะนำไปใช้ในการประสาน มีผลต่อระยะกระดกตัวของฟิล์มบางโดยตรง ดังนั้นการตรวจสอบความหนาของฟิล์มบาง เพื่อให้การทำนายค่าระยะกระดกตัวถูกต้องมากขึ้น ทำได้โดยการตัดชิ้นงานที่ทำการประสานชิ้นงานออกแล้ว เพื่อให้ง่ายต่อการวัดขนาดความหนาของฟิล์มบาง การวัดความหนาจะเป็นการวัดในมิติเรขาคณิต ดังนั้นการใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ โดยทำการสอบเทียบค่ากับวัตถุที่ทราบค่ามิติเรขาคณิต

การวัดฟิล์มบาง จะเป็นการพิสูจน์ว่า ลักษณะของฟิล์มบางตลอดช่วงความยาวชิ้นงานที่เกิดจากเทคนิคการสร้างฟิล์มบางโดยวิธีการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเว โดยการวัดฟิล์มบางช่วงแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งเป็นจุดที่ง่ายต่อการวัดความหนามากที่สุด ซึ่งจำเป็นต้องตัดชิ้นงานชั้นควบคุมที่ประสานติดกับฟิล์มบางที่แนวกึ่งกลางของชุดแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ รูปที่ 3.12ก และทำการวัดความหนาฟิล์มบางที่แอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ทั้ง 5 ขนาด ดังรูปที่ 3.12 ข



รูปที่ 3.12 (ก) ตำแหน่งที่ตัดชิ้นงานออกสำหรับการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
(ข) ตำแหน่งที่ทำการวัดความหนาของฟิล์มบาง

ค่าความหนาของฟิล์มบางที่ทำการวัดได้นี้ จะเป็นกรณีการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวทย์ที่ทำจาก PVA ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์การปั่นเหวี่ยงแบบ 2 จังหวะ (จังหวะที่ 1 ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และจังหวะที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที) เท่านั้น โดยค่าความหนาที่ได้จากการใช้ค่าพารามิเตอร์นี้จะเป็นดังตารางที่ 3.2 โดยข้อมูลการวัดความหนาฟิล์มบางสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าความหนาของฟิล์มบางจากการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวทย์ที่ทำจาก PVA ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์การปั่นเหวี่ยงแบบ 2 จังหวะ

	ความหนาฟิล์มบาง (μm)					ความหนาเฉลี่ย
	ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D	ตำแหน่ง E	
ชิ้นงานที่ 1	100	92	108	103	100	101
ชิ้นงานที่ 2	100	103	98	105	106	102
ชิ้นงานที่ 3	95	104	107	103	89	100
ชิ้นงานที่ 4	99	101	96	101	101	100
ชิ้นงานที่ 5	99	101	99	97	108	101
ความหนาเฉลี่ยรวม 5 ชิ้นงาน						101

3.4.3 ปัญหาที่พบในการสร้างชั้นสังเวและฟิล์มบางและแนวทางแก้ไข

ปัญหาที่มักพบในการสร้างฟิล์มบางและชั้นสังเว คือ แผ่นสแตนเลสหลุดออกจากเครื่องปั่นเหวี่ยงระหว่างการปั่นเหวี่ยงมีสาเหตุจาก ความเร็วรอบในขณะที่ปั่นสูงเกินไป และผิวแทนวางแผ่นสแตนเลสไม่สะอาด

กรณีความเร็วรอบสูงทำการลดความเร็วในขั้นตอนที่ 2 จาก 1500 rpm เหลือ 1000 rpm และกรณีผิวแทนวางแผ่นสแตนเลสไม่สะอาด ให้เช็ดด้วย IPA ทุกครั้งหลังจากการปั่นเหวี่ยงด้วย PDMS ในกรณีที่ต้องการควบคุมไม่ให้ใช้ PDMS ในการสร้างฟิล์มบางมากเกินไปเพื่อลดการหกเลอะเทอะ การใช้กระบอกฉีดยาขนาด 3 มิลลิลิตร จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

3.5 การเชื่อมประสานชิ้นงานและการล้างชั้นสังเว

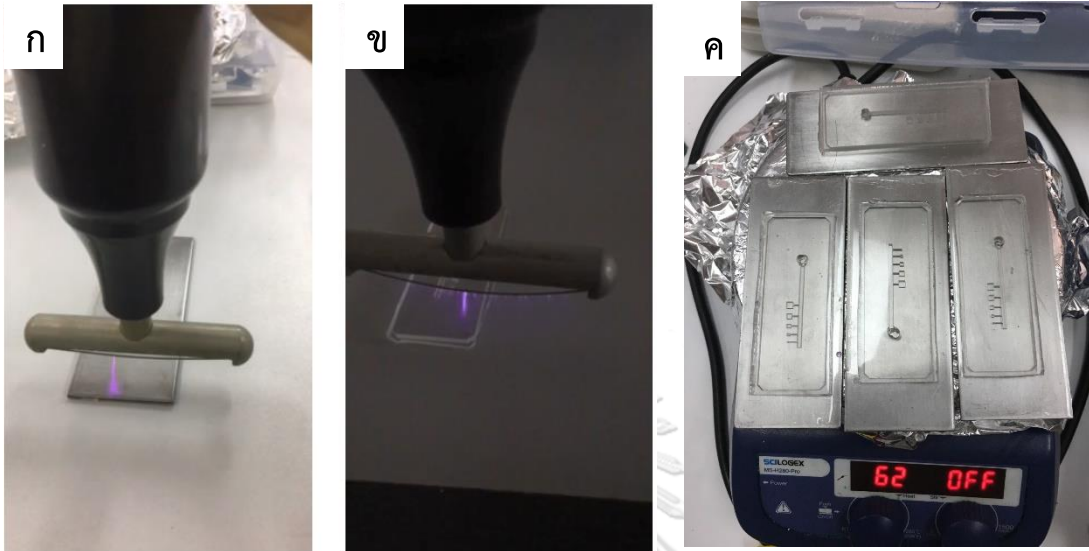
การเชื่อมประสานชิ้นงานและการล้างชั้นสังเวเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมที่สร้างชิ้นงานด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) และฟิล์มบางบนชั้นสังเวที่สร้างด้วยเทคนิคการสร้างฟิล์มบางโดยวิธีการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเว โดยหลังจากที่สร้างชิ้นงานแล้วจำเป็นต้องทำการประสานชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น เข้าด้วยกันก่อนแล้วทำการล้างชั้นสังเวออกในภายหลัง ทั้งนี้เป็นเพราะตัวฟิล์มบางไม่ใช่วัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ไม่สามารถอยู่ในลักษณะแผ่นแข็งเพื่อทำการประสานได้โดยตรง

3.5.1 กระบวนการประสานชิ้นงาน

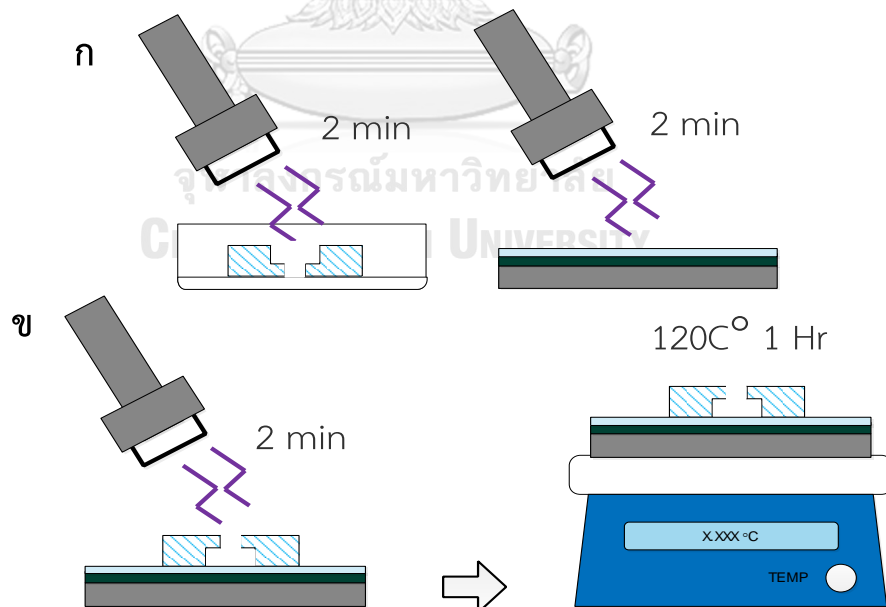
กระบวนการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า มีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดผิวของชิ้นงานด้วยเอทานอลและเป่าให้แห้ง โดยชิ้นงานชั้นควบคุมจำเป็นต้องเจาะรูระบายอากาศ เพราะเวลาอบชิ้นงานบนเตาร้อนหลังจากการประสาน ไอน้ำที่อยู่ในช่องทางไหลจุลภาคจะดันให้ฟิล์มบางเกิดการรื้อได้
2. ใช้เครื่องคายประจุโคโรน่า (BD-20 - ETP) ทำการให้ประจุโคโรน่ากับชิ้นงานด้านที่ต้องการนำมาเชื่อมประสาน โดยทำการให้ประจุโคโรน่าในชั้นควบคุมเป็นเวลา 2 นาที (รูปที่ 3.13ก) และฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวเป็นเวลา 2 นาที (รูปที่ 3.13ข) ดังรูปที่ 3.14
3. นำชิ้นงานทั้ง 2 มาประกบเข้าด้วยกัน โดยให้ด้านที่ให้ประจุโคโรน่าหันเข้าหากัน โดยค่อยๆ กดไล่จากด้านข้างไปจนหมดชิ้นงาน ซึ่งจะต้องไล่ฟองอากาศที่เกิดจากแนบสนิทกับผิวชิ้นงานไม่ดีให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.14ข

4. นำชิ้นงานที่ประสานเสร็จแล้ววางบนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชม. (รูปที่ 3.13 ค) เพื่อให้การเชื่อมประสานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรูปที่ 3.14 ข
- 5.



รูปที่ 3.13 (ก) การให้ประจุโคโรนาที่ฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวยเป็นเวลา 2 นาที (ข) การให้ประจุโคโรนาที่ชั้นควบคุมเป็นเวลา 2 นาที (ค) ชิ้นงานที่ได้หลังประสานชิ้นงานวางบนเตาร้อนเพื่อให้การประสานมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



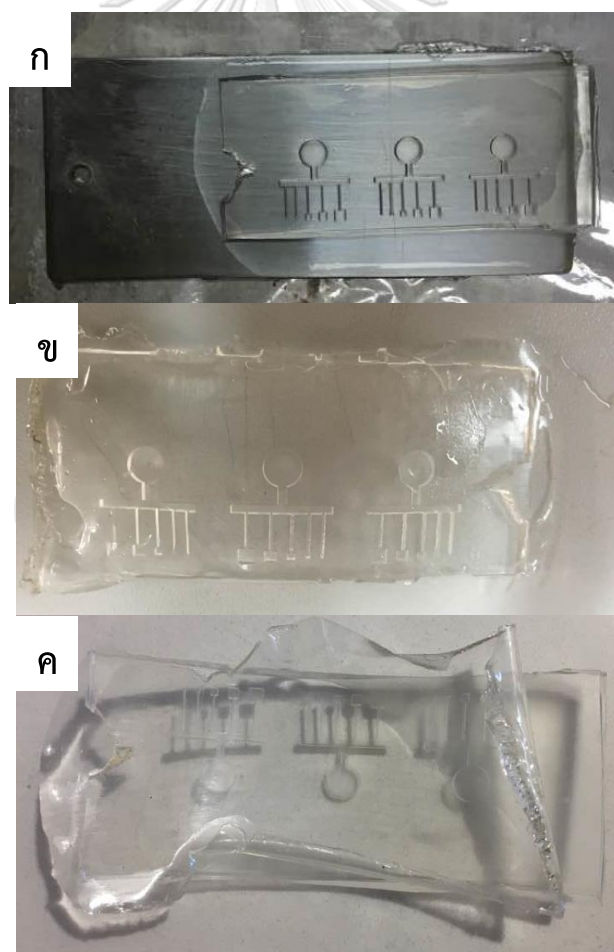
รูปที่ 3.14 (ก) การให้ประจุโคโรนาที่ชั้นควบคุมและฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวยขึ้นละ 2 นาที (ข) การประสานชิ้นงานทั้ง 2 ชั้น เข้าด้วยกันและทำการให้ประจุโคโรนาที่ขอบชิ้นงานก่อนทำการตั้งบนเตาร้อนเพื่อให้การประสานดีขึ้น

3.5.2 ผลการประสานชั้นงาน

(1) ผลการประสานฟิล์มบางกับชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 1

การประสานชั้นงานระหว่างชั้นควบคุมและฟิล์มบางสามารถทำได้ พบว่าตำแหน่งของชุดแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์ใกล้ขอบชั้นงานเกินไป (รูปที่ 3.15ก) จำเป็นต้องทำการย้ายตำแหน่งแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์โดยการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่

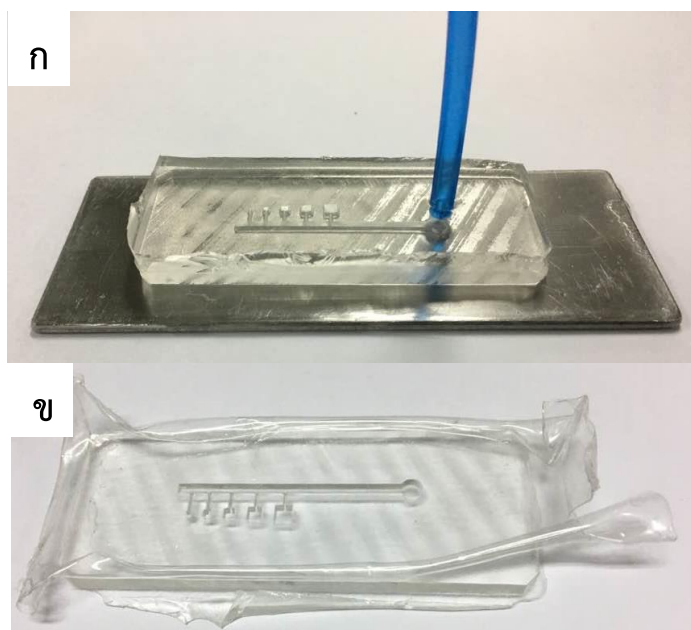
การล้างชั้นสังเวและลอกออกพบว่า วิธีการดังกล่าวสามารถประสานชั้นงานชั้นสังเวและชั้นควบคุมเข้าด้วยกันได้ (รูปที่ 3.15ข) แต่เมื่อทิ้งชั้นงานไว้ฟิล์มบางที่มีแรงดึงสูง จะดึงชั้นงานให้เกิดการงอ (รูปที่ 3.15ค) ซึ่งเกิดจากชั้นฟิล์มบางที่มีความหนา 500 ไมครอน ดังนั้นในการแก้ปัญหานี้ต้องลดความหนาของฟิล์มบางลงและหาแผ่นกระจกสไลด์มาเชื่อมประสานชั้นงานเพื่อลดรับแรงที่เกิดจากแรงดึงของฟิล์มบาง และต้องปรับค่าพารามิเตอร์การปั่นเหวี่ยง PDMS ใหม่



รูปที่ 3.15 ชั้นควบคุมที่ประสานเข้ากับฟิล์มบาง เมื่อทำการล้างชั้นงานออก เมื่อปล่อยชั้นงานทิ้งไว้ ฟิล์มบางจะดึงให้ชั้นงานโก่งงอ

(2) ผลการประสานฟิล์มบางกับชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2

การประสานชั้นงานฟิล์มบางกับชั้นควบคุมจากการหล่อแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 2 เกิดปัญหาที่สำคัญ คือ ความหยาบผิวของชั้นควบคุมด้านที่จะทำการประสานซึ่งส่งผลให้มีช่องว่างที่อากาศสามารถแทรกตัวอยู่ได้ รูปที่ 3.16ก และความหนาตามแนวยาวของชั้นงานชั้นควบคุมมีความหนาไม่เท่ากัน ทำให้บริเวณขอบชั้นงานประสานฟิล์มบางได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเชื่อมประสานทำไม่ได้ดี ดังรูปที่ 3.16ข

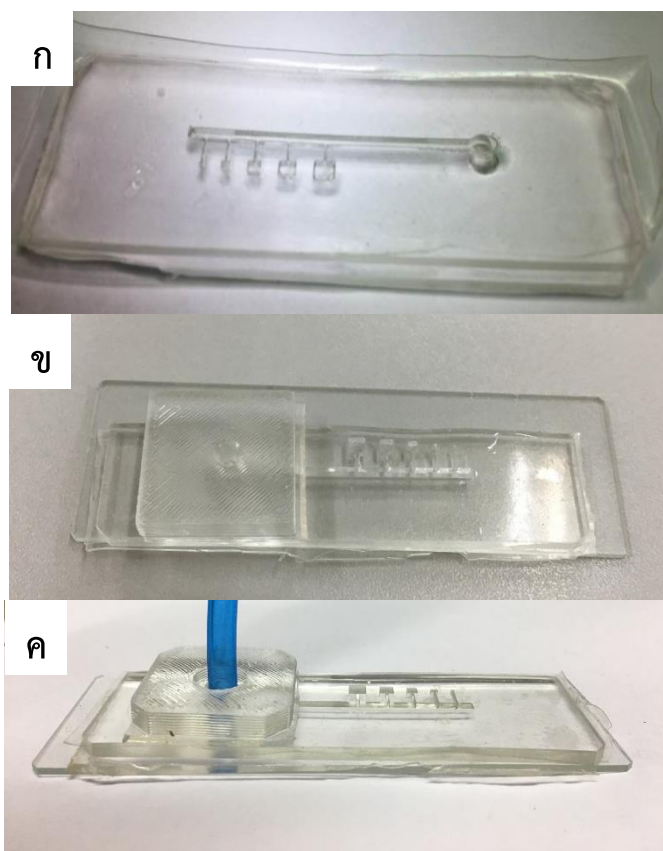


รูปที่ 3.16 (ก) การประสานชั้นควบคุมที่มีความหยาบผิวกับฟิล์มบาง ซึ่งมีช่องว่างใต้ฟิล์มบางอย่างชัดเจน (ข) ความหนาของชั้นงานไม่เท่ากันทำให้การประสานฟิล์มบางที่ขอบทำได้ยาก

CHULALONGKORN UNIVERSITY

(3) ผลการประสานฟิล์มบางกับชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3

การประสานชั้นงานฟิล์มบางกับชั้นควบคุมจากการหล่อแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 สามารถประสานได้เป็นอย่างดี (**มิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิงก**) ซึ่งชั้นงานชั้นควบคุมที่ประสานกับฟิล์มบางที่กำจัดชั้นสังเวทออกไปแล้ว สามารถนำไปประสานกับกระจกสไลด์และพอร์ตเชื่อมต่อลมได้ด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า (**มิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิงข**) โดยพอร์ตเชื่อมต่อลมให้ทำการเจาะรูเพื่อต่อท่อก่อนนำไปประสานชั้นงาน เพื่อใช้ในการต่อท่อลมเข้ามาในชิพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่ายเพื่อวัดระยะกระดกต่อไปดัง**มิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิงค**



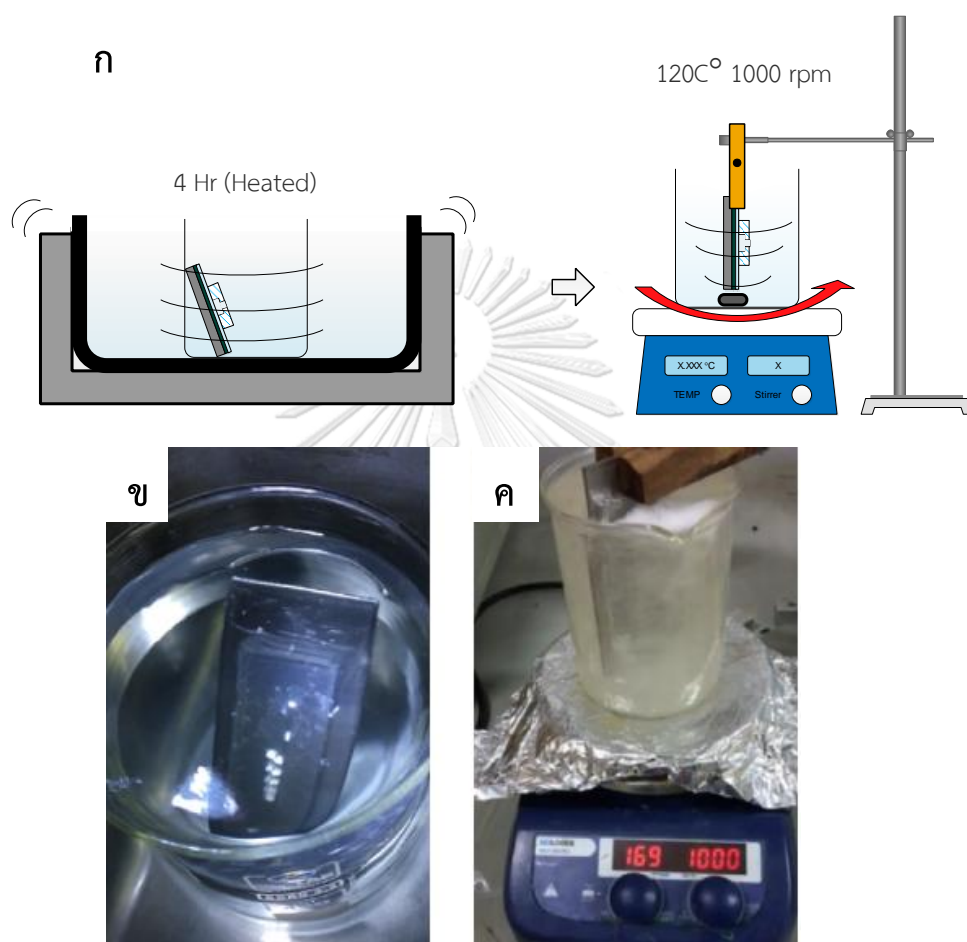
รูปที่ 3.17 (ก) ชิ้นงานหลังการประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 กับฟิล์มบาง (ข) ชิ้นงานหลังการประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมจากแม่พิมพ์ต้นแบบที่ 3 กับฟิล์มบางมาประสานกับกระจกสไลด์และพอร์ตเชื่อมต่อ (ค) ชิพสำหรับการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์อย่างง่ายที่ต่อกับท่อลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

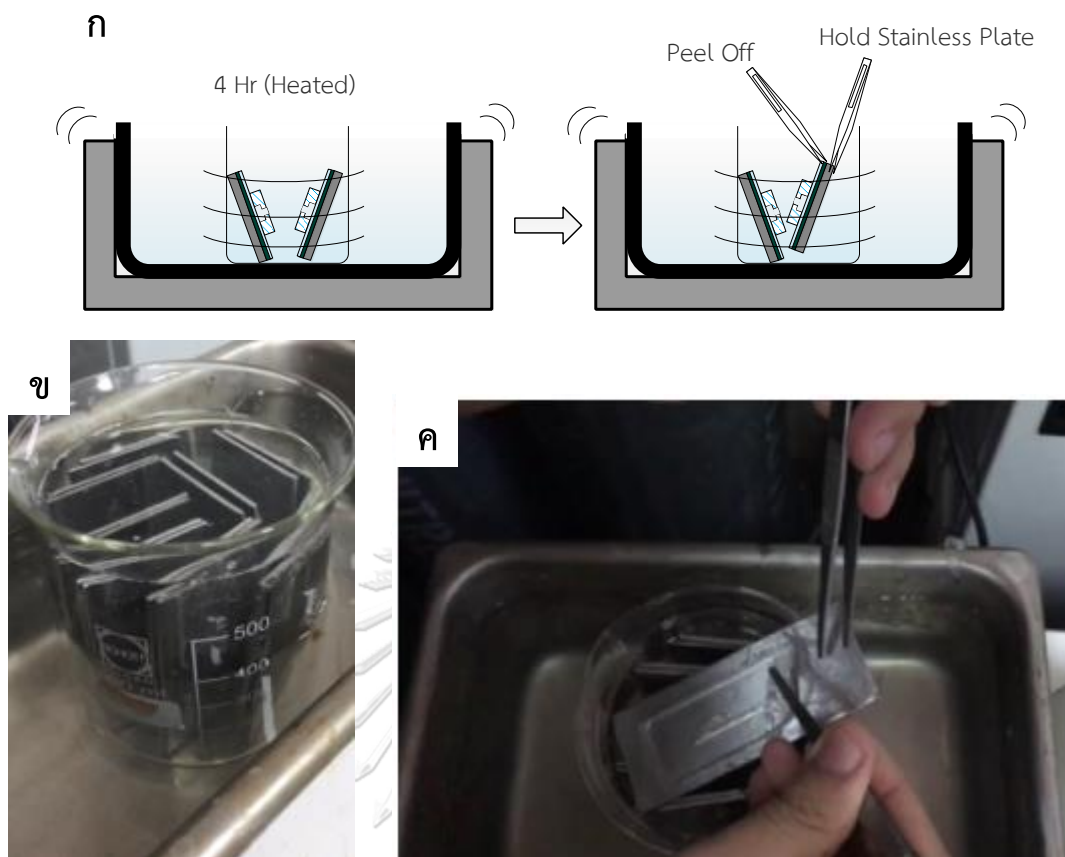
3.5.3 การล้างชั้นสังเวย

กระบวนการล้างชั้นสังเวยจะทำหลังจากการประสานชั้นควบคุมและฟิล์มบางเข้าด้วยกันด้วยวิธีคายประจุโคโรน่าเรียบร้อยแล้ว โดยทำการชุบ PDMS กับ PVA ที่ขอบแผ่นสแตนเลสก่อนไปล้างชิ้นงานด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 4 ชม. ก่อนที่จะทำการล้างออกด้วยการใช้เตาร้อนที่เปิด Stirrer โดยตั้งอุณหภูมิที่ 120°C และความเร็วรอบที่ 1000 rpm ในขั้นตอนการล้างบนเตาร้อนซึ่งพบว่าการใช้ความร้อนจากเตาร้อนทำให้ PVA หลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด จึงจำเป็นต้องใช้แรงภายนอกมาผลักดัน PVA ออกจากผิวชิ้นงาน วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำการล้างชั้นสังเวยได้ดี แต่ทำได้ทีละแผ่น (รูปที่ 3.18ก-ค)

การเปลี่ยนวิธีการล้างให้สามารถล้างชิ้นงานหลายชิ้นพร้อมกันได้ทำได้โดยการคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 4 ชม. ก่อนจะทำการลอกออกด้วยคีมจับ ดังนั้นจึงต้องค่อยๆ ลอกชิ้นงานภายใน DI water ที่เปิดให้ความร้อนและเปิดคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อให้ลอกออกมาได้ง่าย (รูปที่ 3.19ก-ค)



รูปที่ 3.18 (ก) การล้างชิ้นสังเวดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและเตาร้อนตามลำดับ (ข) การล้างชิ้นสังเวดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและลอกชิ้นงานด้วยคีมจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.19 (ก) การล้างชั้นสังเวทย์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิคและลอกชิ้นงานด้วยคีมจับชิ้นงาน (ข) การล้างชั้นสังเวทย์พร้อมกันได้หลายชิ้น (ค) การลอกชิ้นงานหลังการประสานออกโดยใช้คีมจับชิ้นงาน

3.6 สรุปกระบวนการผลิตชิ้นงาน

การสร้างแอกซ์เวเตอร์นิวมेटิกส์ด้วยการสร้างชิ้นงานจากกระบวนการซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) โดยใช้แม่พิมพ์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแสง UV ก้บการสร้างฟิล์มบาง โดยใช้เทคนิคชั้นสังเวทย์ก่อนนำไปเชื่อมประสานโดยวิธีการคายประจุโคโรน่า เป็นทางเลือกหนึ่งในการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วและทุกคนสามารถทำได้โดยง่าย แต่ด้วยข้อจำกัดของวัสดุ เช่น แม่พิมพ์ ที่เริ่มเสียรูปที่อุณหภูมิ 42°C ทำให้เวลาในการแข็งตัวใช้เวลานานเนื่องจากไม่สามารถใช้ อุณหภูมิที่สูงได้ อีกทั้งด้วยข้อจำกัดด้านความละเอียดในการสร้างชิ้นงานในระดับ 100 μm ทำให้ไม่สามารถสร้างช่องทางไหลจุลภาคที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีขนาดเล็กกว่าค่าความละเอียดได้

บทที่ 4

การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการวัดระยะกระดก

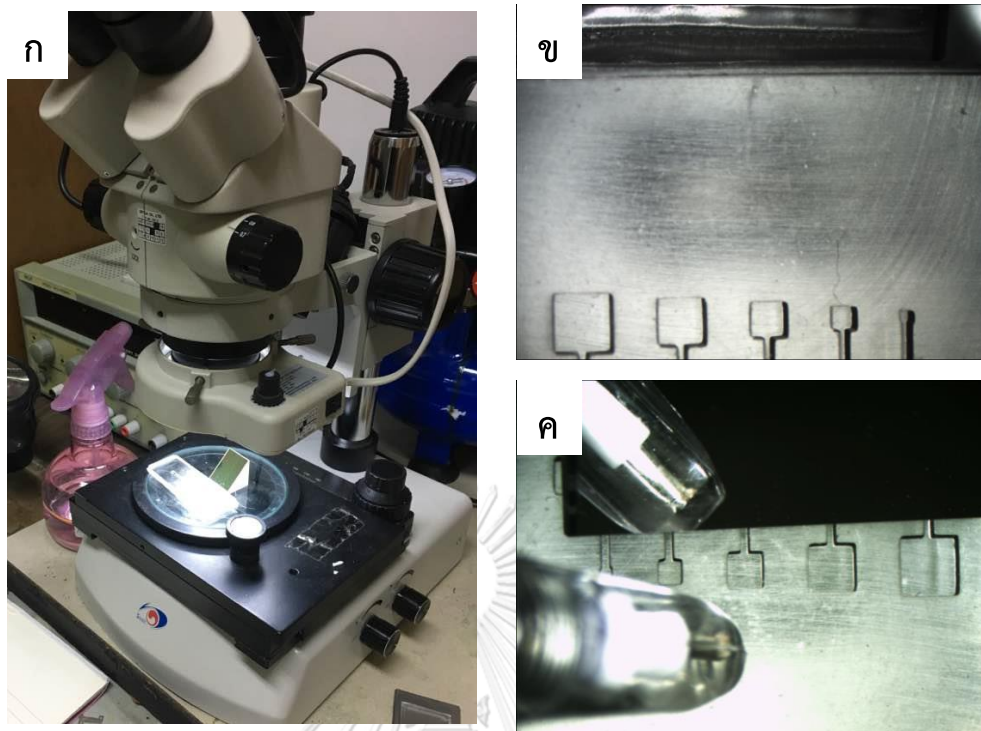
บทที่ 4 นี้จะมีส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน หลักๆ คือ การเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลองตั้งแต่ระบบนิวมติกส์ ระบบจ่ายไฟและการติดตั้งชิพสำหรับการทดสอบ การมและการสอบเทียบมิติเรขาคณิต โดยเทียบกับวัตถุที่ทราบค่า เพื่อใช้ในการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมติกส์

4.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

การวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมติกส์ จำเป็นต้องออกแบบรูปแบบการทดลองเพื่อลดปัญหาเนื่องจากค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการวัด โดยในหัวข้อนี้จะมีประเด็นสำคัญ 2 ประเด็น คือ การจับชิ้นงานไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการทดลอง และการออกแบบชุดทดลองเพื่อให้สามารถทดลองได้อย่างต่อเนื่องทั้งการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงหรือรูปแบบคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดสอบพลวัตของแอกซ์เอเตอร์นิวมติกส์

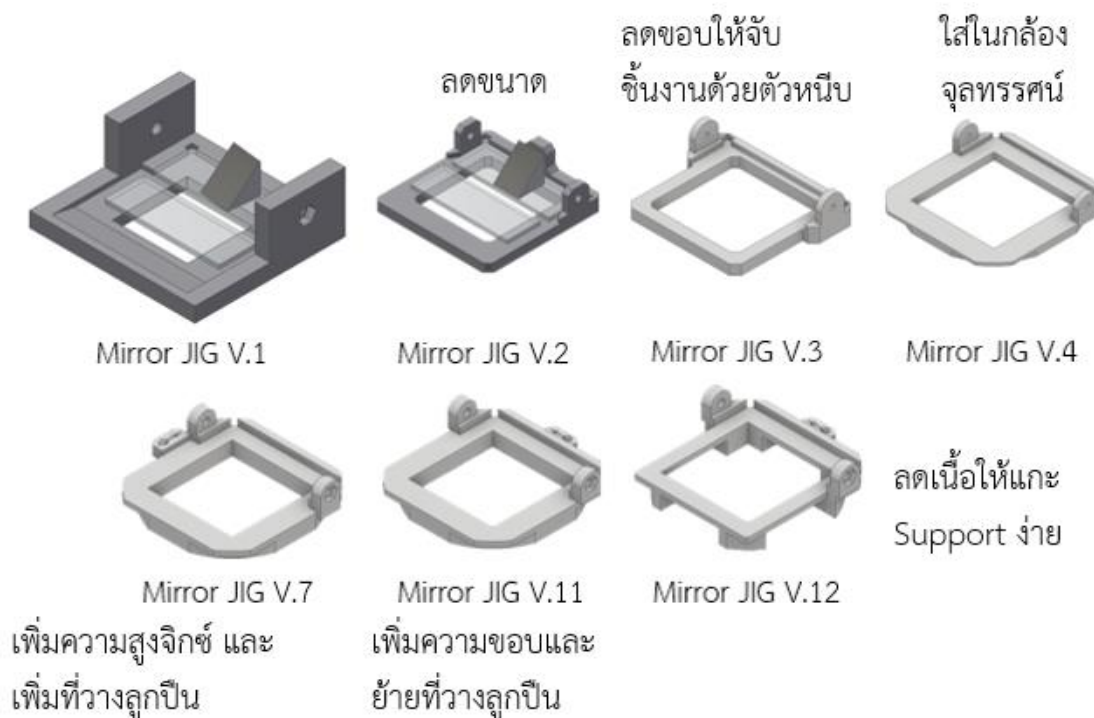
4.1.1 การจับชิ้นงานไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในระหว่างการทดลอง

ชิ้นงานที่ได้หลังจากการทดสอบการเชื่อมประสานด้วยวิธีคายประจุโคโรน่า และล้างชิ้นสังเวยออกมาแล้ว เมื่อนำไปประสานกับสไลด์กระจกพบว่า เมื่อนำชิ้นงานไปวางติดกับกระจกฉากขวาที่ใช้ในการสะท้อนภาพด้านข้างของแอกซ์เอเตอร์นิวมติกส์บนแท่นวางชิ้นงาน (รูปที่ 4.1ก) จะไม่สามารถจับภาพบริเวณที่ต้องการได้เนื่องจากขนาดของชิ้นงานที่ใหญ่เกินไป (รูปที่ 4.1ข) อีกทั้งเมื่อนำกระจกฉากขวามาวางไว้บนชิ้นงาน ทำให้การปรับกระจกฉากให้ได้ตำแหน่งทำได้ยากมาก (รูปที่ 4.1ค) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบอุปกรณ์บางอย่างมาจับชิ้นงานไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่



รูปที่ 4.1 (ก) รูปแบบการวางชิ้นงานกับกระจกฉากสำหรับการทดสอบการรับภาพจากกล้องจุลทรรศน์(ข) ภาพชิ้นงานที่ตัวกระจกไม่สามารถจับภาพขอบของชิ้นงานได้ (ค) ภาพชิ้นงานที่มีการวางกระจกฉากวางบนชิ้นงาน ซึ่งสามารถเห็นภาพด้านบนและด้านข้างของชิ้นงานได้

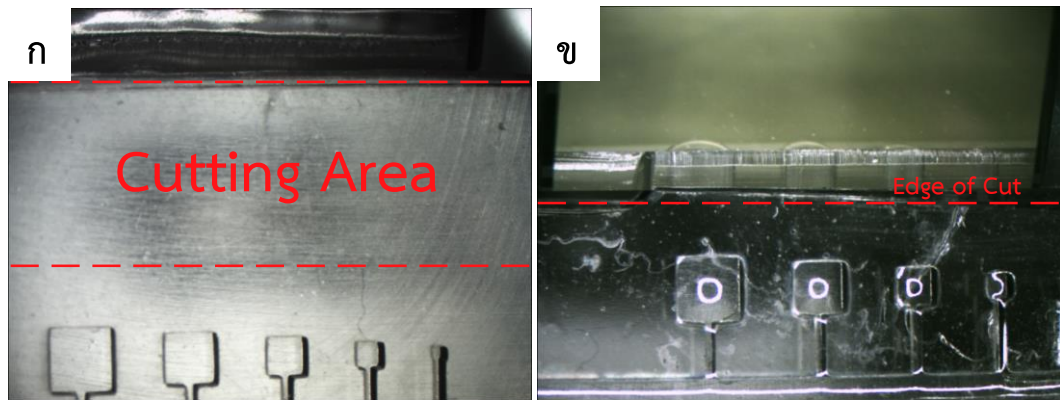
การออกแบบอุปกรณ์จับชิ้นงานเพื่อใช้ในการจับชิ้นงาน เราได้ใช้วิธีการผลิตด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (Zortrax M200) ซึ่งเป็นรุ่นที่ให้ความละเอียดผิวในแนวแกน Z ได้ดี และผิวเรียบเหมาะกับการใช้ในการทำอุปกรณ์จับชิ้นงานจับชิ้นงาน ในการออกแบบอุปกรณ์จับชิ้นงานนั้นเริ่มจากการพัฒนาอุปกรณ์จับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ให้ลดขนาดลงและสามารถวางบนแท่นของกล้องจุลทรรศน์ได้อย่างพอดี ต่อมาเริ่มพัฒนาให้มีที่วางลูกปืนสำหรับการสอบเทียบขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เมื่อทำการวางกระจกสไลด์ สามารถวางได้เต็มที่ 2 แผ่นสำหรับด้านกระจกฉากขวา จึงเพิ่มความสูงของขอบให้รองรับการปรับความสูงของกระจกฉากขวาด้วยกระจกสไลด์แต่ติดปัญหาที่ตัวหนีบไม่สามารถหนีบกระจกสไลด์ที่ใช้ยึดติดชิ้นงานได้ จึงทำการลดขนาดที่วางชิ้นงาน เพิ่มช่องด้านล่างสำหรับยึดจับชิ้นงานและยกอุปกรณ์จับชิ้นงานให้สูงขึ้นเพื่อไม่ให้ตัวยึดกระจกสไลด์ไปชนกับขอบของแท่นวางชิ้นงานของกล้องจุลทรรศน์ ดังรูปที่ 4.2



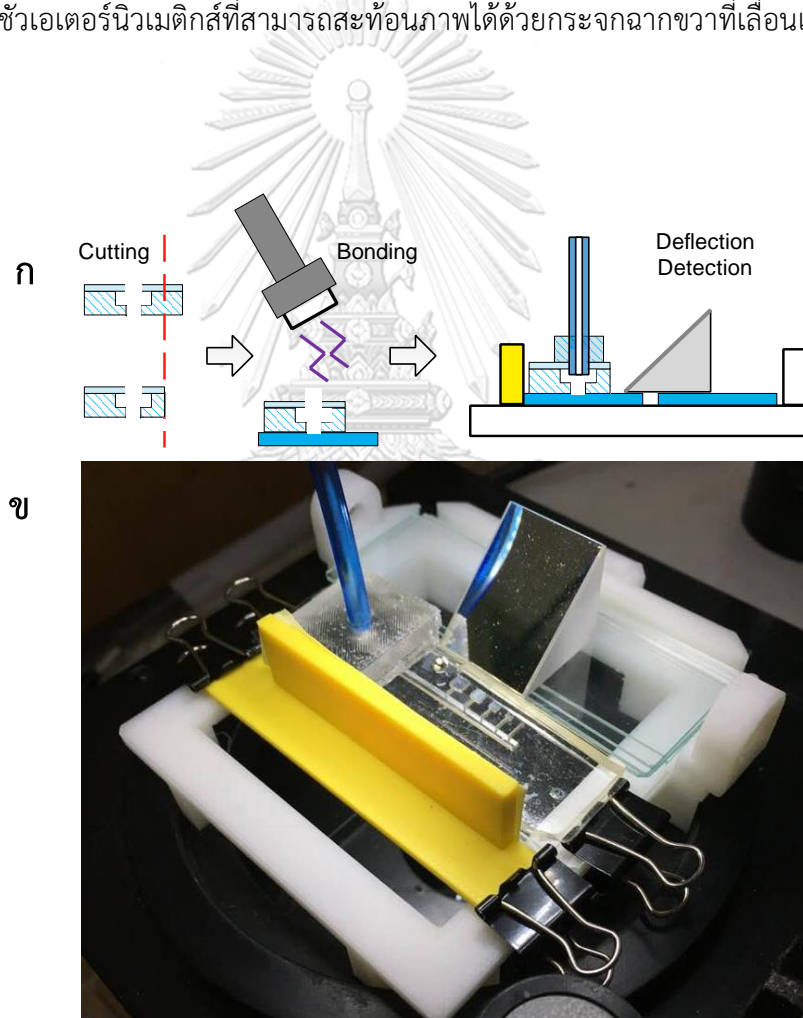
รูปที่ 4.2 การพัฒนาแบบโมเดลของอุปกรณ์จับชิ้นงานจับชิ้นงาน

4.1.2 การออกแบบรูปแบบการจับชุดทดลองเพื่อให้สามารถทดลองได้อย่างต่อเนื่อง

การวัดระยะกระดกไม่สามารถทำได้ทันที เนื่องจากขนาดด้านกว้างของชิ้นควบคุมที่ผ่านการประสานกับฟิล์มบางด้วยวิธีการคายประจุโคโรนาและล้างชั้นสังเวทยอกแล้ว มีขนาดใกล้เคียงกับกระจกสไลด์ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ากระจกฉากขาว ($25.3 \text{ mm} > 20 \text{ mm}$) (รูปที่ 4.3ก) จึงจำเป็นต้องฉีกเนื้อออกบางส่วนเพื่อให้กระจกสามารถเข้ามาอยู่ในตำแหน่งที่สามารถจับภาพแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และยึดจับชิ้นงานได้ (รูปที่ 4.3ข) โดยหลังจากฉีกเนื้อชิ้นงานออกแล้วจึงนำกระจกสไลด์ไปประสานเพื่อใช้เป็นชิ้นงานทดสอบ ก่อนนำชิ้นงานทดสอบไปติดตั้งกับอุปกรณ์จับชิ้นงานและติดตั้งแผ่นสะท้อนภาพสีเหลืองและกระจกฉากขาว ดังรูปที่ 4.4ก ซึ่งลักษณะการติดตั้งจริงจะเป็นดังรูปที่ 4.4ข



รูปที่ 4.3 (ก) บริเวณที่ต้องตัดชิ้นงานขึ้นควบคุมออกเพื่อให้วางกระจกฉากขวาในเฟรมภาพได้ (ข) ภาพแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ที่สามารถสะท้อนภาพได้ด้วยกระจกฉากขวาที่เลื่อนเข้ามาในเฟรมภาพได้

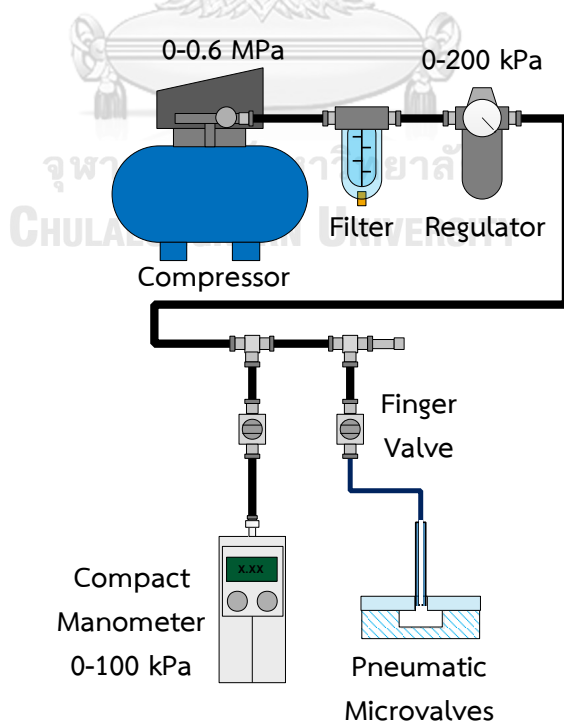


รูปที่ 4.4 (ก) กระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบและติดตั้งบนอุปกรณ์จับชิ้นงานสำหรับการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์ (ข) ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งบนอุปกรณ์จับชิ้นงานพร้อมสำหรับการทดสอบการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटิกส์

4.2 การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน

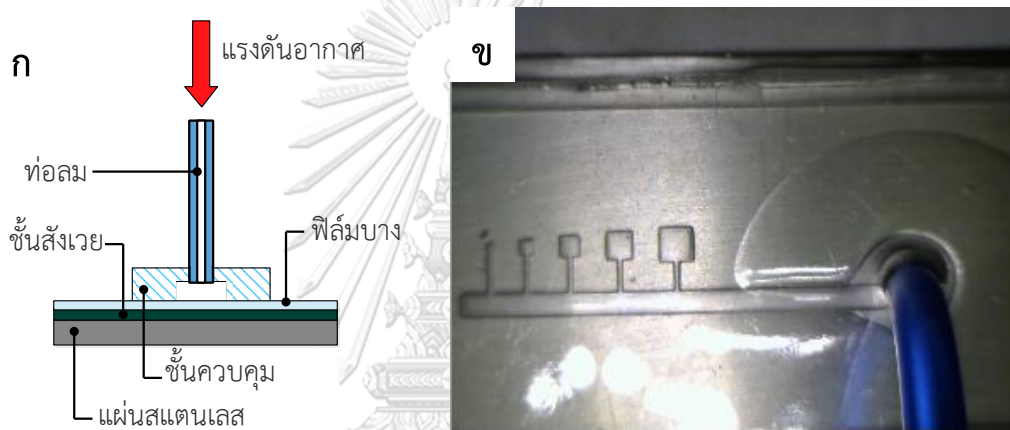
การใช้งานควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์จำเป็นต้องทราบค่าความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน เพื่อใช้ในการเลือกช่วงค่าแรงดันอากาศที่ใช้ปิดช่องทางไหลจุลภาค ซึ่งการปิดช่องทางไหลจุลภาคจำเป็นต้องรู้ขนาดความยาวด้านเท่าของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ (กรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัส), ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น, ความหนาของฟิล์มบางและแรงดันอากาศ

การทดสอบนี้จะเป็นการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของการเชื่อมประสาน โดยการเพิ่มแรงดันอากาศแบบขั้นบันไดจาก 0 kPa ขึ้นทุก 5 kPa ทุก 5 นาที จนขึ้นงานเกิดการรั่วไหล ซึ่งการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของการเชื่อมประสานจำเป็นต้องมีชุดบริการลมสำหรับการทดสอบ (รูปที่ 4.5) ประกอบด้วย ปัมลม(PUMA/mini pancake OL-1204) สำหรับการสร้างลมอัด (0-0.6 MPa) ก่อนจะส่งลมไปยัง ตัวกรองลมดักน้ำ(SMC/AF20-02BC-A) ซึ่งจะดักไปน้ำในลมอัดและฝุ่น เพื่อไม่ให้เข้าไปในระบบ จากนั้นจึงทำการปรับแรงดันอากาศด้วยตัวควบคุมแรงดัน(SMC/IR2000-02BG) ซึ่งสามารถปรับแรงดันอากาศได้ในช่วง 0-200 kPaและมานอมิเตอร์(SMC/ PPA100 และ PPA102) ไว้สำหรับวัดความดันอากาศโดยจะมีฟิงเกอร์วาล์วคอยป้องกันอุปกรณ์ เนื่องจากมานอมิเตอร์รุ่น PPA100 วัดความดันอากาศได้ในช่วง 0-200 kPa และมานอมิเตอร์รุ่น PPA102 วัดความดันอากาศได้ในช่วง 0.1-1 MPa

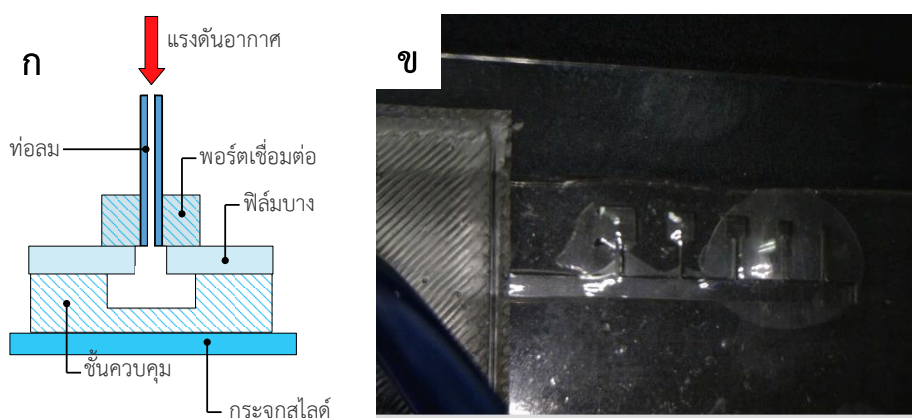


รูปที่ 4.5 อุปกรณ์นิวเมติกส์สำหรับการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานอย่างง่าย

การทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในช่วงแรก ได้ทดสอบชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า (รูปที่ 4.6ก) ซึ่งทดสอบค่าแรงดันอากาศสูงสุดก่อนที่ชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่าเสียหาย คือ 45 ± 5 kPa (รูปที่ 4.6ข) ส่วนการทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับใช้ทดสอบระยะกระดกหลังจากที่ล้างชิ้นส่งเว่ยออกและทำการประสานกับพอร์ตเชื่อมต่อกับกระจกสไลด์ (รูปที่ 4.7ก) ค่าแรงดันอากาศสูงสุดก่อนที่ชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์เสียหายอยู่ที่ 30 ± 5 kPa (รูปที่ 4.7ข) เราจึงกำหนดให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ก่อนที่ชิ้นงานเสียหาย คือ 25 kPa



รูปที่ 4.6 (ก) โครงสร้างชิ้นงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่า (ข) ชิ้นงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่าเสียหายจากการทดสอบ



รูปที่ 4.7 (ก) โครงสร้างชิ้นงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดก (ข) ชิ้นงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดกเสียหายจากการทดสอบ

4.3 การสอบเทียบขนาดมิติเรขาคณิต

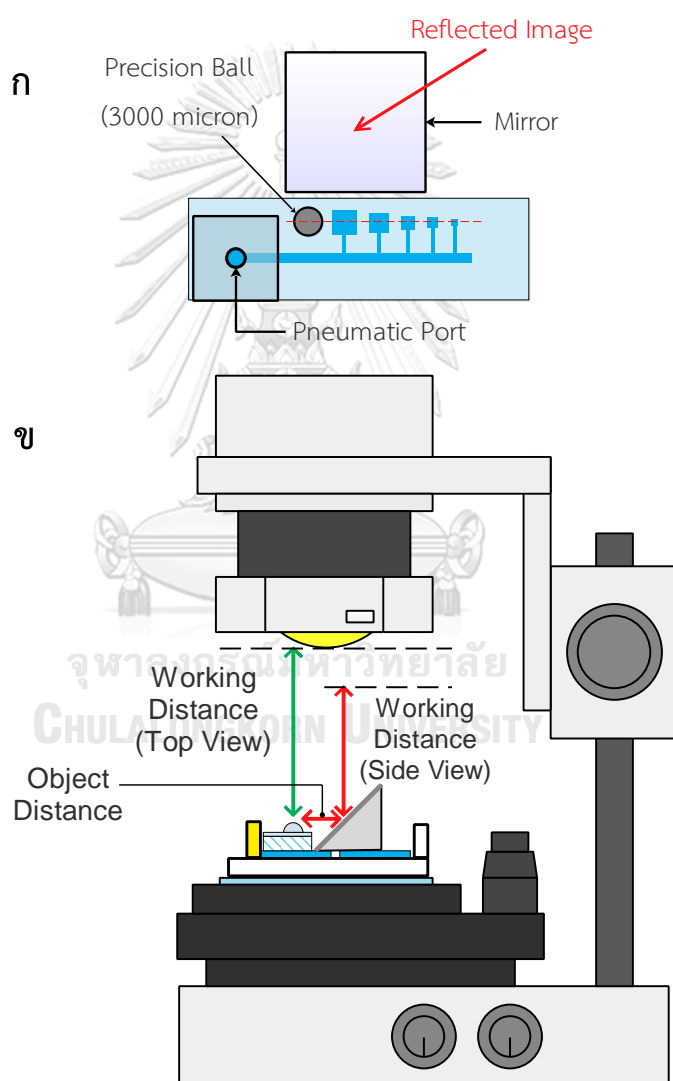
กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Stereomicroscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ที่มีกำลังขยายไม่สูงมากและมีระยะทำงานกว้าง สามารถจับภาพชิ้นงานที่สามารถสะท้อนแสงได้ โดยเหมาะกับการวัดลักษณะกายภาพภายนอกของชิ้นงาน ซึ่งการบิดเบือนของภาพเกิดจากหลายปัจจัย ทั้งรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์จับชิ้นงาน ระยะและตำแหน่งการวางกระจกฉากขวา ซึ่งผลจากการวัดภาพของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

การวัดขนาดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ไม่ทราบกำลังขยาย ระยะโฟกัสและระยะทำงาน (Working Distance) การสอบเทียบขนาดมิติเรขาคณิตด้วยวัตถุที่ทราบค่าขนาดมิติเรขาคณิต เช่น เม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกับการเตรียมการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ โดยไอร์นิวเมติกส์ให้ขนาดที่ทราบจะกระจกฉากขวา จากนั้นจึงนำเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน มาวางในตำแหน่งกึ่งกลางของแนวแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ เพื่อลดค่าความผิดพลาด (รูปที่ 4.8ก) แต่กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไม่สามารถจับภาพแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จากด้านบน และด้านข้างภายในเฟรมเดียวกันได้ เนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ และระยะกับตำแหน่งการวางกระจกฉากขวา จึงจำเป็นต้องปรับระยะทำงาน (Working Distance) เพื่อให้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอสามารถจับภาพแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จากด้านบนและด้านข้าง โดยที่ภาพแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จะอยู่ในระยะโฟกัส (Depth of Focus) รูปที่ 4.8ข

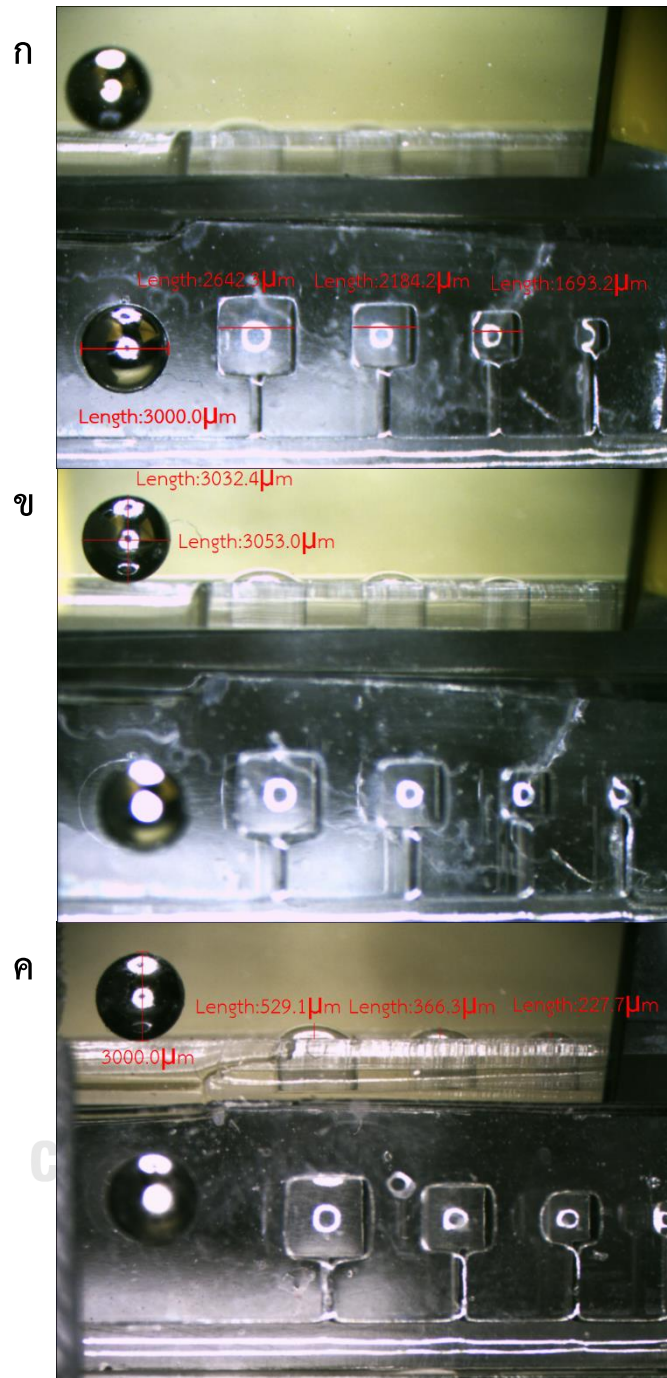
การวัดค่าสำหรับการสอบเทียบควรใช้ค่าที่ได้จากภาพที่กระจกสะท้อน (Reflected Image) ภาพด้านข้างของชิ้นงานเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์ หากยึดภาพของเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน จากมุมมอง (Top View) เป็นค่าหลักในการอ้างอิง (รูปที่ 4.9ก) ค่าที่วัดเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ได้จากมุมมองด้านข้าง (Side View) จะมีความคลาดเคลื่อนและวัดได้ไม่เป็นวงกลม (รูปที่ 4.9ข) ซึ่งเกิดจากการบิดเบือนภาพจากการติดตั้งชิ้นงานกับตัวจับชิ้นงาน ตำแหน่งและมุมที่เกิดจากการวางกระจกฉากขวา กับแนวของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาด้วยกล้าวครวัดในเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน แนวแกน Y ของภาพเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน จากมุมมองด้านข้าง (Side View) เพื่อลดข้อผิดพลาดจากมุมมองเฉียงที่เกิดจากการวางกระจกฉากกับชิ้นงาน ซึ่งปรับแก้องศาให้มีความเที่ยงตรงได้ยาก (รูปที่ 4.9ค) โดยในภาพดังกล่าวเมื่อทำการตรวจสอบกับแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์พบว่า ระยะกระดกตัวที่สามารถสังเกตได้ คือ ระยะกระดกตัวที่แรงดันอากาศ 15 kPa เป็นต้นไป ซึ่งจะมีแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ 3 ขนาด ที่สามารถวัดได้ คือ ขนาดขนาด 1500 μm , ขนาด 2000 μm และขนาด 2500 μm ตามลำดับ

ผลการสอบเทียบการวัดขนาดเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน เทียบกับ พิกเซลของกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอของตัวอย่างทดสอบทั้ง 5 ตัวอย่างทดสอบ จะได้ค่า 20.2549 , 19.9066, 20.1498, 19.5674, 19.5816 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ซึ่งหาค่าเฉลี่ยได้ 19.9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ซึ่งหากเผื่อค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์ 1 พิกเซล จะได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์เท่ากับ 20 μm

$$\text{Uncertainty}_{\text{Tool}} = 19.9 \approx 20 \mu\text{m}$$



รูปที่ 4.8 (ก) การวางตำแหน่งเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ลงบนชิ้นงานสำหรับการสอบเทียบมิติเรขาคณิต (ข) ระยะทำงานสำหรับการวัดชิ้นงานแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์จากด้านบนและด้านข้าง



รูปที่ 4.9 (ก) การวัดภาพของเม็ดลูกปิ่นที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน จากมุมบน (Top View) เป็นค่าหลักในการอ้างอิง (ข) ค่าที่วัดเม็ดลูกปิ่นที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ได้จากมุมด้านข้าง (Side View) จะมีความคลาดเคลื่อนและวัดได้ไม่เป็นวงกลม (ค) การสอบเทียบมิติเรขาคณิตลูกปิ่นที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน กับค่าระยะกระดกของแอคชัวเอเตอร์นิวเมติกส์ ที่มาจากการสอบเทียบมิติเรขาคณิต

4.4 สรุปการเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

การใช้ตัวจับชิ้นงานในการจับชิ้นงานทดสอบก่อนนำไปจัดวางบนกล้องจุลทรรศน์และติดตั้งกระจกฉากสำหรับการสะท้อนภาพด้านข้างของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์ ไม่สามารถทำได้ทันทีจากชิ้นงานทดสอบที่ทำจากชิ้นงานหล่อจากแม่พิมพ์ที่ต้นแบบ 3 เนื่องจากขนาดด้านกว้างของชิ้นงานหล่อที่ใหญ่เกินไป ไม่สามารถวางกระจกฉากขวาได้โดยง่าย จึงจำเป็นต้องเดือนบางส่วนทิ้ง ก่อนจะนำไปประสานกับกระจกสไลด์และพอร์ตเชื่อมต่อกับวิธีคายประจุโคโรนา

การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานจำเป็นต้องทำการทดสอบชิ้นงาน เพื่อหาแรงดันอากาศสูงสุดที่ไม่ทำให้ชิ้นงานฉีกขาด โดยการทดสอบกับชิ้นงานทดสอบ 2 ลักษณะ คือ ชิ้นงานทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์หลังจากการประสานชิ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรนาซึ่งช่วงที่เสียหายคือ 45 ± 5 kPa โดยลักษณะฉีกนี้ไม่สามารถแทนลักษณะของชิ้นงานที่จะทำการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์ได้ จึงทำการทดสอบกับชิ้นงานทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์สำหรับการวัดระยะกระดกที่ล่างชิ้นสังเวยกออกและประสานเข้ากับพอร์ตเชื่อมต่อกับกระจกสไลด์แล้ว โดยช่วงที่เสียหายคือ 30 ± 5 kPa จึงสามารถสรุปได้ว่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ไม่ทำให้ชิ้นงานฉีกขาดคือ 25 kPa

ค่าที่สามารถใช้ทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์ที่ปลอดภัยต่อชิ้นงาน คือ ช่วง 0-25 kPa หลังจากทราบค่าช่วงแรงดันอากาศที่สามารถใช้งานได้แล้ว ก่อนการทดสอบวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์จำเป็นต้องทำการสอบเทียบมิติเรขาคณิตลูกปืนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงเทียบกับระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์ที่วัดได้ ซึ่งพบว่าในการติดตั้งชิ้นงานสำหรับในการทดสอบแต่ละครั้งต้องทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้ง ทั้งนี้ เพราะ การบิดเบี้ยวของภาพที่ขึ้นกับการติดตั้งที่แตกต่างกันทุกครั้ง และเวลาวัดให้ใช้ภาพสะท้อนด้านข้างของเม็ดลูกปืนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอนในแนวแกน Y เป็นค่าอ้างอิง

นอกจากนี้ในการตรวจสอบภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์พบว่า ระยะกระดกตัวที่สามารถสังเกตได้ คือ ระยะกระดกตัวที่แรงดันอากาศ 15 kPa เป็นต้นไป ซึ่งจะมีแอกซ์เอเตอร์นิวมेटริกส์ 3 ขนาด ที่สามารถวัดได้ คือ ขนาด 1500 μm , ขนาด 2000 μm และขนาด 2500 μm ตามลำดับ

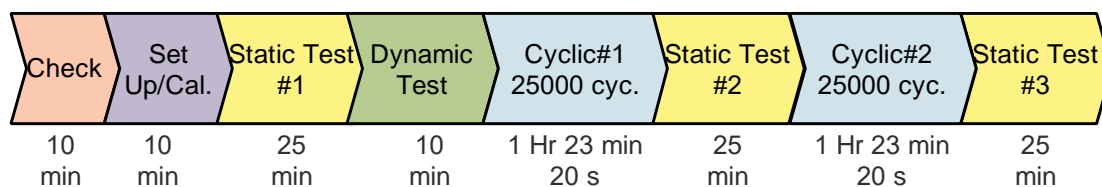
บทที่ 5

การทดลองคุณลักษณะของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

บทที่ 5 นี้จะเป็นการหาคุณลักษณะของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่เราจะนำมาใช้จริงในระบบของไหลจุลภาค โดยจะทำการทดสอบหาระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์โดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันได การทดสอบหาระยะกระดกโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการควบคุมแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการให้คลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

5.1 กระบวนการทดลองการหาคุณสมบัติแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

การติดตั้งชิ้นงานทดสอบมีจุดวิกฤตหลายจุดทั้งตำแหน่งของกระจกที่วางซึ่งยากต่อการวางให้ตำแหน่งถูกต้อง ตำแหน่งชิ้นงานและแรงสั่นสะเทือนจากการให้แรงดันอากาศ ดังนั้นการทดสอบวัตรยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ จะต้องทำการทดสอบอย่างเป็นขั้นตอนอย่างต่อเนื่องภายใต้การติดตั้งครั้งเดียวกัน (รูปที่ 5.1) เพื่อลดค่าความไม่แน่นอนในการวัดจากผลของการติดตั้งและการสอบเทียบ ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบเริ่มตั้งแต่ การตรวจสอบชิ้นงานทดสอบโดยการให้แรงดันอากาศที่ 27 kPa เป็นเวลา 10 นาที เพื่อตรวจสอบว่าชิ้นงานเสียหาย ประสานไม่สมบูรณ์หรือมีรอยร้าวหรือไม่ จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ทดสอบความเสียหายแล้วมาติดตั้งบนอุปกรณ์จับชิ้นงานสำหรับการสอบเทียบมิติเรขาคณิตเพื่อใช้ในการวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ แล้วจึงทำการทดสอบการวัตรยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการให้แรงดันอากาศคงที่แบบขั้นบันไดและการให้ความถี่สัญญาณในรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเพื่อศึกษาพลวัตของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนกระบวนการทดลองการหาคุณสมบัติแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จะกล่าวในหัวข้อย่อยถัดๆไป



รูปที่ 5.1 กระบวนการทดลองการหาคุณสมบัติแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และเวลาที่ใช้ในการทดลอง

กระบวนการทดลองการหาคุณสมบัติแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์นี้จะต้องทำใหม่ทุกครั้ง เมื่อมีการถอดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับชิ้นงานหรือมีการขยับตำแหน่ง เนื่องจากตำแหน่งของภาพที่สะท้อนจากกระจกฉากขวาเข้ากล้องจุลทรรศน์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ง่ายต่อการทดลอง จะมีขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ทำการเพิ่มระดับแรงดันอากาศไปที่ 27 kPa และทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อตรวจสอบชิ้นงานว่าเสียหายหรือไม่
2. ทำการติดตั้งชิ้นงานทดสอบกับอุปกรณ์จับชิ้นงานจับกระจกฉากขวา โดยทำการปรับให้เห็นระยะโฟกัส (แกน Z) แล้วทำการเลื่อนหาภาพชิ้นงานกับกระจกฉากขวา โดยการปรับตำแหน่งแท่น (แกน X-Y) และทำการปรับหมุนให้กระจกได้ระดับ จึงทำการปรับชิ้นงานทดสอบโดยการเลื่อนและหมุนจนได้ระดับแล้วทำการยึดให้แน่นด้วยคลิปหนีบกระดาษ จากนั้นจึงติดตั้งฉากหลังสีเหลืองสำหรับสะท้อนภาพด้านข้างแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ แล้ววางเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน มาวางในตำแหน่งกึ่งกลางของแนวแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
3. ทำการสอบเทียบมิติเรขาคณิตด้วยเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 เพื่อหาระยะที่ถูกต้องสำหรับการวัด โดยทำการวัดในแกน Y เพื่อลดความผิดพลาดจากการวัด (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
4. ทดสอบระยะกระดกโดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันได ครั้งที่ 1 (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
5. การทดสอบระยะกระดกโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ ด้วยการให้คลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
6. ทำการทดสอบวัฏจักรของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ โดยการเปิดความถี่ 5 Hz เป็นจำนวนคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง (1 ชม 23 นาที 20 วินาที) (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
7. ทดสอบระยะกระดกโดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันได ครั้งที่ 2 (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
8. ทำการทดสอบวัฏจักรของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ โดยการเปิดความถี่ 5 Hz เป็นจำนวนคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง (1 ชม 23 นาที 20 วินาที) (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)
9. ทดสอบระยะกระดกโดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันได ครั้งที่ 3 (หัวข้อ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง)

5.2 การทดสอบระยะกระดกด้วยแรงดันอากาศคงที่

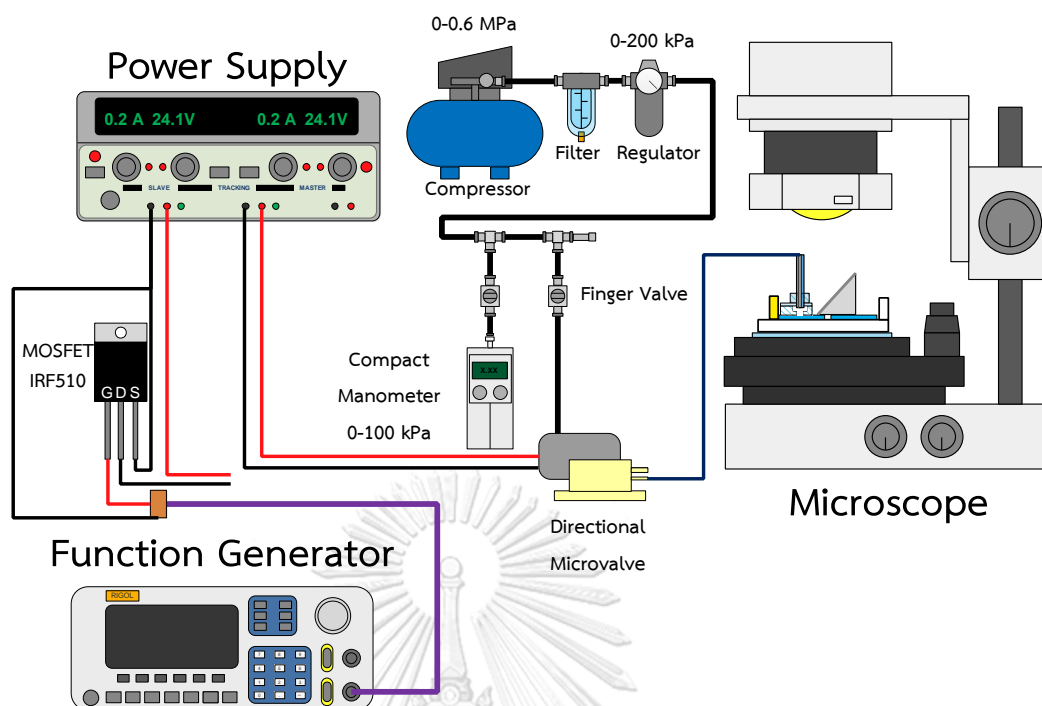
การวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ด้วยแรงดันอากาศคงที่ จะทำการวัดโดยการเพิ่มและลดระดับแรงดันอากาศแบบขั้นบันได เพื่อหาระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่ค่าแรงดันต่างๆ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบขนาดช่องทางไหลจุลภาคที่เหมาะสมแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ โดยจะทำการควบคุมวาล์วควบคุมทิศทางด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และทำการปรับแรงดันอากาศด้วย ซึ่งในการทดลองนี้สามารถเทียบผลค่าความไม่แน่นอนจากการวัด ทั้งจากกรณีการผลิตและกรณีการติดตั้ง

การทดสอบระยะกระดกโดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันไดจะเป็นการทดสอบที่ต่อเนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานโดยการเพิ่มแรงดันอากาศแบบขั้นบันได โดยการเพิ่มแรงดันจาก 0 kPa จนถึงค่าความแข็งแรงของการเชื่อมประสานซึ่งเป็นค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่แอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์สามารถทำงานได้ก่อนที่ซีพของช่องทางไหลจุลภาคจะเสียหาย แล้วทำการลดแรงดันอากาศลงมาถึง 0 kPa เพื่อตรวจสอบขนาดของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่ต้องการใช้งานนั้น ที่ค่าแรงดันอากาศจากกรณีเพิ่มแรงดันอากาศมาที่ค่านั้นกับกรณีลดแรงดันอากาศมาที่ค่านั้น ระยะกระดกต้องเท่ากันเพื่อให้การปิดช่องทางไหลจุลภาคสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ด้วยการตรวจสอบภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์พบว่า ระยะกระดกตัวที่สามารถสังเกตได้ คือ ระยะกระดกตัวที่แรงดันอากาศ 15 kPa เป็นต้นไป ซึ่งจะมีแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ 3 ขนาด ที่สามารถวัดได้ คือ ขนาดขนาด 1500 μm , ขนาด 2000 μm และขนาด 2500 μm ตามลำดับ ดังนั้นช่วงขั้นบันได จะทำการปรับเพื่อให้สามารถวัดระยะกระดกได้ โดยวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่ค่าแรงดันอากาศ 0, 15, 20, 25, 27 kPa

การทดลองนี้จะใช้แรงดันไฟฟ้า 24 Vdc ในการสั่งวาล์วควบคุมทิศทาง (Directional Valve) ให้ทำงาน โดยระดับแรงดันอากาศสามารถปรับได้ด้วยการปรับตัวควบคุมแรงดัน (SMC/IR2000-02BG) ซึ่งสามารถปรับแรงดันอากาศได้ในช่วง 0-200 kPa และใช้மானอมิเตอร์ (SMC/ PPA100) ในการตรวจสอบแรงดันอากาศในระบบนิวเมติกส์

ขั้นตอนการทดสอบระยะกระดกโดยการเพิ่มและลดแรงดันอากาศแบบขั้นบันไดที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งรูปแบบการเชื่อมต่อทั้งระบบนิวเมติกส์และระบบควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ จากนั้นทำการวางชิ้นงานกับตัวจับชิ้นงานบนกล่องจุลทรรศน์แล้วทำการตรวจสอบสภาพชิ้นงานที่แรงดันอากาศ 27 kPa เป็นเวลา 10 นาที และสอบเทียบมิติเรขาคณิตลูกปืนที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ดังรูปที่ 5.2
2. เตรียมระบบนิวเมติกส์ โดยการตรวจสอบฟิงเกอร์วาล์วที่เชื่อมต่อกับชิ้นงานให้ปิดเพื่อไม่ให้แรงดันอากาศเข้าชิ้นงานก่อนการวัด ส่วนฟิงเกอร์วาล์วที่เชื่อมต่อกับมานอมิเตอร์ให้เปิดทิ้งไว้ จากนั้นเปิดปั๊มลมแล้วทำการปรับตัวปรับระดับแรงดันอากาศให้แน่ใจว่าอยู่ที่ 0 kPa
3. เตรียมสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมวาล์วควบคุมทิศทาง (Directional Valve) โดยใช้เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้า 24 Vdc จ่ายตรงไปยังวาล์วควบคุมทิศทาง เพื่อให้วาล์วควบคุมทิศทางทำงาน
4. เปิดฟิงเกอร์วาล์วเพื่อเตรียมทำการทดสอบ
5. ทำการทดลองโดยการเพิ่มระดับแรงดันอากาศแบบขั้นบันได เริ่มจากปรับระดับแรงดันอากาศลงมาที่ 0 kPa แล้วทำการปรับแรงดันอากาศเพิ่มขึ้นไปที่ 15, 20, 25, 27 kPa ตามลำดับ ทุกๆ 1 นาที โดยทำการถ่ายภาพและวัดระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ จากนั้นทำการลดระดับแรงดันอากาศลงไปที่ 25, 20, 15, 0 kPa ตามลำดับ ทุกๆ 1 นาที โดยทำการถ่ายภาพและวัดระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งการทดลองนี้ให้ทำซ้ำ 3 ครั้ง
6. สำหรับการทดลองระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ให้ทำเปลี่ยนรูปแบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ MOSFET เพื่อใช้ในการควบคุมวาล์วควบคุมทิศทางด้วยความถี่ (รูปที่ 5.3) มาเป็นรูปแบบการเชื่อมต่อจากการต่อตรง (รูปที่ 5.2) ก่อนทำการทดลองตามข้อที่ 5



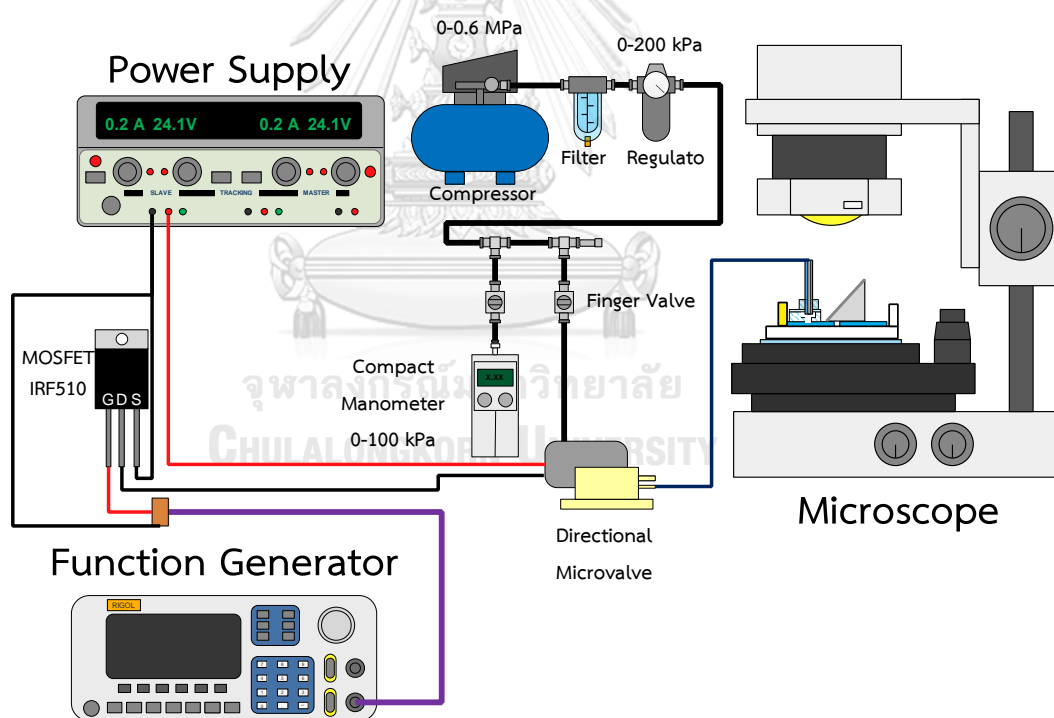
รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบระยะกระดกและความถี่ในการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์

5.3 การทดสอบระยะกระดกด้วยการให้ความถี่

การควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ให้ทำงานด้วยความถี่ ซึ่งไม่สามารถให้สัญญาณใช้การควบคุมวาล์วควบคุมทิศทางได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้ MOSFET ในการขยายสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Rigol-DG) จากคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ 5Vdc เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมระดับ 24Vdc ซึ่งสามารถใช้ในการกระตุ้นโซลีนอยด์วาล์วของวาล์วควบคุมทิศทางให้ทำงานได้ โดยตรงตัว MOSFET จะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งนิยมใช้เป็นดิจิทัลเกตในวงจรซึ่งทนการใช้งานในความถี่ที่สูงได้ โดยขั้นตอนการทดสอบระยะกระดกด้วยการให้ความถี่ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1. ทำการเปลี่ยนรูปแบบการเชื่อมต่อจากการต่อตรง (รูปที่ 5.2) มาเป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ MOSFET เพื่อใช้ในการควบคุมวาล์วควบคุมทิศทางด้วยความถี่ดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง
2. ตรวจสอบระบบนิวเมติกส์ โดยปรับตัวปรับระดับแรงดันอากาศให้แน่ใจว่าอยู่ที่ 0 kPa เพื่อตัดผลจากการทดลองก่อนหน้านี้ แล้วทำการเพิ่มแรงดันอากาศไปที่ 25 kPa

3. เตรียมสัญญาณที่จะใช้ในการทดสอบความถี่โดยปิดการจ่ายสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ(Rigol-DG) และทำการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณเป็นสัญญาณแบบคลื่นสี่เหลี่ยม โดยตั้งความถี่ที่ 1 Hz ค่าแรงดันไฟฟ้ายอดสูงที่สุดไปถึงต่ำที่สุด (V_{pp}) คือ 5 Vdc ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด คือ 5 Vdc ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0 Vdc เวลาทำงาน (Duty Cycle) 50%
4. ทำการจ่ายสัญญาณได้ตั้งค่าไว้ เพื่อให้ MOSFET เปิดแรงดันไฟฟ้า 24 Vdc เข้าวาล์วควบคุมทิศทาง ซึ่งจะทำให้แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทำงานตามค่าความถี่ที่ทำการสั่งไว้ ซึ่งแรงดันไฟฟ้า 24 Vdc ที่จะไปสั่งวาล์วควบคุมทิศทาง โดยที่มีรูปแบบสัญญาณเหมือนสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยจะต่างแค่ขนาดของแรงดันไฟฟ้า
5. ทำการบันทึกภาพและวิดีโอ วัดค่า
6. เมื่อทำเสร็จให้เปลี่ยนค่าความถี่ในการทดสอบเป็น 5 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ โดยให้คงค่าพารามิเตอร์ค่าอื่น ๆ ไว้ โดยให้ทำการบันทึกภาพและอัดวิดีโอสำหรับแต่ละค่าความถี่



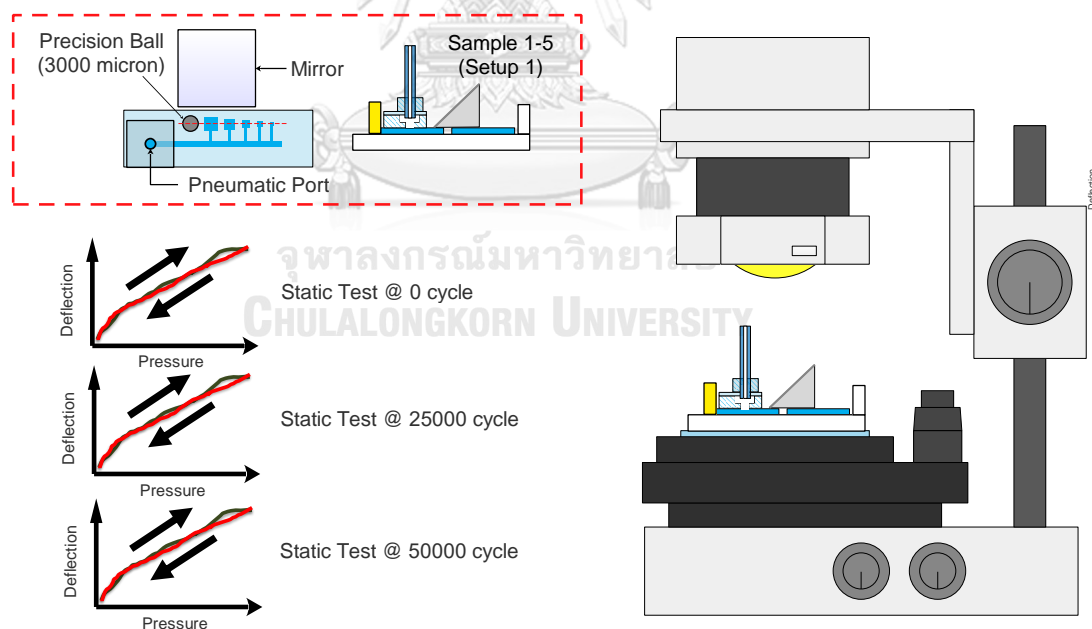
รูปที่ 5.3 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบระยะกระดกโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการควบคุมแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ด้วยการให้คลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

5.4 การทดสอบวัฏจักรของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

การใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในซีพของไหลจุลภาคอย่างต่อเนื่อง เช่น ไมโครปั๊มหรือวาล์วในการเปิดปิดช่องทางไหลจุลภาค จะทำให้วัสดุเกิดการล้าซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะกระดกตัวที่ใช้งานในระบบช่องทางไหลจุลภาค จึงจำเป็นต้องทดสอบวัฏจักรของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ โดยการเปิดความถี่ 5 Hz เป็นระยะเวลายาว (50000 ครั้ง)

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทำได้โดยการถ่ายภาพและวัดระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง โดยการวัดจุดละ 3 ครั้ง (รูปที่ 5.4) ซึ่งสามารถคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ 50000 ครั้ง ดังสมการที่ 5.1

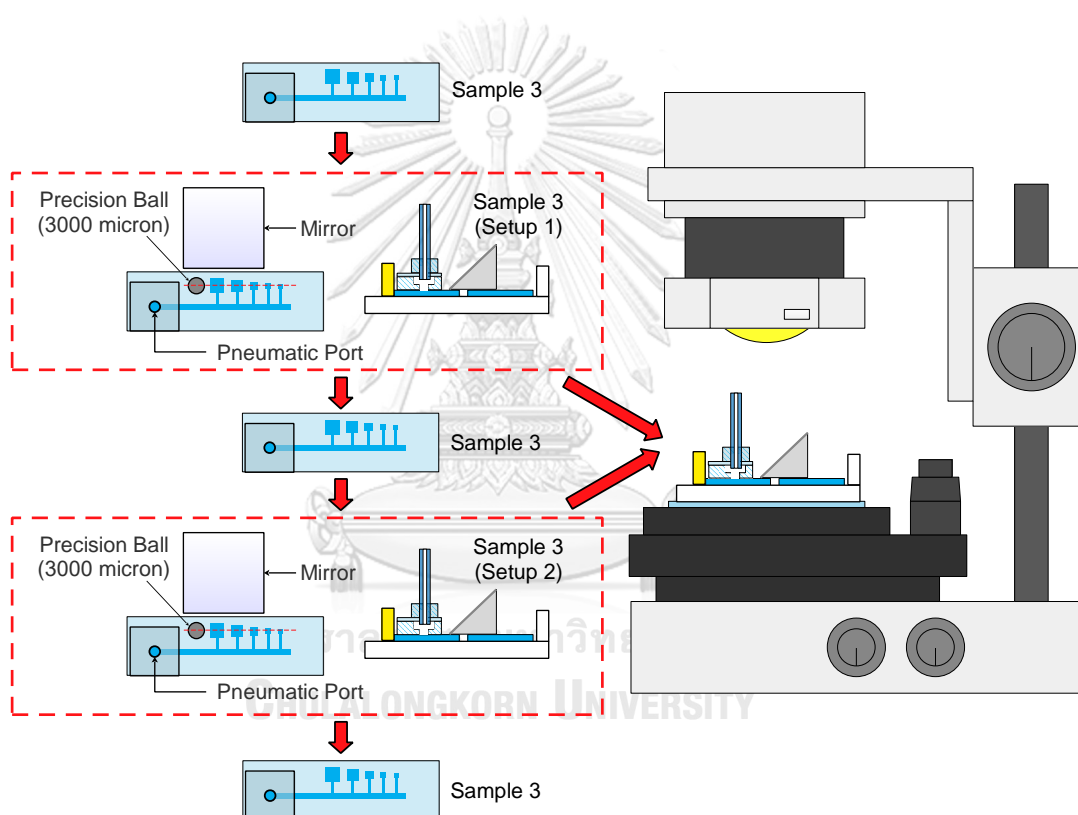
$$\begin{aligned} \text{Testing Time} &= \left(\frac{50000 \text{ cycles}}{5 \text{ cycles/s}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \quad (\text{สมการที่ 5.1}) \\ &= 166.67 \text{ min} = 2 \text{ hr } 46 \text{ min } 40 \text{ s} \end{aligned}$$



รูปที่ 5.4 กระบวนการทดสอบแบบวัฏจักร ทำโดยการติดตั้งชิ้นงานทดสอบแล้วทำการกระตุ้นให้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทำงาน 50000 ครั้ง โดยทำการวัดระยะกระดกตัวเทียบ 3 ช่วงเวลาที่ 0 ครั้ง, 25000 ครั้ง และ 50000 ครั้ง

5.5 ผลการทดลองที่เกิดจากการติดตั้ง

การติดตั้งชิ้นงานทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดก เมื่อทำการถอดชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับชิ้นงาน และทำการติดตั้งใหม่สำหรับการทดสอบชิ้นงานทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดกซ้ำ ผลของการติดตั้งแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในแต่ละครั้ง จะส่งผลกระทบต่อระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์อย่างไร โดยในการทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของระยะกระดกแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ของชิ้นงานทดสอบขั้นที่ 3 ในการติดตั้งครั้งที่ 1 กับการติดตั้งครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กระบวนการทดสอบผลของการติดตั้งที่มีผลต่อระยะกระดกตัวของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ โดยใช้ชิ้นงานตัวเดียวกัน

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องจากการติดตั้ง สามารถหาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเครื่องมือซึ่งมีค่า $20 \mu\text{m}$ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยจากการติดตั้งครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มี 3 ค่า ตามขนาดแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด $2500 \mu\text{m}$ มีค่า $21 \mu\text{m}$ ขนาด $2000 \mu\text{m}$ มีค่า $21 \mu\text{m}$ และขนาด $1500 \mu\text{m}$ มีค่า $22 \mu\text{m}$ ซึ่งสามารถหาค่าความไม่แน่นอน

จากการติดตั้งได้ตั้งสมการที่ 5.2 และสามารถคำนวณหาได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเนื่องจากการผลิตได้ตั้งตารางที่ 5.1

$$\text{Uncertainty}_{\text{Setup}} = \sqrt{\text{Uncertainty}_{\text{Tool}}^2 + \text{Uncertainty}_{\text{Sample}}^2} \quad (\text{สมการที่ 5.2})$$

ตารางที่ 5.1 ตารางคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากการติดตั้ง

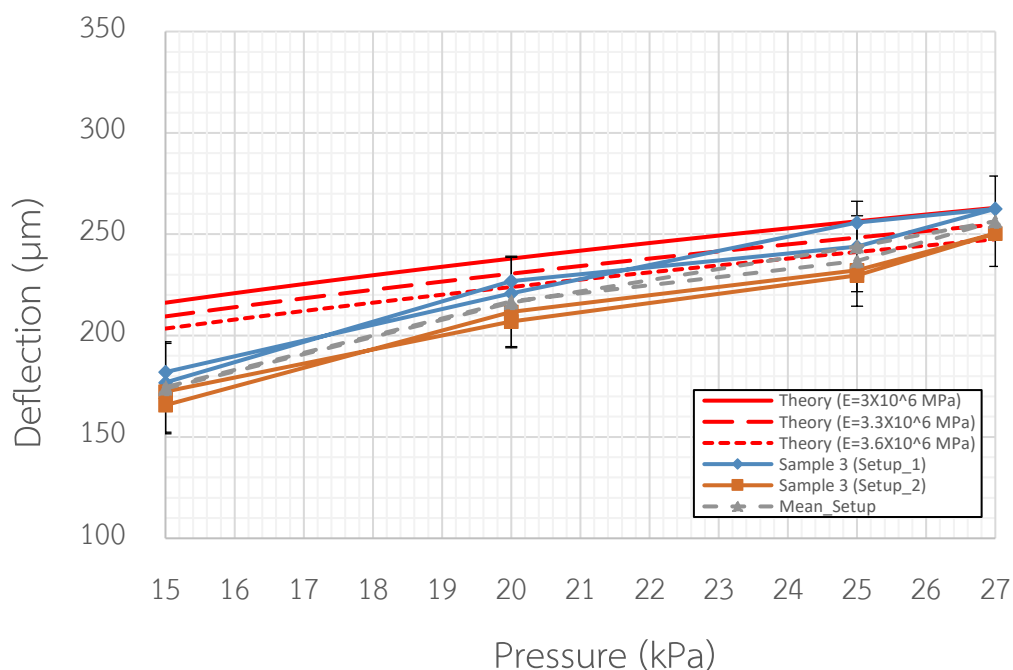
ขนาดของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	Uncertainty _{Tool}	Uncertainty _{Sample}	Uncertainty _{Setup}
1500 μm	20 μm	6 μm	21 μm
2000 μm	20 μm	7 μm	21 μm
2500 μm	20 μm	10 μm	22 μm

หลังจากที่ได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด เราสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกกับแรงดันอากาศ โดยทำการเทียบระยะกระดกของการติดตั้งครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 กับค่าเฉลี่ยของการติดตั้งที่คิดค่าความไม่แน่นอนจากการวัด ซึ่งจะได้ทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล ตามขนาดแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด 1500 μm (ตารางที่ 5.2) ขนาด 2000 μm (ตารางที่ 5.3) และขนาด 2500 μm (ตารางที่ 5.4) ซึ่งสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระยะกระดกกับแรงดันอากาศได้ 3 กราฟ คือ ขนาด 1500 μm (รูปที่ 5.6) ขนาด 2000 μm (รูปที่ 5.7) และ ขนาด 2500 μm (รูปที่ 5.8)

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการติดตั้ง

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 1	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 2	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งเฉลี่ย
15	182	166	12	174 \pm 21
20	221	212	6	216 \pm 21
25	256	232	17	244 \pm 21
27	263	250	9	256 \pm 21
25	244	230	10	237 \pm 21
20	227	207	14	217 \pm 21
15	177	172	3	175 \pm 21

Pneumatic Actuator [1500 μm]

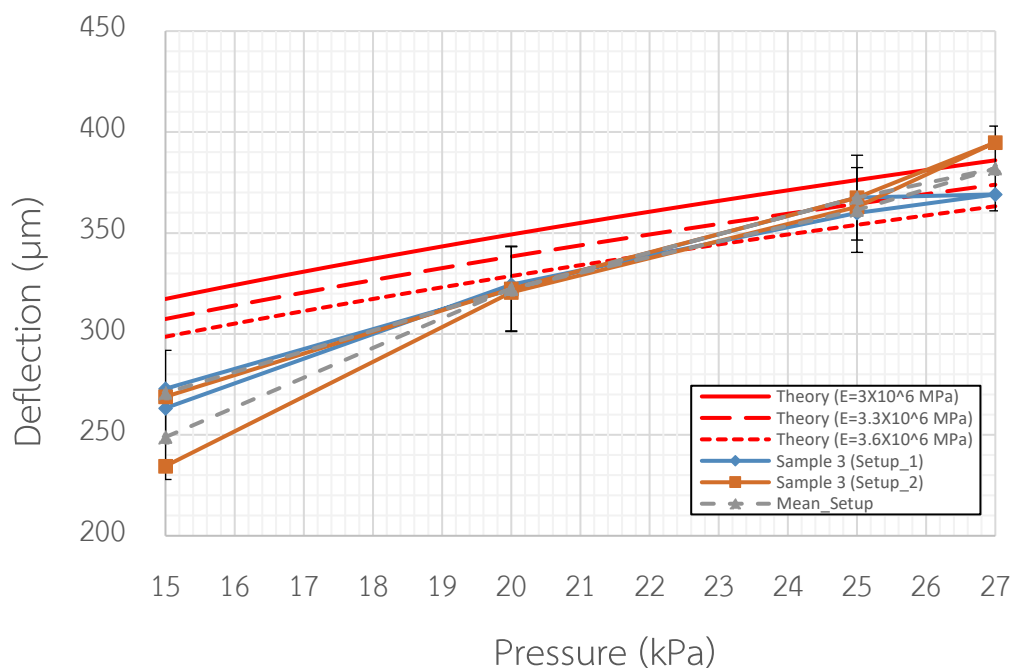


รูปที่ 5.6 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์
นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากการติดตั้ง

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 1	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 2	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งเฉลี่ย
15	263	235	20	249 \pm 21
20	324	321	3	322 \pm 21
25	360	363	2	361 \pm 21
27	369	395	18	382 \pm 21
25	368	367	0	368 \pm 21
20	322	322	0	322 \pm 21
15	273	269	3	271 \pm 21

Pneumatic Actuator [2000 μm]

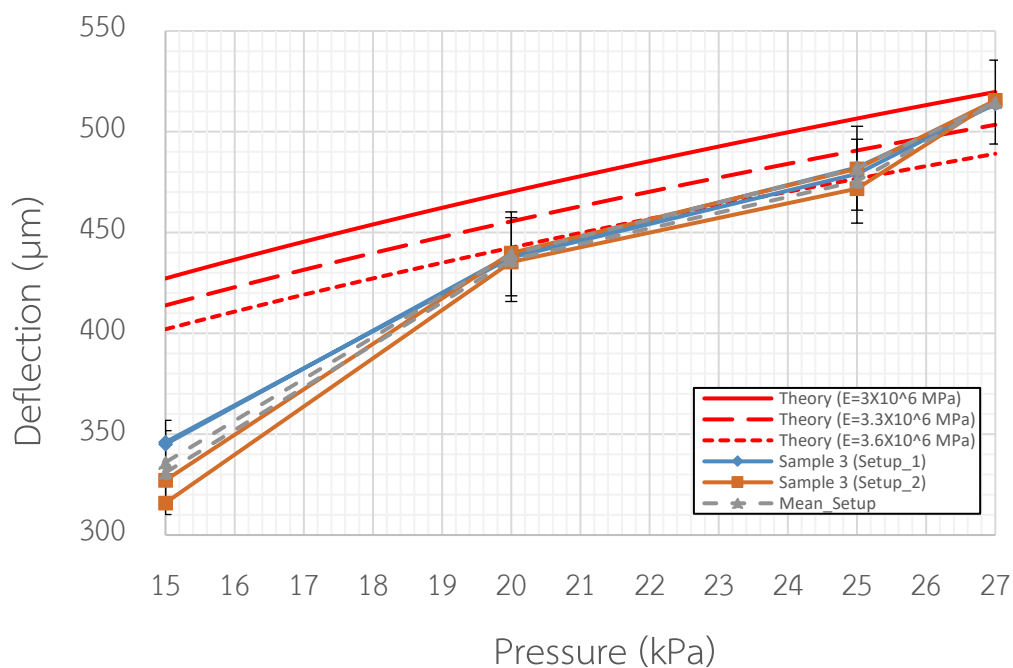


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จาก
การติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์
นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากการติดตั้ง

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 1	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งครั้งที่ 2	ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ชิ้นงานที่ 3 ติดตั้งเฉลี่ย
15	346	316	21	331 \pm 22
20	438	436	2	437 \pm 22
25	479	472	5	476 \pm 22
27	514	516	1	515 \pm 22
25	482	482	0	482 \pm 22
20	439	440	1	439 \pm 22
15	345	327	13	336 \pm 22

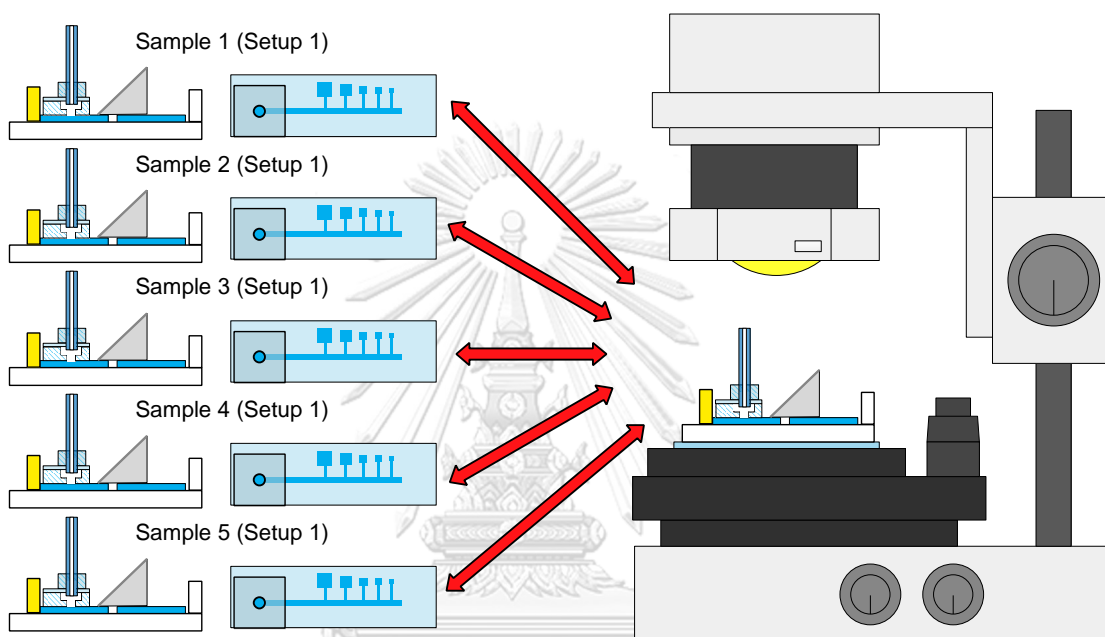
Pneumatic Actuator [2500 μm]



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จาก
การติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 1 และการติดตั้งเพื่อทดสอบครั้งที่ 2

5.6 ผลการทดลองที่เกิดจากกระบวนการผลิต

การผลิตชิ้นงานทดสอบแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการวัดระยะกระดก การสร้างชิ้นงานในแต่ละชุดการผลิต จะส่งผลต่อระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์อย่างไร โดยในการทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบผลของระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์จากตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น เทียบกับระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์เฉลี่ยจากชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 กระบวนการทดสอบผลของการผลิตชิ้นงานที่มีผลต่อระยะกระดกตัวของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องจากการกระบวนการทดลอง สามารถหาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเครื่องมือซึ่งมีค่า $20 \mu\text{m}$ และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยจากชิ้นงานที่ 1 ถึงชิ้นงานชิ้นที่ 5 โดยจะมี 3 ค่า ตามขนาดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด $2500 \mu\text{m}$ มีค่า $25 \mu\text{m}$ ขนาด $2000 \mu\text{m}$ มีค่า $23 \mu\text{m}$ และขนาด $1500 \mu\text{m}$ มีค่า $37 \mu\text{m}$ ซึ่งสามารถหาค่าความไม่แน่นอนจากการผลิตดังสมการที่ 5.3 และสามารถคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเนื่องจากการผลิตได้ดังตารางที่ 5.5

$$\text{Uncertainty}_{\text{Fabrication}} = \sqrt{\text{Uncertainty}_{\text{Tool}}^2 + \text{Uncertainty}_{\text{Sample}}^2} \quad (\text{สมการที่ 5.3})$$

ตารางที่ 5.5 ตารางคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากการผลิต

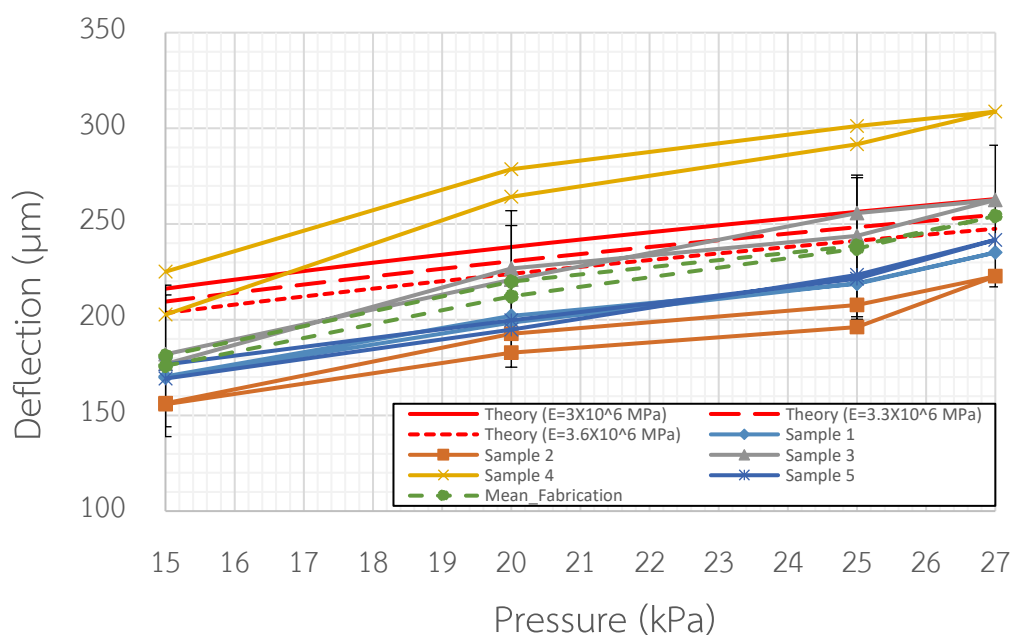
ขนาดของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์	Uncertainty _{Tool}	Uncertainty _{Fabrication}	Uncertainty _{Fabrication}
1500 μm	20 μm	31 μm	37 μm
2000 μm	20 μm	12 μm	23 μm
2500 μm	20 μm	25 μm	32 μm

หลังจากที่ได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด เราสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกกับแรงดันอากาศ โดยทำการเทียบระยะกระดกของชิ้นงานที่ 1 ถึงชิ้นงานที่ 5 รวม 5 ชิ้นงาน กับค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทั้ง 5 ที่คิดค่าความไม่แน่นอนจากการวัด ซึ่งจะได้ทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล ตามขนาดแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด 1500 μm (ตารางที่ 5.6) ขนาด 2000 μm (ตารางที่ 5.7) และขนาด 2500 μm (ตารางที่ 5.8) ซึ่งสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระยะกระดกกับแรงดันอากาศได้ 3 กราฟ คือ ขนาด 1500 μm (รูปที่ 5.10) ขนาด 2000 μm (รูปที่ 5.11) และ ขนาด 2500 μm (รูปที่ 5.12)

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ขนาด 1500 μm จากกระบวนการผลิต

แรงดัน อากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ (μm)						
	ชั้นงานที่ 1	ชั้นงานที่ 2	ชั้นงานที่ 3	ชั้นงานที่ 4	ชั้นงานที่ 5	เฉลี่ย 5 ชั้นงาน	SD
15	170	156	182	203	169	176 \pm 37	18
20	198	183	221	264	195	212 \pm 37	32
25	219	196	256	292	223	237 \pm 37	37
27	235	223	263	309	242	254 \pm 37	34
25	219	208	244	301	221	239 \pm 37	37
20	202	193	227	279	200	220 \pm 37	35
15	170	156	177	225	177	181 \pm 37	26

Pneumatic Actuator [1500 μm]

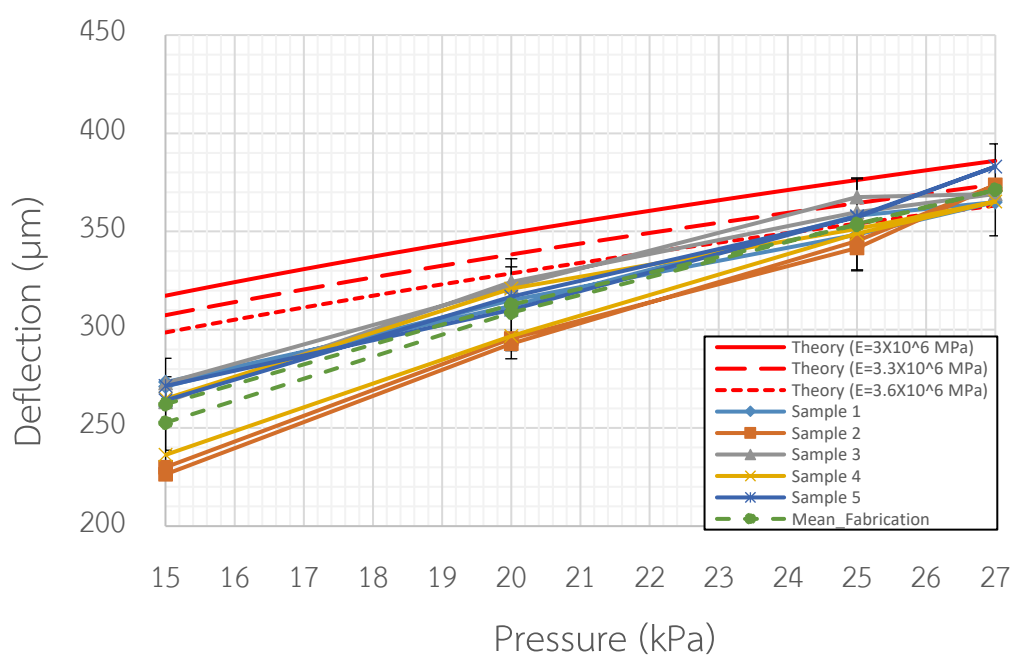


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ขนาด 1500 μm จากชั้นงานที่ 1-5

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากกระบวนการผลิต

แรงดัน อากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)						
	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ชิ้นงานที่ 4	ชิ้นงานที่ 5	เฉลี่ย 5 ชิ้นงาน	SD
15	273	226	263	236	264	253 \pm 23	20
20	312	293	324	297	317	309 \pm 23	13
25	358	345	360	349	357	354 \pm 23	6
27	365	374	369	365	383	371 \pm 23	7
25	349	342	368	351	358	353 \pm 23	10
20	315	295	322	321	310	313 \pm 23	11
15	271	230	273	265	271	262 \pm 23	18

Pneumatic Actuator [2000 μm]

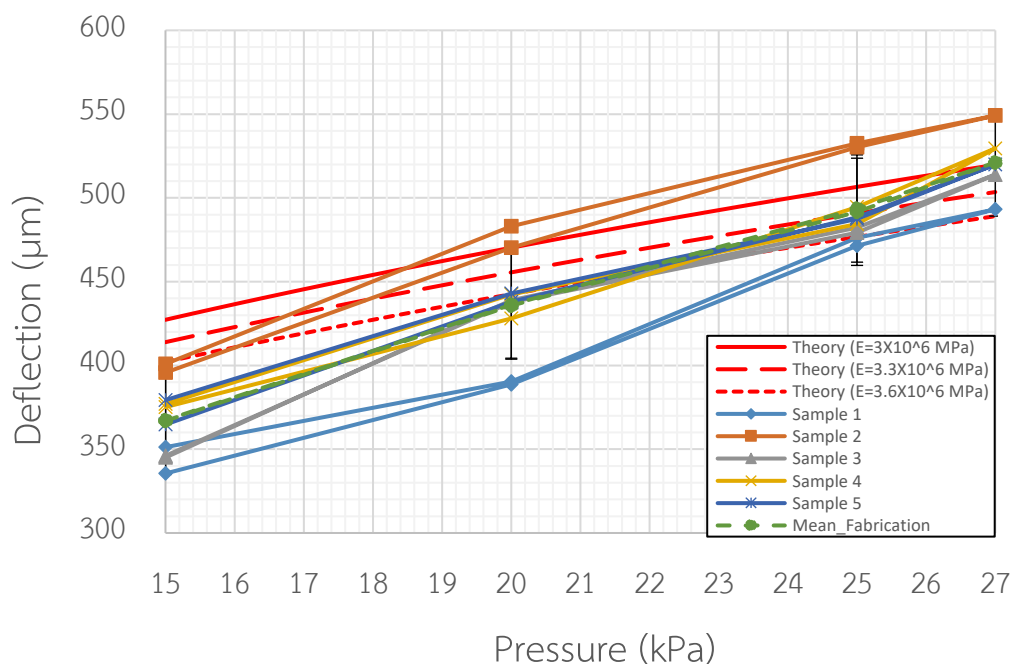


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากชิ้นงานที่ 1-5

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์
นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากกระบวนการผลิต

แรงดัน อากาศ (kPa)	ระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)						
	ชั้นงานที่ 1	ชั้นงานที่ 2	ชั้นงานที่ 3	ชั้นงานที่ 4	ชั้นงานที่ 5	เฉลี่ย 5 ชั้นงาน	SD
15	351	396	346	377	365	367 ± 32	20
20	390	470	438	442	438	436 ± 32	29
25	476	530	479	484	488	492 ± 32	22
27	493	549	514	530	520	521 ± 32	21
25	471	533	482	495	488	494 ± 32	23
20	389	483	439	428	443	436 ± 32	34
15	336	401	345	375	379	367 ± 32	27

Pneumatic Actuator [2500 μm]



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จาก
ชั้นงานที่ 1-5

5.7 ผลการทดลองที่เกิดจากการทดลองวัฏจักร

ผลของระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่เกิดจากการใช้งาน โดยการเปิดปิดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์อย่างต่อเนื่องซึ่งในการทดลองนี้จะทำการเฉลี่ยผลของระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์จากชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น ในแต่ละช่วงเวลาทดสอบ ซึ่งมีอยู่ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง แล้วทำการเทียบผลของระยะกระดกแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ ดังรูปที่ 5.4

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องจากการใช้งานสำหรับการทดสอบวัฏจักรสามารถหาได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเครื่องมือซึ่งมีค่า 20 μm และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยจากชิ้นงานที่ใช้งานใน 3 ช่วงเวลา โดยจะมี 3 ค่า ตามขนาดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด 2500 μm มีค่า 21 μm ขนาด 2000 μm มีค่า 22 μm และขนาด 1500 μm มีค่า 21 μm สามารถหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดจากการทดสอบวัฏจักรดังสมการที่ 5.4 และสามารถคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเนื่องจากการทดลองวัฏจักรได้ดังตารางที่ 5.9

$$\text{Uncertainty}_{\text{Cyclic}} = \sqrt{\text{Uncertainty}_{\text{Tool}}^2 + \text{Uncertainty}_{\text{Cyclic}}^2} \quad (\text{สมการที่ 5.4})$$

ตารางที่ 5.9 ตารางคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากการทดสอบวัฏจักร

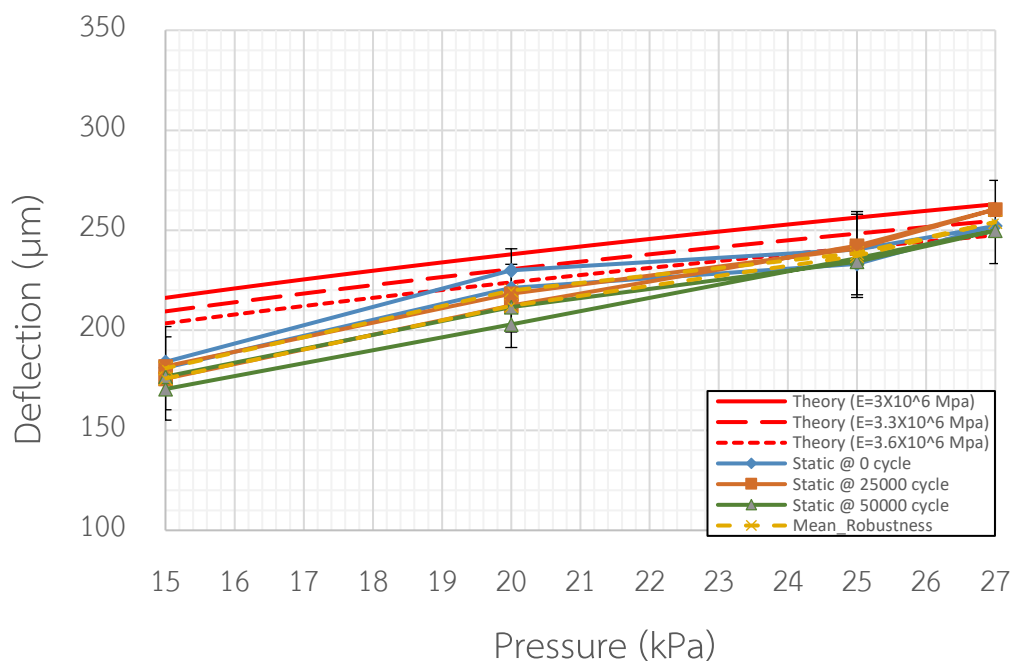
ขนาดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์	Uncertainty _{Tool}	Uncertainty _{Robustness}	Uncertainty _{Robustness}
1500 μm	20 μm	6 μm	21 μm
2000 μm	20 μm	9 μm	22 μm
2500 μm	20 μm	6 μm	21 μm

หลังจากที่ได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด เราสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกกับแรงดันอากาศ โดยทำการเทียบระยะกระดกตาม 3 ช่วงเวลากับค่าเฉลี่ยที่คิดค่าความไม่แน่นอนจากการวัด ซึ่งจะได้ทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล ตามขนาดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ คือ ขนาด 1500 μm (ตารางที่ 5.10) ขนาด 2000 μm (ตารางที่ 5.11) และขนาด 2500 μm (ตารางที่ 5.12) ซึ่งสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระยะกระดกกับแรงดันอากาศได้ 3 กราฟ คือ ขนาด 1500 μm (รูปที่ 5.13) ขนาด 2000 μm (รูปที่ 5.14) และขนาด 2500 μm (รูปที่ 5.15)

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการทดสอบวัฏจักร

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา
15	181	176	171	176 \pm 21
20	221	212	203	212 \pm 21
25	233	242	236	237 \pm 21
27	252	260	250	254 \pm 21
25	240	241	234	239 \pm 21
20	230	218	212	220 \pm 21
15	184	182	177	181 \pm 21

Pneumatic Actuator [1500 μm]

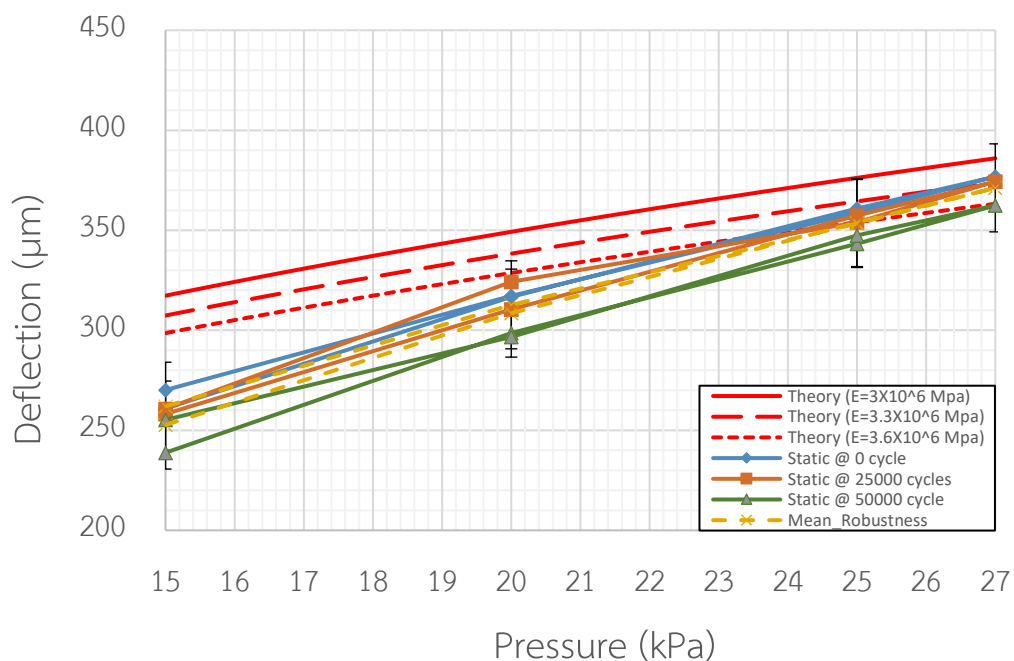


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกซ์ไอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากการทดสอบวัฏจักร

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกเฉลี่ยของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา
15	261	258	239	253±22
20	317	310	299	309±22
25	361	357	343	354±22
27	377	374	362	371±22
25	359	354	347	353±22
20	317	324	297	313±22
15	270	261	255	262±22

Pneumatic Actuator [2000 μm]

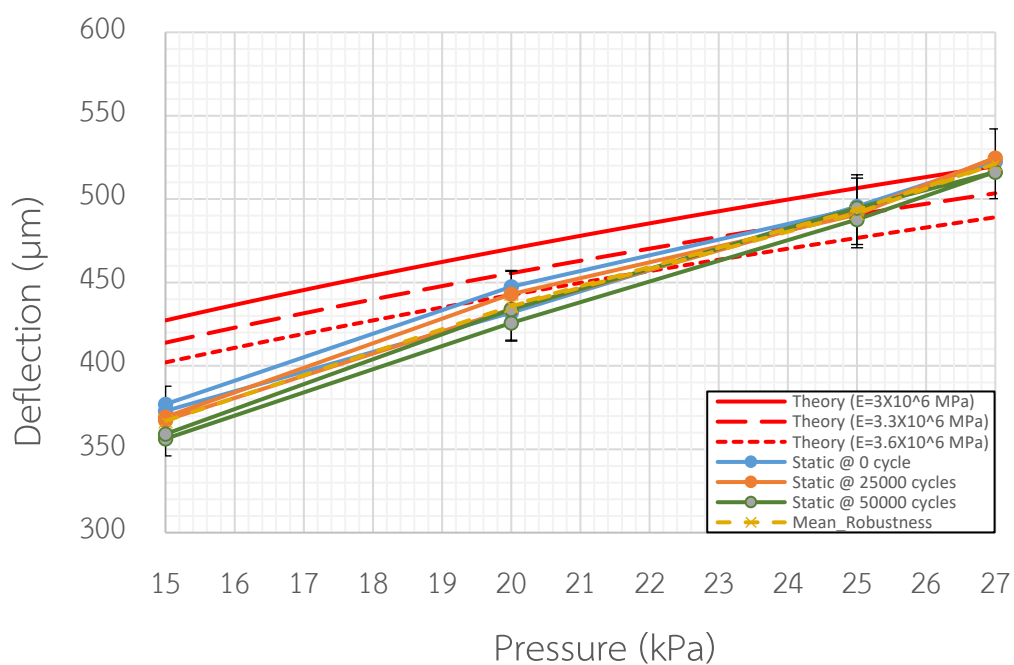


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา

ตารางที่ 5.12 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากการทดสอบวัฏจักร

แรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกเฉลี่ยของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ (μm)			
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ผลเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา
15	377	367	356	367 \pm 21
20	447	434	426	436 \pm 21
25	494	493	488	492 \pm 21
27	523	525	516	521 \pm 21
25	496	491	495	494 \pm 21
20	432	443	434	436 \pm 21
15	373	369	359	367 \pm 21

Pneumatic Actuator [2500 μm]



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบระยะกระดกของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm จากการทดลองใน 3 ช่วงเวลา

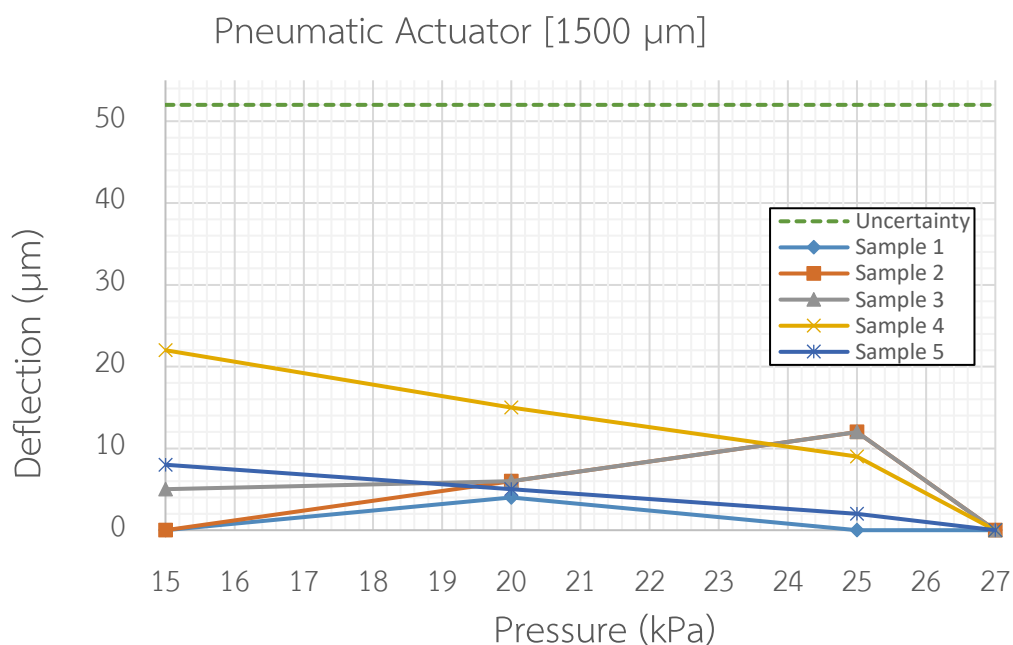
5.8 ผลการเกิดฮิสเทอรีซิส

การเกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในช่วงการเพิ่มแรงดันอากาศกับระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในช่วงการลดแรงดันอากาศที่แรงดันอากาศคงที่ที่เท่ากัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการเทียบระยะการกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ 4 ค่าแรงดันอากาศ คือ 15 kPa, 20 kPa, 25 kPa และ 27 kPa แล้วทำการเทียบกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัด โดยเงื่อนไขการเกิดฮิสเทอรีซิสให้เทียบกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากสมการที่ 5.5

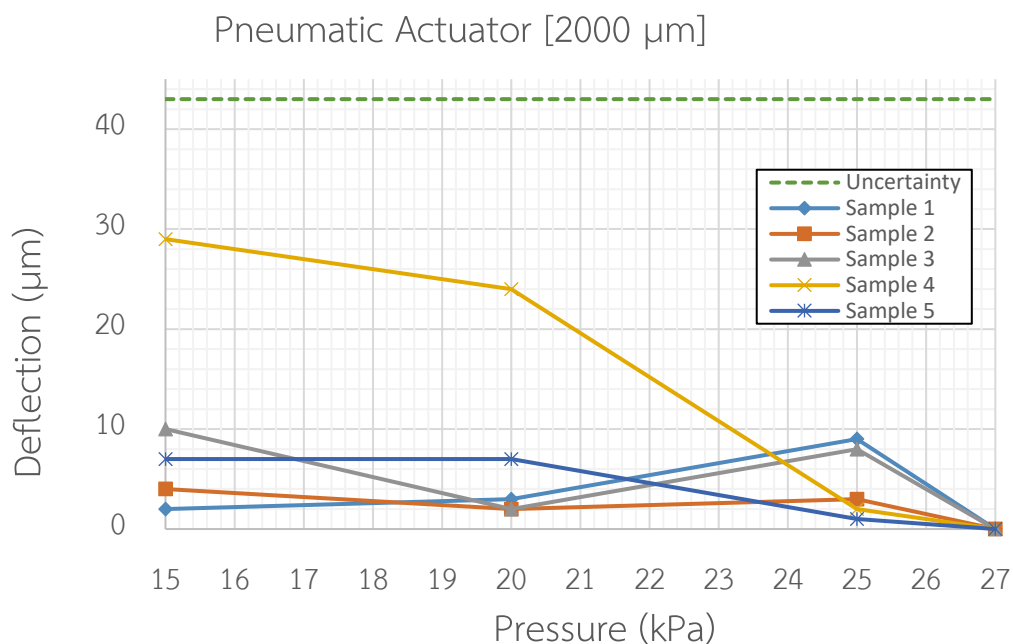
$$\text{Deflection}_{@Constant_Pressure} < \text{Uncertainty}_{Total} ; \text{No Hysteresis} \quad (\text{สมการที่ 5.5})$$

$$\text{Deflection}_{@Constant_Pressure} \geq \text{Uncertainty}_{Total} ; \text{Hysteresis}$$

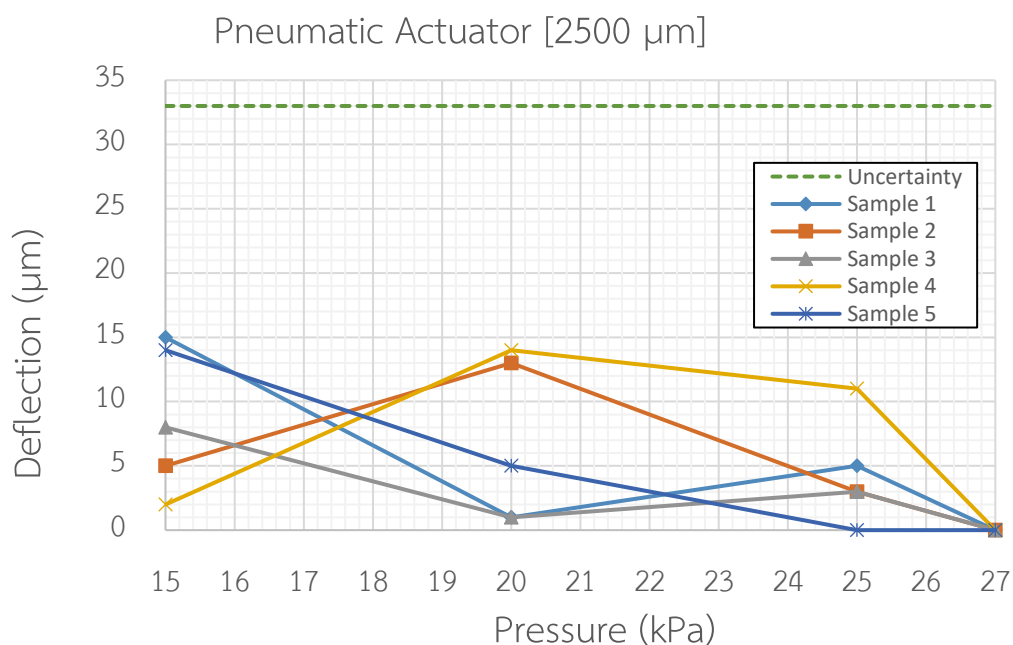
การเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้นกับค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่พิจารณาจากการติดตั้งและชิ้นงานของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทั้ง 3 ขนาด คือ ขนาด 1500 μm (รูปที่ 5.16) ขนาด 2000 μm (รูปที่ 5.17) และขนาด 2500 μm (รูปที่ 5.18)



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 1500 μm



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2000 μm



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบค่าฮิสเทอรีซิสกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของแอกชูเอเตอร์นิวเมติกส์ขนาด 2500 μm

5.9 ผลการทดลองระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จากความถี่

การทดสอบการให้สัญญาณความถี่ไปที่วาล์วควบคุมทิศทาง ที่ให้แรงดันอากาศคงที่ที่ 25 kPa โดยการควบคุมความถี่ 3 ค่า คือ 1 Hz, 5 Hz และ 20 Hz ตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จากการควบคุมสัญญาณความถี่คือชิ้นงานตัวอย่างที่ 3 โดยการคิดค่าความไม่แน่นอนในการวัดของกรณีนี้ จำเป็นต้องพิจารณาผลที่เกิดจากเครื่องมือ การติดตั้ง กระบวนการผลิต และวัฏจักรของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 5.6

$$\text{Uncertainty}_{\text{Total}} = \sqrt{\text{Uncertainty}_{\text{Tool}}^2 + \text{Uncertainty}_{\text{Sample}}^2} \quad (\text{สมการที่ 5.6})$$

การหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากผลของความถี่ สามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยทั้งจากเครื่องมือ การติดตั้ง กระบวนการผลิตและการทดสอบวัฏจักร ซึ่งจะได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากผลของความถี่ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ตารางคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากผลของความถี่

ขนาดของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์	Un_{Tool}	Un_{Setup}	$Un_{\text{Fabrication}}$	$Un_{\text{Robustness}}$	$\text{Uncertainty}_{\text{Total}}$
1500 μm	20 μm	22 μm	37 μm	21 μm	52 μm
2000 μm	20 μm	22 μm	23 μm	21 μm	43 μm
2500 μm	20 μm	6 μm	25 μm	6 μm	33 μm

การหาค่าเพื่อเปรียบเทียบในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาค่าระยะกระดกสูงสุดและต่ำสุด โดยเทียบกับระยะกระดกเฉลี่ยและคิดผลของความไม่แน่นอนจากการวัด

การให้ความถี่ 1 Hz ไปสั่งการทำงานของวาล์วควบคุมทิศทาง สามารถวัดระยะสูงสุดและต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ได้ จะเป็นดังตารางที่ 5.14 ซึ่งมาจากภาพที่บันทึกไว้ทั้งระยะกระดกสูงสุด (รูปที่ 5.19ก) ซึ่งระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เฉลี่ยของตัวอย่างที่ 3 และระยะกระดกต่ำสุด (รูปที่ 5.19ข) จะมีค่าเท่ากับ 0 μm เพราะฟิล์มบางสามารถคืนรูปกลับเป็นแบบเดิมได้เนื่องจากมีช่วงเวลาสำหรับการเปลี่ยนรูปร่าง

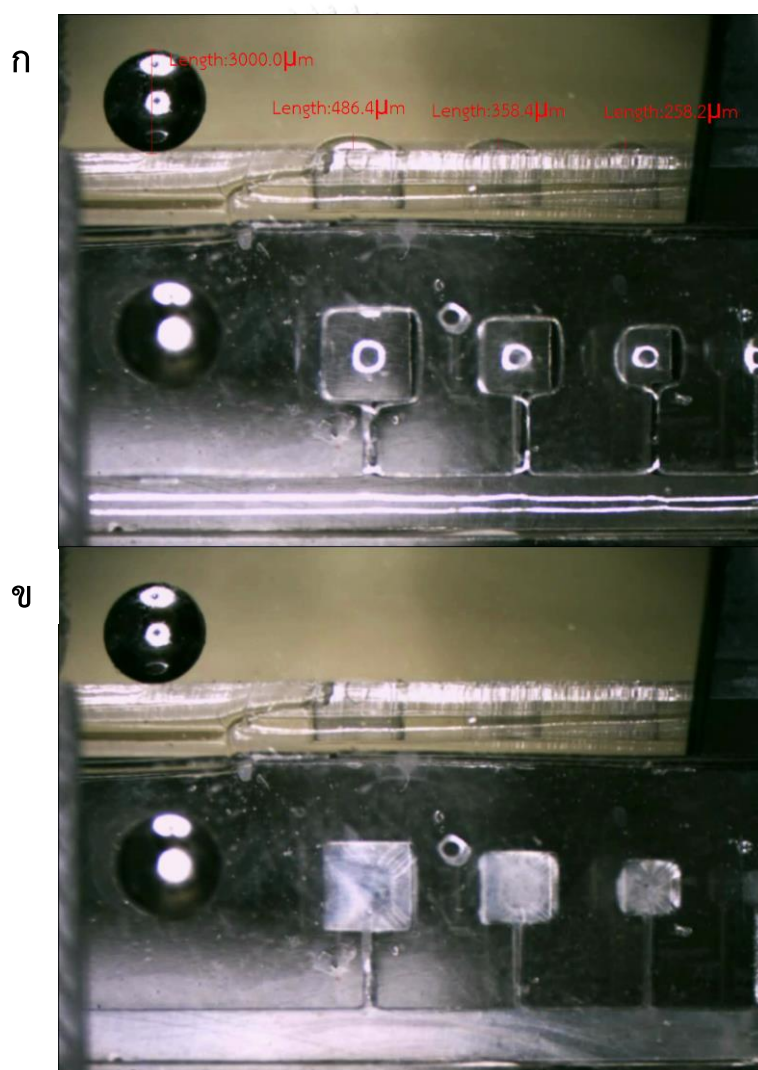
การให้ความถี่ 5 Hz ไปสั่งการทำงานของวาล์วควบคุมทิศทาง สามารถวัดระยะสูงสุดและต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ได้ ซึ่งระยะสูงสุดของระยะกระดกของแอกซ์เอ

เตอร์นิวเมติกส์จะมีค่าที่น้อยลง ในขณะที่ระยะต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ฟิล์มบางจะไม่ทันได้คืนรูปกลับไปทีจุด $0 \mu\text{m}$ เนื่องจากที่ความถี่นี้แอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์จะตอบสนองต่อความถี่ไม่ทัน ซึ่งความถี่ 5 Hz นี้ยังสามารถวัดค่าระยะสูงสุดและต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ได้อย่างชัดเจนด้วยการถ่ายภาพจากไฟลิวิดีโอที่ได้ทำการอัดไว้ในระหว่างการทดลองซึ่งจะได้ค่าระยะกระดกสูงสุด (รูปที่ 5.20ก) และระยะกระดกต่ำสุด (รูปที่ 5.20ข) ของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ดังตารางที่ 5.15

การให้ความถี่ 20 Hz ไปสั่งการทำงานของวาล์วควบคุมทิศทาง ทำให้การวัดระยะสูงสุดและต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์วัดได้ยาก เนื่องจากช่วงการกระดกในระหว่างการเปิดและปิดวาล์วควบคุมทิศทางตามความถี่ 20 Hz มีช่วงที่สั้นลงเนื่องจากที่ความถี่นี้แอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์จะตอบสนองต่อความถี่ไม่ทัน ทำให้ค่าระยะสูงสุดและต่ำสุดของระยะกระดกของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่วัดได้ออกมามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก การถ่ายภาพจากไฟลิวิดีโอที่ได้ทำการอัดไว้ในระหว่างการทดลองซึ่งจะได้ค่าระยะกระดกสูงสุด (รูปที่ 5.21ก) และระยะกระดกต่ำสุด (รูปที่ 5.21ข) ซึ่งค่าที่วัดได้ทั้งระยะกระดกสูงสุดและระยะกระดกต่ำสุดของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์จะมีค่าดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.14 ตารางระยะกระดกสูงสุดและต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ควบคุมด้วยความถี่ 1 Hz

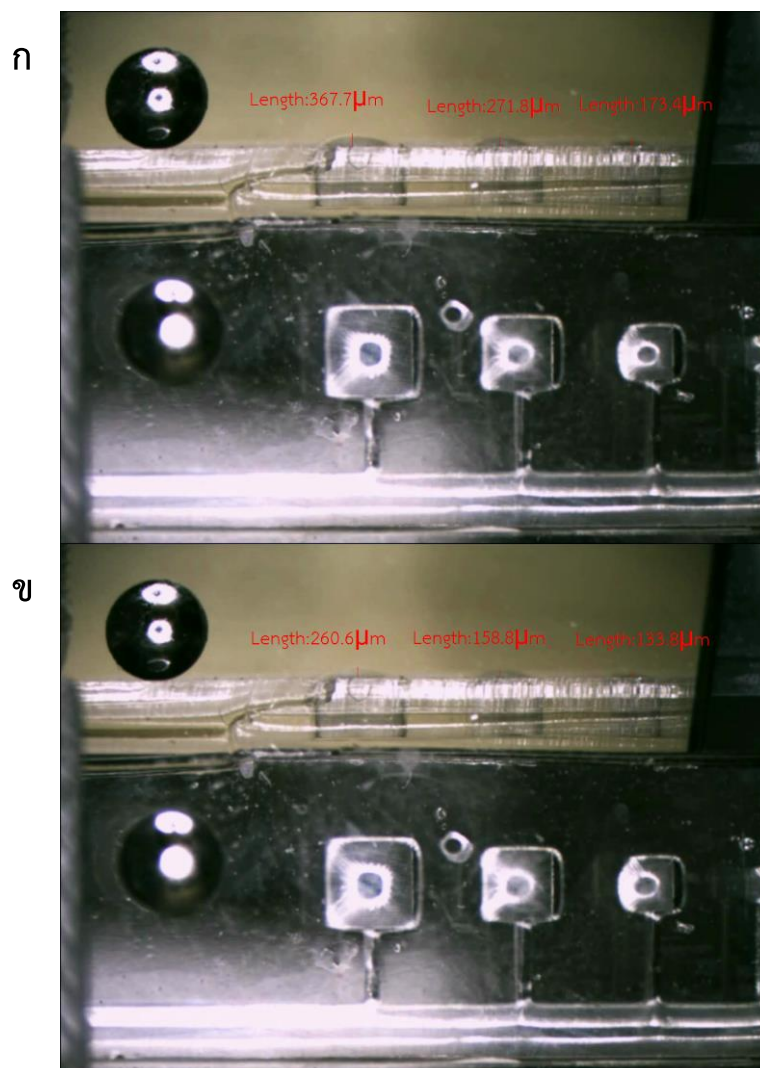
แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ขนาด	ระยะกระดกสูงสุด (μm)	ระยะกระดกต่ำสุด (μm)	ระยะกระดกเฉลี่ย (μm)
1500 μm	258	0	238 \pm 33
2000 μm	358	0	354 \pm 43
2500 μm	486	0	493 \pm 52



รูปที่ 5.19 (ก) ระยะกระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 1 Hz (ข) ระยะกระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 1 Hz

ตารางที่ 5.15 ตารางระยะกระดกสูงสุดและต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ควบคุมด้วยความถี่ 5 Hz

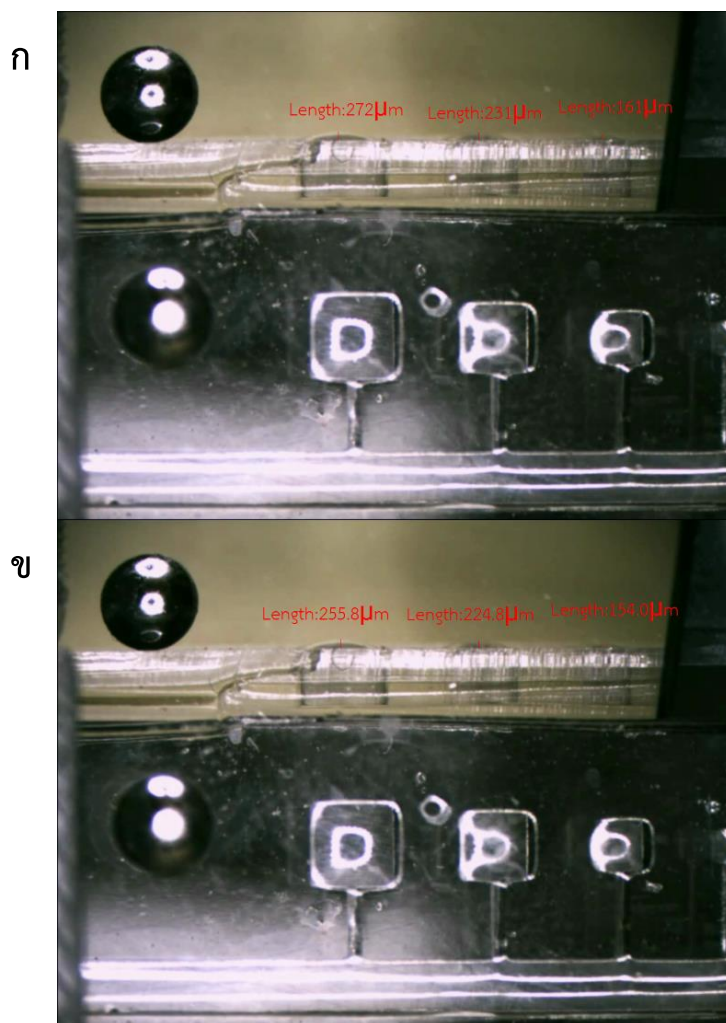
แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ขนาด	ระยะกระดกสูงสุด (μm)	ระยะกระดกต่ำสุด (μm)
1500 μm	173	134
2000 μm	272	159
2500 μm	368	262



รูปที่ 5.20 (ก) ระยะกระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 5 Hz (ข) ระยะกระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 5 Hz

ตารางที่ 5.16 ตารางระยะกระดกสูงสุดและต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ที่ควบคุมด้วยความถี่ 20 Hz

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ขนาด	ระยะกระดกสูงสุด (μm)	ระยะกระดกต่ำสุด (μm)
1500 μm	161	154
2000 μm	231	225
2500 μm	272	256



รูปที่ 5.21 (ก) ระยะกระดกสูงสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 20 Hz (ข) ระยะกระดกต่ำสุดของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ทดสอบด้วยความถี่ 20 Hz

5.10 สรุปคุณลักษณะของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์

ระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์จะทำการทดลอง 3 ขนาด คือ ขนาด 1500 μm 2000 μm และ 2500 μm ซึ่งสามารถวัดได้ในช่วง 15 kPa ขึ้นไปโดยการวัดค่าระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์แบบขึ้นบันไดในช่วง 15 kPa – 27 kPa

ส่วนค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ขึ้นงานทดสอบไม่เสียหายที่ 25 kPa สามารถวัดระยะกระดกเฉลี่ยโดยการคิดผลค่าความไม่แน่นอนจากการวัดได้ โดยขนาด 1500 μm ระยะกระดกจะได้ 238 \pm 52 μm ขนาด 2000 μm ระยะกระดกจะได้ 354 \pm 43 μm และขนาด 2500 μm ระยะกระดกจะได้ 493 \pm 33 μm

การทดสอบระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์โดยการให้ความถี่นั้นพบว่า ความถี่ที่ทำการทดสอบ 3 ความถี่ คือ 1 Hz, 5 Hz, 20Hz พบว่าความถี่ที่ตอบสนองได้ดีคือ 1 Hz เป็นความถี่ที่แอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้ดี เมื่อทำการเพิ่มความถี่ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์เฉลี่ยลดลง ช่วงระยะเวลาการกระดกและเวลาในการเคลื่อนที่ของฟิล์มบางสั้นลง จนเข้าใกล้ค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง

การทดสอบแบบวัฏจักร 50,000 ครั้ง โดยการวัดระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง พบว่าความแตกต่างของระยะกระดกไม่มากถือว่าค่าใกล้เคียงกันมาก (การกระจายข้อมูลต่ำ) สรุปได้ว่าแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์มีช่วงชีวิตทำงานได้อย่างน้อย 50000 ครั้ง

การนำผลของระยะกระดกของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์มาเปรียบเทียบกันแบบขึ้นงานต่อขึ้นงานจะพบมีค่าต่างกันมาก (การกระจายข้อมูลที่สูงมาก) กล่าวได้ว่าในการผลิตขึ้นงานแต่ละชิ้นค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างขึ้นงานแต่ละชิ้นจะไม่เท่ากันเนื่องจากยากต่อการควบคุม เช่น อัตราส่วนผสม PDMS ระยะเวลาในการแข็งตัว เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของขึ้นงานโดยตรง ดังนั้นการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต ถือเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญในอันดับต้นๆ

บทที่ 6

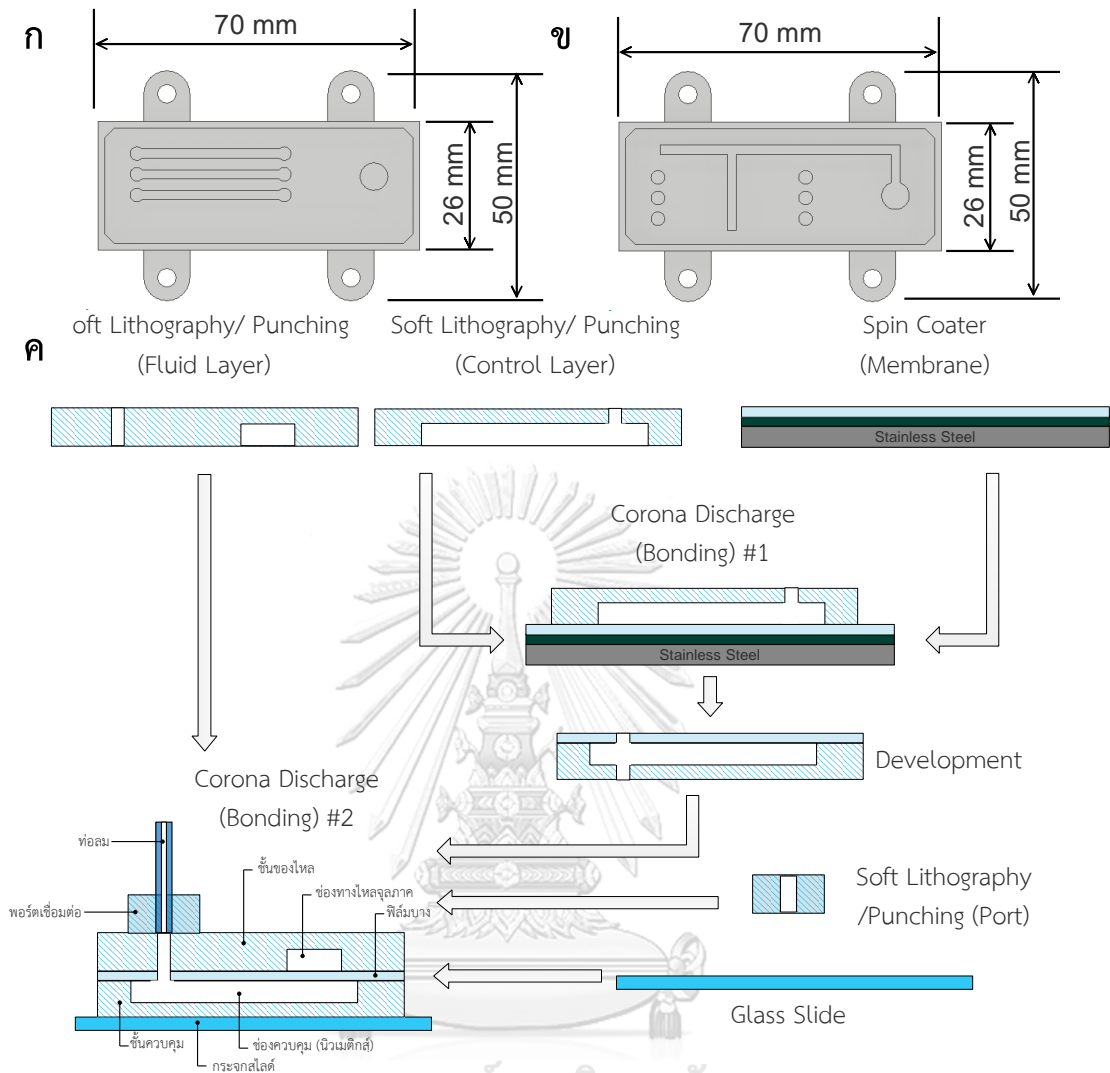
การทดสอบการรั่วไหล

บทที่ 6 นี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการใช้งานแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ โดยการสร้างชิพของไหลจุลภาคที่มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ ชั้นควบคุม ชั้นของไหล ฟิล์มบางและอุปกรณ์เชื่อมต่อ โดยจะทำการทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ในการเปิดปิดช่องทางไหลจุลภาคถึงประสิทธิภาพในการปิดไม่ให้ของไหลเกิดการรั่วไหลผ่านช่องทางไหลจุลภาค

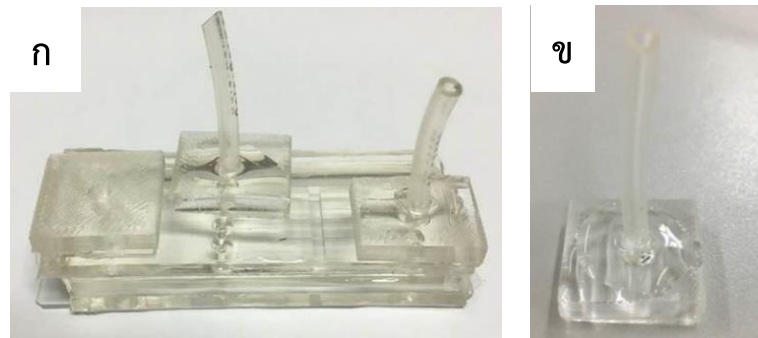
6.1 การสร้างชิพสำหรับทดสอบการรั่วไหล

ชิพของไหลจุลภาคสำหรับการทดสอบการรั่วไหลที่มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วน คือ ชั้นควบคุม ชั้นของไหล ฟิล์มบางและอุปกรณ์เชื่อมต่อ โดยชั้นควบคุม ชั้นของไหลและพอร์ตเชื่อมต่อจะสร้างด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ด้วยแม่พิมพ์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแสง UV (รูปที่ 6.1ก-ข) ในส่วนของฟิล์มบางจะทำการสร้างชั้นฟิล์มบางบนชั้นสังเวทย์ที่ทำจาก PVA ก่อนนำไปประสานด้วยวิธีคายประจุโคโรน่าและกำจัดชั้นสังเวทย์ หลังจากที่ได้ชั้นงานข้างต้นแล้ว ให้นำด้านชั้นของไหลและฟิล์มบางที่มีชั้นสังเวทย์ติดอยู่ มาประสานด้วยเทคนิคการคายประจุโคโรน่า ก่อนทำการล้างชั้นสังเวทย์ออก แล้วนำชิ้นงานที่ได้มาประสานกับชั้นควบคุม พอร์ตเชื่อมต่อและกระจกสไลด์ในภายหลัง (รูปที่ 6.2ก) โดยพอร์ตเชื่อมต่อสำหรับของเหลวควรทำการสอดท่อและหยอด PDMS เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหล (รูปที่ 6.2ข)

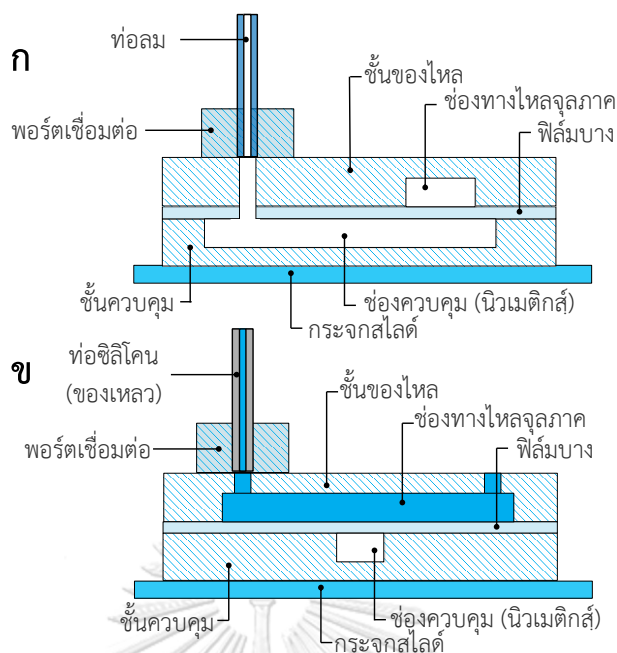
ขั้นตอนกระบวนการสร้างทั้งหมดสามารถสรุปได้ดัง รูปที่ 6.1ค ซึ่งโครงสร้างชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหลนี้เมื่อตัดขวางภาพในแนวช่องทางไหลจุลภาคชั้นควบคุม (รูปที่ 6.3ก) และช่องทางไหลจุลภาคชั้นควบคุม (รูปที่ 6.3ข)



รูปที่ 6.1 (ก) แม่พิมพ์ชั้นของไหลจุลภาคที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (ข) แม่พิมพ์ชั้นควบคุมที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (ค) กระบวนการสร้างชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหล



รูปที่ 6.2 (ก) ชิพทดสอบการรั่วไหล (ข) พอร์ตเชื่อมต่อของเหลวที่สอดท่อและหยอด PDMS แล้ว

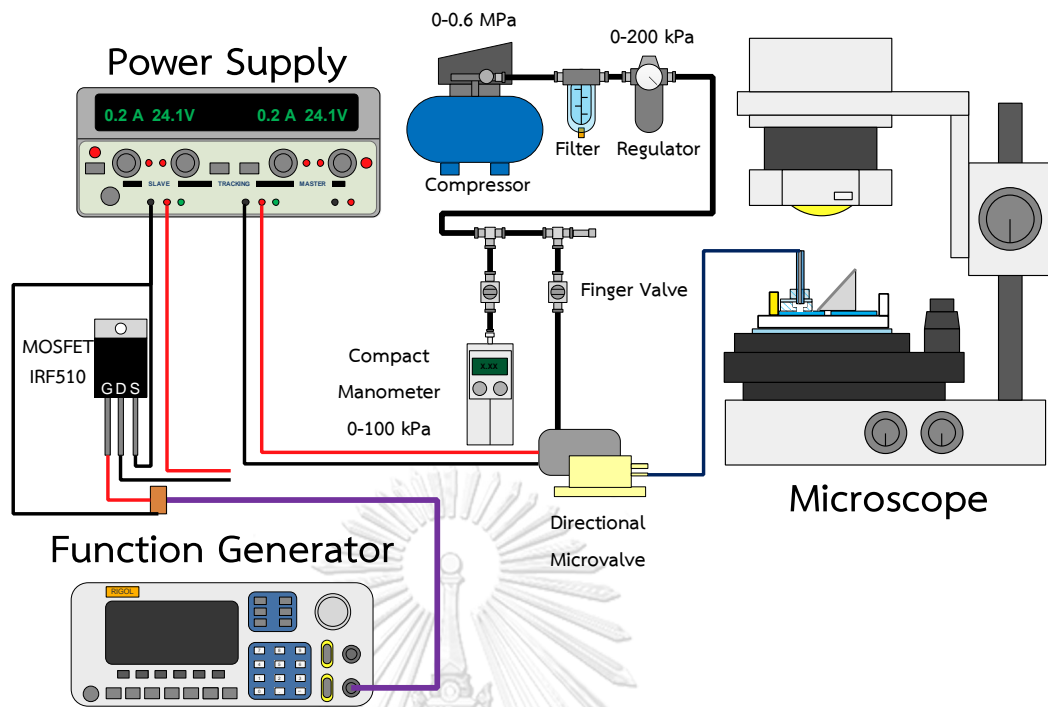


รูปที่ 6.3 (ก) ภาพตัดขวางชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหลตามแนวช่องทางไหลจุลภาคชั้นควบคุม
(ข) ภาพตัดขวางชิพสำหรับการทดสอบการรั่วไหลตามแนวช่องทางไหลจุลภาคชั้นของไหล

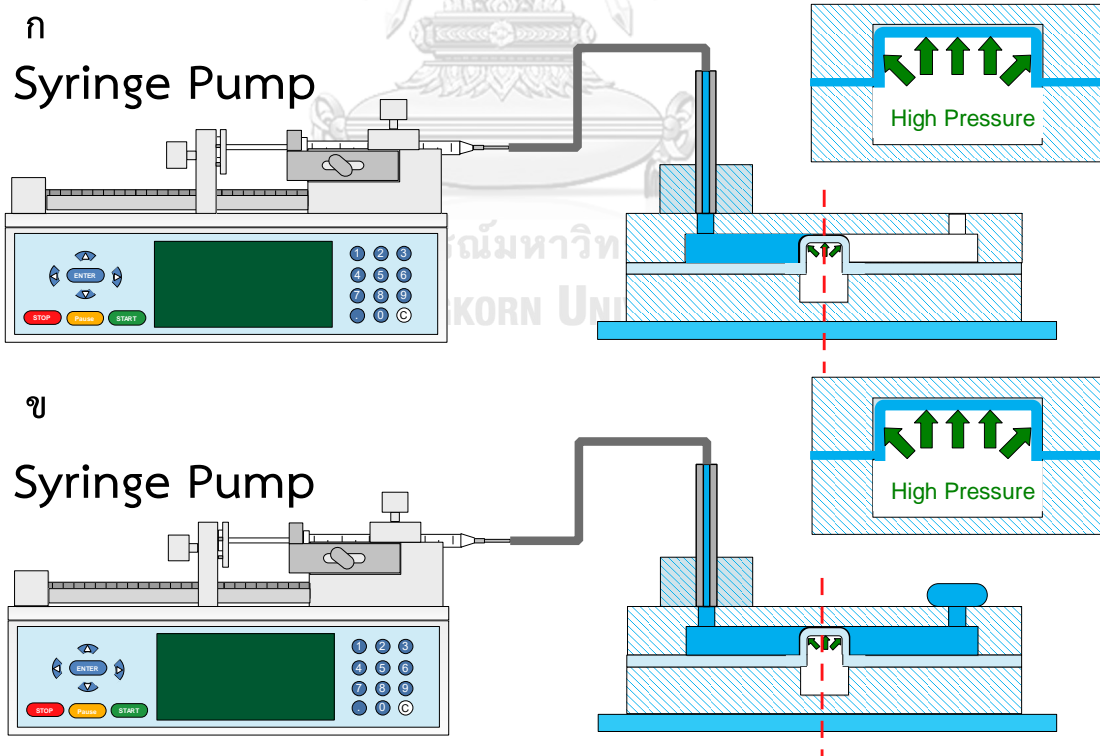
6.2 การทดสอบการรั่วไหลของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

อุปกรณ์ทดสอบนี้ได้ออกแบบให้ช่องทางไหลจุลภาคของชั้นควบคุม มีความกว้าง $2000\ \mu\text{m}$ และความสูง $2000\ \mu\text{m}$ ในขณะที่ช่องทางไหลจุลภาคของชั้นของไหลมีความกว้าง $2000\ \mu\text{m}$ และความสูง $300\ \mu\text{m}$ โดยส่วนที่มาซ้อนทับกันจะทำให้เกิดแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับควบคุมช่องทางไหลจุลภาคได้

ชิ้นงานที่ได้หลังจากกระบวนการสร้าง จะทำการทดสอบโดยการเปิดลมอัดจากชุดการติดตั้งนิวเมติกส์ที่ต่อเข้ากับวาล์วควบคุมทิศทางที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ $24\ \text{Vdc}$ (รูปที่ 6.4) เพื่อให้ฟิล์มบางเกิดการขยายตัวก่อนไปปิดช่องทางไหลจุลภาค ก่อนฉีดของเหลวใส่เข้าไปที่ช่องของไหลจุลภาคด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) (รุ่น Fusion200-Chemyx) เพื่อดูอัตราการไหลที่ทำให้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์เกิดการรั่วไหลได้ รูปที่ 6.5ก โดยการเพิ่มอัตราการไหลจนทำให้แอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ที่ให้ค่าแรงดันอากาศคงที่เกิดการรั่วไหลดังรูปที่ 6.5ข



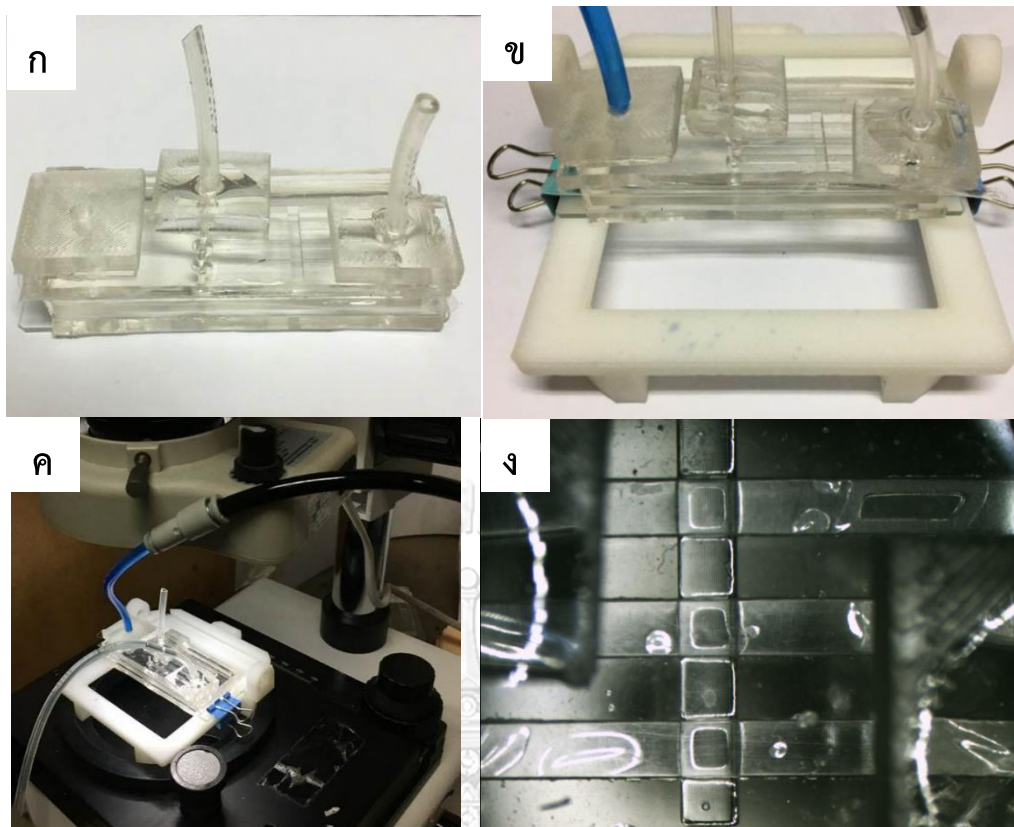
รูปที่ 6.4 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการฉีดโลหะของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์



รูปที่ 6.5 (ก) การให้ของเหลวใส่เข้าไปที่แอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ก่อนเกิดการฉีด (ข) การให้ของเหลวใส่ที่มีอัตราการไหลสูงขึ้นเข้าไปที่แอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ก่อนหลังการฉีด

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการเตรียมระบบนิวเมติกส์และระบบจ่ายไฟทางด้านวาล์วควบคุมทิศทางให้เรียบร้อย โดยทำการปรับแรงดันอากาศลงมาให้ 0 kPa และจ่ายไฟ 24 Vdc เข้าวาล์วควบคุมทิศทาง
2. นำกระบอกฉีดยาขนาด 10 ml มาดูคของเหลวที่มีสีก่อนจะนำไปติดตั้งที่เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) (รุ่น Fusion200-Chemyx)
3. ติดตั้งซีพสำหรับการทดสอบการรั่วไหล (รูปที่ 6.6ก) บนตัวจับยึดชิ้นงานและทำการเชื่อมต่อระบบควบคุมจากวาล์วควบคุมทิศทางและของเหลวจากกระบอกฉีดยาที่ติดตั้งกับเครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) (รูปที่ 6.6ข) ก่อนนำไปติดตั้งบนกล่องจุลทรรศน์ (รูปที่ 6.6ค) และปรับตำแหน่งและจุดโฟกัสของกล่องจุลทรรศน์แอดซิวเตอร์นิวเมติกส์ (รูปที่ 6.6ง)
4. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) โดยทำการเลือกยี่ห้อและปริมาตรของกระบอกฉีดยาให้ตรงกับกระบอกฉีดยาที่ใช้งาน โดยกำหนดโหมดการใช้งานให้เป็นการฉีด (Infusion)
5. ปรับระดับแรงดันอากาศจาก 0 kPa เพิ่มขึ้นไปจนถึง โดยสังเกตจากตำแหน่งที่ช่องนิวเมติกส์ในชั้นควบคุมและช่องของเหลวในชั้นของไหล ทับกันว่าฟิล์มบางเกิดการดันตัวติดกับผนังช่องทางไหลจุลภาคจนปิดสนิท
6. บันทึกวิดีโอ ทำการสั่งให้เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump) ทำงาน



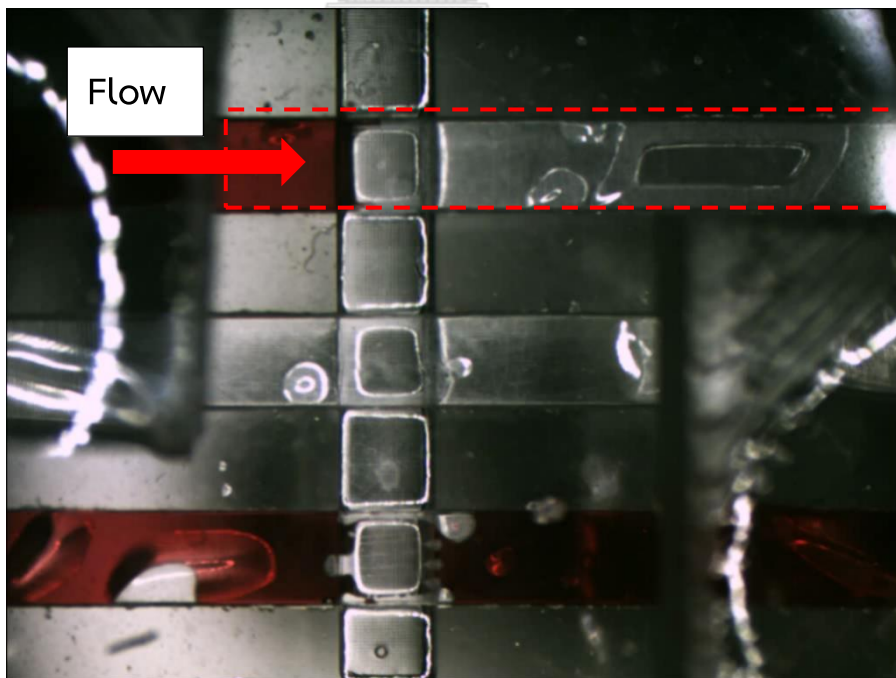
รูปที่ 6.6 (ก) ซิพทดสอบการรั่วไหลก่อนการติดตั้ง (ข) การติดตั้งซิพทดสอบการรั่วไหลบนตัวจับยึดชิ้นงาน (ค) การติดตั้งซิพทดสอบการรั่วไหลบนตัวจับยึดชิ้นงานบนกล่องจุลทรรศน์ (ง) ภาพโฟกัสตำแหน่งแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์สำหรับการบันทึกวิดีโอ

6.3 ผลการทดสอบการรั่วไหลของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์

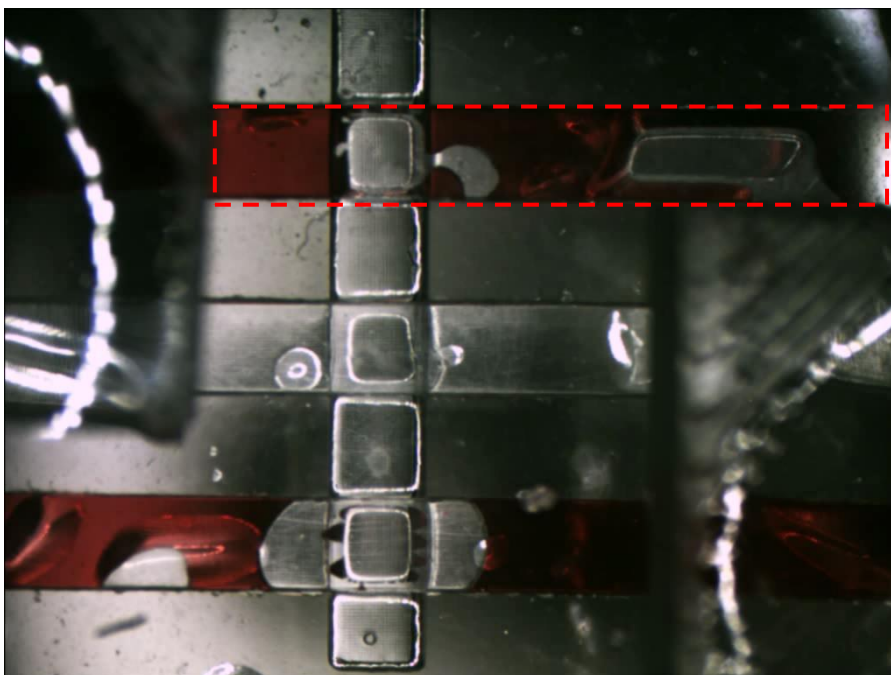
การทดสอบการป้องกันการรั่วไหลของแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์เริ่มจากการให้แรงดันอากาศกับแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ที่ 28 kPa และให้อัตราการไหลที่ 0.5 ml/min พบว่าแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์ ไม่สามารถปิดกั้นไม่ให้ของเหลวมีสีไหลผ่านได้ ทั้งนี้เกิดจากฟิล์มบางบางส่วนที่ไปติดกับผิวช่องทางไหลจุลภาคด้านชั้นของไหลในกระบวนการประสานชิ้นงาน (ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง) จึงทำการทดสอบแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์อีกตัวหนึ่ง ซึ่งสามารถเพิ่มแรงดันอากาศถึง 35 kPa และให้อัตราการไหลที่ 0.5 ml/min (ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง) พบว่าแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์สามารถปิดกั้นไม่ให้ของเหลวมีสีไหลผ่านได้ แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 1 ml/min พบว่าแอคซิวเอเตอร์นิวเมติกส์เกิดการรั่วไหล ดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง



รูปที่ 6.7 फिल्मบางบางส่วนในช่องทางไหลจุลภาคติดกับผนังของช่องทางไหล ทำให้ไม่สามารถปิดกั้นของเหลวได้



รูปที่ 6.8 แอคซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทำงานที่แรงดันอากาศ 35 kPa ปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค โดยมีอัตราการไหล 0.5 ml/min (ทดสอบที่ช่องทางไหลด้านบน)



รูปที่ 6. 9 แอคซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ทำงานที่แรงดันอากาศ 35 kPa ปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค โดยมี อัตราการไหล 1 ml/min (ทดสอบที่ช่องทางไหลด้านบน)

6.4 สรุปผลการทดสอบการรั่วไหลของแอคซ์เอเตอร์นิวเมติกส์

แอคซ์เอเตอร์นิวเมติกส์สามารถปิดกั้นของไหลได้ โดยการใช้แรงดันอากาศ 35 kPa ที่อัตราการไหล 0.5 ml/min แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลไปที่ 1 ml/min จะเกิดการรั่วไหล ซึ่งเมื่อพิจารณากับงานวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยการระบบกลไฟฟ้าขนาดจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งในส่วนการคัดแยกเซลล์ด้วยอุปกรณ์ท่อชนิดแบบเกลียวที่มีอัตราการไหล 1.0 ml/min กับส่วนการเพาะเลี้ยงเซลล์เดี่ยวในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมขนาดจุลภาคที่มีอัตราการไหล 1.0 ml/hr ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้มีอัตราการไหลที่ต่ำกว่าค่าที่ทำการทดลอง กล่าวคือ แอคซ์เอเตอร์ที่ทำการทดสอบนี้สามารถนำไปใช้งานจริงได้ แต่จำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการสร้างขั้นตอนการประสาน เนื่องจากฟิล์มบางมีโอกาสไปติดกับผนังของช่องทางไหลจุลภาคได้ ทำให้ไม่สามารถปิดช่องทางไหลจุลภาคได้ เนื่องจากเมื่อให้แรงดันอากาศฟิล์มจะไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพ

บทที่ 7

สรุปผลการศึกษา

บทที่ 7 นี้จะเป็นเนื้อหาอยู่ 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการสรุปผลการศึกษากระบวนการสร้างชิพทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ และการทดสอบแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ ตั้งแต่การทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ การทดสอบการปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค ส่วนที่ 2 นี้จะเป็นส่วนข้อแนะนำจากปัญหาที่พบเจอในกระบวนการสร้างชิพทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์และการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ การทดสอบการปิดกั้นช่องทางไหลจุลภาค ตลอดจนการนำแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ไปใช้งาน

7.1 สรุป

การศึกษากระบวนการสร้างชิพของไหลจุลภาคและฟิล์มบางด้วยวิธีที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว ทำโดยการสร้างแม่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับการหล่อขึ้นงาน ชั้นควบคุม, ชั้นของไหล และพอร์ตเชื่อมต่อด้วยวิธีซอฟต์แวร์ลิโทกราฟี (Soft Lithography) ซึ่งเป็ยวิธีที่ง่ายต่อการหล่อขึ้นงานแต่จะใช้เวลาในการแข็งตัวของ PDMS นานถึง 48 ชม. ทั้งนี้เกิดจากข้อจำกัดของวัสดุที่ทนอุณหภูมิสูงมากไม่ได้ ขณะที่การสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยงบนชั้นสังเวยเป็นวิธีที่ง่ายสำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง แต่ชั้น PVA ที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 100-120 °C เมื่อทำการล้างออกหลังจากการประสานจะกำจัดคราบค่อนข้างยาก ต้องให้คลื่นอัลตราโซนิกในการชะล้างคราบ PVA นานหลายชั่วโมง

การประสานขึ้นงานด้วยวิธีการคายประจุโคโรนาเป็นเทคนิคการเชื่อมประสานโดยการกระตุ้นพลาสมา (Plasma-Activated Bonding) ซึ่งใช้แท่งอิเล็กโทรดในการให้ประจุโคโรนาไปที่ผิวขึ้นงานโดยตรง ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้กับขึ้นงาน PDMS-PDMS ซึ่งปัญหาที่ใหญ่ที่พบคือ คุณภาพของผิวขึ้นงานก่อนการประสาน ซึ่งเกิดได้ทั้งจากแม่พิมพ์และการเก็บขึ้นงานระหว่างการรอเชื่อมประสาน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมประสานขึ้นงานลดลง ดังนั้นการปรับปรุงแม่พิมพ์ การเก็บรักษา และการทำความสะอาดผิวขึ้นงานก่อนการประสานจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

การศึกษาผลของขนาดของฟิล์มบางและการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อระยะกระดกของฟิล์มบาง จะเริ่มจากการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง โดยการทดสอบระยะกระดกของแอกซ์เอเตอร์นิวเมติกส์ จะทำบนกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเราไม่สามารถวางขึ้นงานบนแท่นของกล้องจุลทรรศน์ได้โดยตรง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์จับขึ้นงาน ในการจับขึ้นงานทดสอบให้อยู่นิ่ง เมื่อทำการให้แรงดัน

อากาศพบว่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเสียหาย คือ 25 kPa ในส่วนการสอบเทียบมิติเรขาคณิตสามารถทำได้โดยการวางเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน วางบนชิ้นงาน ซึ่งการวางให้ตรงตำแหน่งด้วยมือทำได้ยากและเกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งส่งผลให้ภาพเกิดการบิดเบือนไปจากความจริง การวัดขนาดมิติเรขาคณิตจากภาพสะท้อนด้านข้างของเม็ดลูกปัดที่มีความเที่ยงตรงขนาด 3000 ไมครอน ในแกน Y จะช่วยลดผลของค่าที่ได้จากการบิดเบือนของภาพได้

ขั้นตอนต่อไปคือการวัดระยะกระดกตัว โดยระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สามารถวัดได้ในช่วง 15 kPa ขึ้นไป ซึ่งจะเห็นแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ 3 ขนาดที่ชัดเจน คือ ขนาด 1500 μm , ขนาด 2000 μm และขนาด 2500 μm โดยการวัดค่าระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์แบบขั้นบันไดในช่วง 15 kPa – 27 kPa พบว่าส่วนค่าแรงดันอากาศสูงสุดที่ชิ้นงานทดสอบไม่เสียหายที่ 25 kPa สามารถวัดระยะกระดกเฉลี่ยโดยการคิดผลค่าความไม่แน่นอนจากการวัดได้ โดยขนาด 1500 μm ระยะกระดกจะได้ $238 \pm 52 \mu\text{m}$, ขนาด 2000 μm ระยะกระดกจะได้ $354 \pm 43 \mu\text{m}$ และขนาด 2500 μm ระยะกระดกจะได้ $493 \pm 33 \mu\text{m}$ ที่ค่าแรงดันอากาศคงที่ที่ 25 kPa

การทดสอบระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์โดยการให้ความถี่นั้นพบว่า ความถี่ที่ทำการทดสอบ 3 ความถี่ คือ 1 Hz, 5 Hz, 20Hz พบว่าความถี่ที่ตอบสนองได้ดีคือ 1 Hz เป็นความถี่ที่แอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้ดี เมื่อทำการเพิ่มความถี่ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์เฉลี่ยลดลง ช่วงระยะการกระดกและเวลาในการเคลื่อนที่ของฟิล์มบางสั้นลง จนเข้าใกล้ค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง

การทดสอบแบบวัฏจักร 50,000 ครั้ง โดยการวัดระยะกระดกของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ที่ 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง พบว่าความแตกต่างของระยะกระดกไม่เกิน 1 SD ถือว่าค่าใกล้เคียงกันมาก สรุปได้ว่าแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์มีช่วงชีวิตทำงานได้อย่างน้อย 50000 ครั้ง

การทดสอบการป้องกันการรั่วไหลของแอกซ์ฮอเตอร์นิวเมติกส์ สามารถป้องกันการรั่วไหลได้ โดยการให้แรงดันอากาศที่ 35 kPa ที่อัตราการไหล 0.5 ml/min แต่จะเกิดการรั่วไหลเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลเป็น 1 ml/min แต่ต้องระวังตอนประสานที่ฟิล์มบางมีโอกาสติดกับผนังของช่องทางไหลจุลภาค

7.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนา

หัวข้อข้อเสนอแนะในการพัฒนานี้ จะขอแบ่งออกเป็น 3 ประเด็นที่สำคัญ คือ การปรับปรุงกระบวนการผลิต การออกแบบช่องทางไหลจุลภาคเพื่อป้องกันการรั่วไหลและการนำแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ไปใช้งาน

7.2.1 การปรับปรุงกระบวนการผลิต

ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ คือ คุณภาพจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีความจำเป็นต้องควบคุมค่าพารามิเตอร์ในการสร้างชิ้นงานในแต่ละรอบการผลิตให้มีความใกล้เคียงกัน ควบคุมสภาพแวดล้อมในระหว่างการผลิตชิ้นงานและการเก็บรักษาสำหรับการประสานชิ้นงานไม่ให้ฝุ่นและความชื้นมาทำให้ผิวชิ้นงานสกปรก เพิ่มเวลาในการให้ประจุโคโรนาให้นานกว่าที่ทดลองในปัจจุบัน คือ ชี้นละ 2 นาที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในการทนแรงดันอากาศที่สูงกว่าค่าที่ทำกรทดลอง

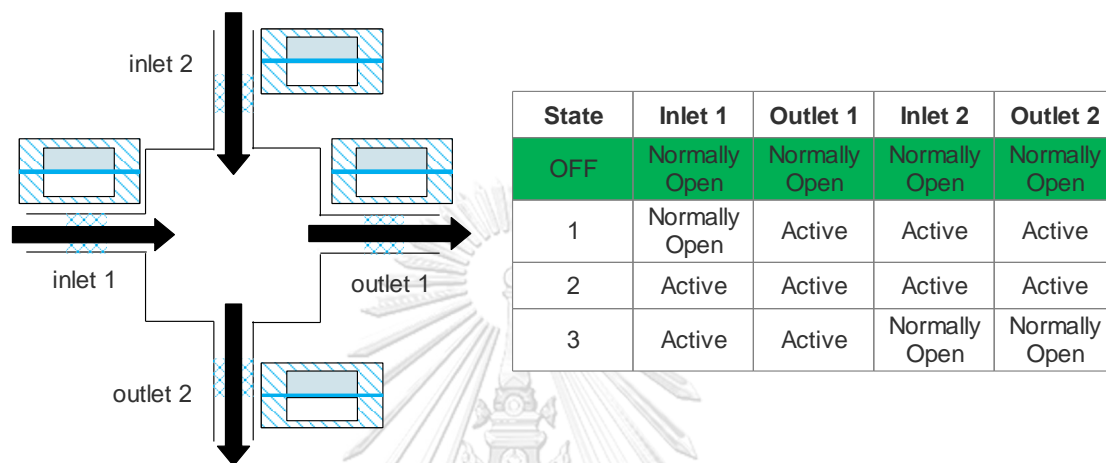
7.2.2 การออกแบบช่องทางไหลจุลภาคเพื่อป้องกันการรั่วไหล

การป้องกันการรั่วไหลของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นควรจะทำกรออกแบบตำแหน่งของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ ให้ฟิล์มบางแนบสนิทกับช่องทางไหลจุลภาคเมื่อรับแรงดันอากาศ ดังนั้นการออกแบบช่องทางไหลจุลภาคในช่วงแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ควรปรับให้เป็นลักษณะครึ่งกลม [53] หรือการใช้โพลีเมอร์ไวต่อแสงในการทำซิลในส่วนที่ฟิล์มบางไม่สามารถปิดช่องทางไหลได้ [46]

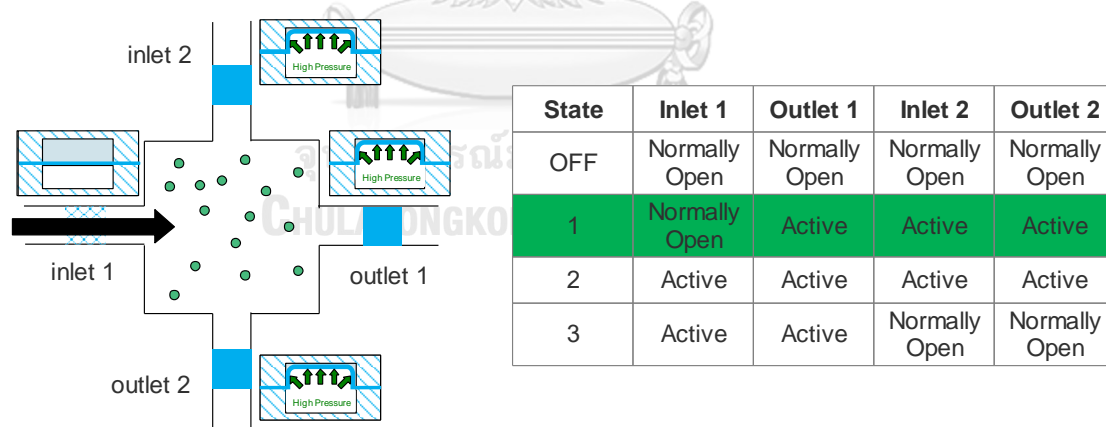
7.2.3 การนำแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ไปใช้งาน

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างส่วนของห้องสับเปลี่ยน (รูปที่ 2.6) เพื่อทำการลดอัตราการไหลจากส่วนคัตแยกเซลล์[2]ก่อนส่งออกไปให้ส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์[3] โดยการใช้ชุดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ทำงานเป็นลำดับขั้น ตั้งแต่การเตรียมชิพ (รูปที่ 7.1) ซึ่งจะทำให้การปล่อยยี่ห้อของเหลวสามารถไหลเข้ามาในชิพของไหลจุลภาคได้เพื่อเตรียมสำหรับการทดลอง ต่อมาเมื่อทำการคัตแยกเซลล์จากส่วนคัตแยกเซลล์ออกมาแล้ว เซลล์จะเคลื่อนที่เข้าไปที่ห้องสับเปลี่ยนโดยแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ด้านเอาท์เล็ท1 อินเล็ท2 และเอาท์เล็ท2 จะเปิดใช้งานเพื่อทำการการบรรจุเซลล์ (รูปที่ 7.2) ก่อนที่จะเปิดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ด้านอินเล็ท1 เพื่อทำการลดอัตราการไหล (รูป

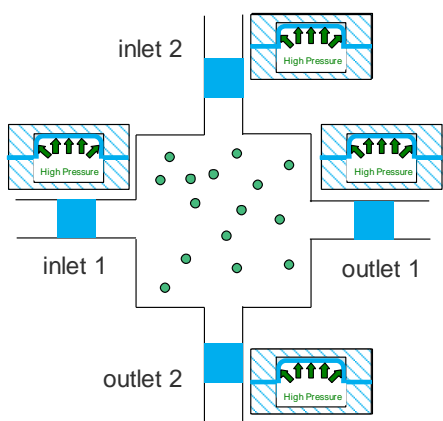
ที่ 7.3) โดยการเปลี่ยนเส้นทางไหลจากชุดอินเล็ตที่ 1 ที่มีอัตราการไหลสูงกว่าไปชุดอินเล็ตที่ 2 ที่มีอัตราการไหลต่ำกว่า ก่อนทำการการส่งเซลล์ออก () โดยการปิดแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ด้านอินเล็ตที่ 2 และเอาท์เล็ตที่ 2 เพื่อให้เซลล์ไหลไปสู่ส่วนดักจับเซลล์สำหรับการเพาะเลี้ยงเซลล์เดี่ยวต่อไป และการทำความสะอาดชิพ (รูปที่ 7.1) เมื่อเลิกใช้งานชิพของไหลจุลภาค



รูปที่ 7.1 การทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการเตรียมชิพและล้างทำความสะอาดชิพ

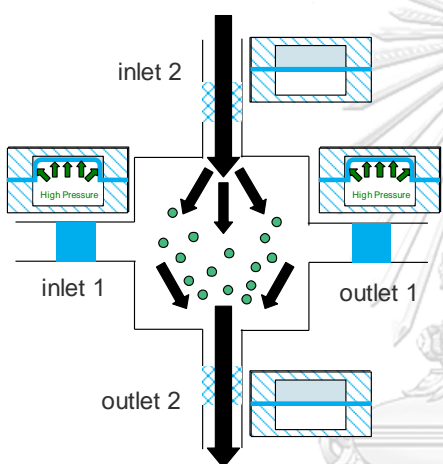


รูปที่ 7.2 การทำงานของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการบรรจุเซลล์



State	Inlet 1	Outlet 1	Inlet 2	Outlet 2
OFF	Normally Open	Normally Open	Normally Open	Normally Open
1	Normally Open	Active	Active	Active
2	Active	Active	Active	Active
3	Active	Active	Normally Open	Normally Open

รูปที่ 7.3 การทำงานของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการลอคอัตราการไหล



State	Inlet 1	Outlet 1	Inlet 2	Outlet 2
OFF	Normally Open	Normally Open	Normally Open	Normally Open
1	Normally Open	Active	Active	Active
2	Active	Active	Active	Active
3	Active	Active	Normally Open	Normally Open

รูปที่ 7.4 การทำงานของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์ในห้องสับเปลี่ยน ในขั้นตอนการปล่อยเซลล์เข้าสู่ส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์

รายการอ้างอิง

- [1] A. Valizadeh and A. Y. Khosroushahi, "Single-cell analysis based on lab on a chip fluidic system," *Analytical Methods*, vol. 7, no. 20, pp. 8524-8533, 2015.
- [2] อรรถวุฒิ ถนอมศรีเดชชัย, "การคัดแยกเซลล์ด้วยขนาดโดยใช้ท่อจุลภาครูปร่างขดเกลียว," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [3] เทวัญ ตงมณี, "การศึกษาเทคนิคหลุมขนาดจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยมสำหรับการดักจับอนุภาคขนาดจุลภาค," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [4] D. Popa, *Microactuators*. 2014, pp. 1-6.
- [5] W. O. Kwang and H. A. Chong, "A review of microvalves," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 5, pp. R13-R39, 2006.
- [6] H. Y. Tan, W. K. Loke, and N.-T. Nguyen, "A reliable method for bonding polydimethylsiloxane (PDMS) to polymethylmethacrylate (PMMA) and its application in micropumps," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 151, no. 1, pp. 133-139, 11/26/ 2010.
- [7] C. Ohm and C. K. Ober, "From surface coatings to polymer nanofilms: lifting off polymer brushes," *RSC Advances*, vol. 3, no. 40, pp. 18482-18488, 2013.
- [8] J. M. Karlsson, H. Tommy, C. Carl Fredrik, H. Jonas, R. Aman, and W. Wouter van der, "Fabrication and transfer of fragile 3D PDMS microstructures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, no. 8, p. 085009, 2012.
- [9] L. Dong, M. Cornaglia, T. Lehnert, and M. A. M. Gijs, "Versatile size-dependent sorting of *C. elegans* nematodes and embryos using a tunable microfluidic filter structure," *Lab on a Chip*, vol. 16, no. 3, pp. 574-585, 2016.
- [10] S.-B. Huang, M.-H. Wu, and G.-B. Lee, "A tunable micro filter modulated by pneumatic pressure for cell separation," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 142, no. 1, pp. 389-399, 10/12/ 2009.
- [11] C. D. Chin, V. Linder, and S. K. Sia, "Lab-on-a-chip devices for global health: Past studies and future opportunities," *Lab on a Chip*, vol. 7, no. 1, pp. 41-57, 2007.

- [12] C. Dusny and A. Schmid, "Microfluidic single-cell analysis links boundary environments and individual microbial phenotypes," *Environmental Microbiology*, vol. 17, no. 6, pp. 1839-1856, 2015.
- [13] B. Harink, S. Le Gac, R. Truckenmuller, C. van Blitterswijk, and P. Habibovic, "Regeneration- on- a- chip? The perspectives on use of microfluidics in regenerative medicine," *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 18, pp. 3512-3528, 2013.
- [14] A. K. Au, H. Lai, B. R. Utela, and A. Folch, "Microvalves and Micropumps for BioMEMS," *Micromachines*, vol. 2, no. 2, p. 179, 2011.
- [15] Y. Zheng, W. Dai, and H. Wu, "A screw-actuated pneumatic valve for portable, disposable microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 3, pp. 469-472, 2009.
- [16] M.-E. Brett, S. Zhao, J. L. Stoia, and D. T. Eddington, "Controlling flow in microfluidic channels with a manually actuated pin valve," *Biomedical Microdevices*, journal article vol. 13, no. 4, pp. 633-639, August 01 2011.
- [17] C.-Y. Chen, C.-H. Chen, T.-Y. Tu, C.-M. Lin, and A. M. Wo, "Electrical isolation and characteristics of permanent magnet- actuated valves for PDMS microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 11, no. 4, pp. 733-737, 2011.
- [18] J. Casals-Terré *et al.*, *Design, fabrication and characterization of an externally actuated ON/OFF microvalve*. 2008, pp. 600-606.
- [19] K. Pitchaimani, B. C. Sapp, A. Winter, A. Gispanski, T. Nishida, and Z. Hugh Fan, "Manufacturable plastic microfluidic valves using thermal actuation," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 21, pp. 3082-3087, 2009.
- [20] K. Khoshmanesh, A. Almansouri, H. Albloushi, P. Yi, R. Soffe, and K. Kalantar-zadeh, "A multi-functional bubble-based microfluidic system," Article vol. 5, p. 9942, 2015.
- [21] B. Yang and Q. Lin, "A latchable microvalve using phase change of paraffin wax," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 134, no. 1, pp. 194-200, 2007/02/28/ 2007.
- [22] A. V. Desai, J. D. Tice, C. A. Apblett, and P. J. A. Kenis, "Design considerations for electrostatic microvalves with applications in poly(dimethylsiloxane)-based microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 12, no. 6, pp. 1078-1088, 2012.

- [23] J. D. Tice, T. A. Bassett, A. V. Desai, C. A. Apblett, and P. J. A. Kenis, "A monolithic poly(dimethylsiloxane) electrostatic actuator for controlling integrated pneumatic microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 196, pp. 22-29, 2013/07/01/ 2013.
- [24] L. Gui and C. L. Ren, "Exploration and evaluation of embedded shape memory alloy (SMA) microvalves for high aspect ratio microchannels," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 168, no. 1, pp. 155-161, 2011/07/01/ 2011.
- [25] S. Lesher-Perez, P. Weerappuli, S. - J. Kim, C. Zhang, and S. Takayama, "Predictable Duty Cycle Modulation through Coupled Pairing of Syringes with Microfluidic Oscillators," *Micromachines*, vol. 5, no. 4, p. 1254, 2014.
- [26] R. Gorkin *et al.*, "Centrifugal microfluidics for biomedical applications," *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 14, pp. 1758-1773, 2010.
- [27] K. A. Addae-Mensah, Y. K. Cheung, V. Fekete, M. S. Rendely, and S. K. Sia, "Actuation of elastomeric microvalves in point-of-care settings using handheld, battery-powered instrumentation," *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 12, pp. 1618-1622, 2010.
- [28] U. Pliquet, R. P. Joshi, V. Sridhara, and K. H. Schoenbach, "High electrical field effects on cell membranes," *Bioelectrochemistry*, vol. 70, no. 2, pp. 275-282, 2007/05/01/ 2007.
- [29] L. A. Sonna, J. Fujita, S. L. Gaffin, and C. M. Lilly, "Invited Review: Effects of heat and cold stress on mammalian gene expression," *Journal of Applied Physiology*, vol. 92, no. 4, pp. 1725-1742, 2002.
- [30] D. Irimia, "Pneumatic Valves," in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, D. Li, Ed. Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 1-4.
- [31] H. Kim and J. Kim, "A microfluidic-based dynamic microarray system with single-layer pneumatic valves for immobilization and selective retrieval of single microbeads," *Microfluidics and Nanofluidics*, journal article vol. 16, no. 4, pp. 623-633, April 01 2014.
- [32] G. Shao *et al.*, "Design, fabrication and test of a pneumatically controlled, renewable, microfluidic bead trapping device for sequential injection analysis applications," *Analyst*, vol. 141, no. 1, pp. 206-215, 2016.

- [33] G. A. Cooksey, C. G. Sip, and A. Folch, "A multi-purpose microfluidic perfusion system with combinatorial choice of inputs, mixtures, gradient patterns, and flow rates," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 3, pp. 417-426, 2009.
- [34] B. Mosadegh *et al.*, "Control of soft machines using actuators operated by a Braille display," *Lab on a Chip*, vol. 14, no. 1, pp. 189-199, 2014.
- [35] D. H. Yoon, D. Wakui, A. Nakahara, T. Sekiguchi, and S. Shoji, "Selective droplet sampling using a minimum number of horizontal pneumatic actuators in a high aspect ratio and highly flexible PDMS device," *RSC Advances*, vol. 5, no. 3, pp. 2070-2074, 2015.
- [36] A. Jamshaid, M. Igaki, D. Yoon, T. Sekiguchi, and S. Shoji, "Controllable Active Micro Droplets Merging Device Using Horizontal Pneumatic Micro Valves," *Micromachines*, vol. 4, no. 1, pp. 34-48, 2013.
- [37] J.-H. Choi, S.-K. Lee, J.-M. Lim, S.-M. Yang, and G.-R. Yi, "Designed pneumatic valve actuators for controlled droplet breakup and generation," *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 4, pp. 456-461, 2010.
- [38] C. K. Byun, K. Abi-Samra, Y.-K. Cho, and S. Takayama, "Pumps for microfluidic cell culture," *ELECTROPHORESIS*, vol. 35, no. 2-3, pp. 245-257, 2014.
- [39] E. Berthier, E. W. K. Young, and D. Beebe, "Engineers are from PDMS-land, Biologists are from Polystyrenia," *Lab on a Chip*, vol. 12, no. 7, pp. 1224-1237, 2012.
- [40] J. C. McDonald and G. M. Whitesides, "Poly(dimethylsiloxane) as a Material for Fabricating Microfluidic Devices," *Accounts of Chemical Research*, vol. 35, no. 7, pp. 491-499, 2002/07/01 2002.
- [41] K. Khanafer, A. Duprey, M. Schlicht, and R. Berguer, "Effects of strain rate, mixing ratio, and stress– strain definition on the mechanical behavior of the polydimethylsiloxane (PDMS) material as related to its biological applications," *Biomedical Microdevices*, journal article vol. 11, no. 2, p. 503, 2008.
- [42] I. D. Johnston, D. K. McCluskey, C. K. L. Tan, and M. C. Tracey, "Mechanical characterization of bulk Sylgard 184 for microfluidics and microengineering," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 24, no. 3, p. 035017, 2014.

- [43] E. Sollier, C. Murray, P. Maoddi, and D. Di Carlo, "Rapid prototyping polymers for microfluidic devices and high pressure injections," *Lab on a Chip*, vol. 11, no. 22, pp. 3752-3765, 2011.
- [44] J. Wu and M. Gu, "Microfluidic sensing: state of the art fabrication and detection techniques," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 16, no. 8, pp. 080901-080901-12, 2011.
- [45] G. Jenkins, "Rapid Prototyping of PDMS Devices Using SU-8 Lithography," in *Microfluidic Diagnostics: Methods and Protocols*, G. Jenkins and C. D. Mansfield, Eds. Totowa, NJ: Humana Press, 2013, pp. 153-168.
- [46] W. Park, S. Han, and S. Kwon, "Fabrication of membrane-type microvalves in rectangular microfluidic channels via seal photopolymerization," *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 20, pp. 2814-2817, 2010.
- [47] H. Rodrigue, B. Bhandari, W. Wang, and S.-H. Ahn, "3D soft lithography: A fabrication process for thermocurable polymers," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 217, pp. 302-309, 2015/03/01/ 2015.
- [48] A. D. Mazzeo and D. E. Hardt, "Centrifugal Casting of Microfluidic Components With PDMS," *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, vol. 1, no. 2, pp. 021001-021001-8, 2013.
- [49] C. C. Glick *et al.*, "Rapid assembly of multilayer microfluidic structures via 3D-printed transfer molding and bonding," *Article* vol. 2, p. 16063, 11/21/online 2016.
- [50] R. Gu *et al.*, "Stretching-tunable metal gratings fabricated on an elastomeric substrate using a water-soluble sacrificial layer," *Applied Physics A*, journal article vol. 121, no. 2, pp. 335-341, November 01 2015.
- [51] V. Linder, B. D. Gates, D. Ryan, B. A. Parviz, and G. M. Whitesides, "Water-Soluble Sacrificial Layers for Surface Micromachining," *Small*, vol. 1, no. 7, pp. 730-736, 2005.
- [52] H. N. Chan, Y. Chen, Y. Shu, Y. Chen, Q. Tian, and H. Wu, "Direct, one-step molding of 3D-printed structures for convenient fabrication of truly 3D PDMS microfluidic chips," *Microfluidics and Nanofluidics*, journal article vol. 19, no. 1, pp. 9-18, July 01 2015.

- [53] M. Kaminaga, T. Ishida, and T. Omata, "Fabrication of Pneumatic Microvalve for Tall Microchannel Using Inclined Lithography," *Micromachines*, vol. 7, no. 12, p. 224, 2016.
- [54] K. Stephan *et al.*, "Fast prototyping using a dry film photoresist: microfabrication of soft- lithography masters for microfluidic structures," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 10, p. N69, 2007.
- [55] K.-I. Kamei *et al.*, *3D printing of soft lithography mold for rapid production of polydimethylsiloxane- based microfluidic devices for cell stimulation with concentration gradients*. 2015.
- [56] C. M. B. Ho, S. H. Ng, K. H. H. Li, and Y.-J. Yoon, "3D printed microfluidics for biological applications," *Lab on a Chip*, vol. 15, no. 18, pp. 3627-3637, 2015.
- [57] N. Bhattacharjee, A. Urrios, S. Kang, and A. Folch, "The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 16, no. 10, pp. 1720-1742, 2016.
- [58] S. Wu, J. Serbin, and M. Gu, "Two-photon polymerisation for three-dimensional micro-fabrication," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 181, no. 1, pp. 1-11, 2006.
- [59] M. Leester-Schädel, T. Lorenz, F. Jürgens, and C. Richter, "Fabrication of Microfluidic Devices," in *Microsystems for Pharmatechnology: Manipulation of Fluids, Particles, Droplets, and Cells*, A. Dietzel, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 23-57.
- [60] K. F. Lei, "Chapter 1 Materials and Fabrication Techniques for Nano- and Microfluidic Devices," in *Microfluidics in Detection Science: Lab-on-a-chip Technologies*: The Royal Society of Chemistry, 2015, pp. 1-28.
- [61] D. J. Guckenberger, E. Berthier, E. W. K. Young, and D. J. Beebe, "Induced hydrophobic recovery of oxygen plasma-treated surfaces," *Lab on a Chip*, vol. 12, no. 13, pp. 2317-2321, 2012.
- [62] A. E. Mark, A. J. Michael, and K. G. Bruce, "Determining the optimal PDMS–PDMS bonding technique for microfluidic devices," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 6, p. 067001, 2008.

- [63] C. f. Chen and K. Wharton, "Characterization and failure mode analyses of air plasma oxidized PDMS-PDMS bonding by peel testing," *RSC Advances*, vol. 7, no. 3, pp. 1286-1289, 2017.
- [64] K. Haubert, T. Drier, and D. Beebe, "PDMS bonding by means of a portable, low-cost corona system," *Lab on a Chip*, vol. 6, no. 12, pp. 1548-1549, 2006.
- [65] C. Yang, W. Wang, and Z. Li, "Optimization of corona-triggered PDMS-PDMS bonding method," in *2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2009, pp. 319-322.
- [66] Y. W. Lu, P. T. Lin, and C. S. Pai, "Polydimethylsiloxane (PDMS) Bonding Strength Characterization by a Line Force Model in Blister Tests," in *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2007, pp. 2095-2098.
- [67] V. Sunkara, D.-K. Park, H. Hwang, R. Chantiwas, S. A. Soper, and Y.-K. Cho, "Simple room temperature bonding of thermoplastics and poly(dimethylsiloxane)," *Lab on a Chip*, vol. 11, no. 5, pp. 962-965, 2011.
- [68] Y. Temiz, R. D. Lovchik, G. V. Kaigala, and E. Delamarche, "Lab-on-a-chip devices: How to close and plug the lab?," *Microelectronic Engineering*, vol. 132, pp. 156-175, 1/25/ 2015.
- [69] J. W. Hong, V. Studer, G. Hang, W. F. Anderson, and S. R. Quake, "A nanoliter-scale nucleic acid processor with parallel architecture," *Nat Biotech*, vol. 22, no. 4, pp. 435-439, 2004.
- [70] D.-H. Lee and J.-K. Park, "Reduction in microparticle adsorption using a lateral interconnection method in a PDMS-based microfluidic device," *ELECTROPHORESIS*, vol. 34, no. 22-23, pp. 3119-3125, 2013.
- [71] D. van Swaay, J.-P. Machler, C. Stanley, and A. deMello, "A chip-to-world connector with a built-in reservoir for simple small-volume sample injection," *Lab on a Chip*, vol. 14, no. 1, pp. 178-181, 2014.
- [72] A. Chen and T. Pan, "Fit-to-Flow (F2F) interconnects: Universal reversible adhesive-free microfluidic adaptors for lab-on-a-chip systems," *Lab on a Chip*, vol. 11, no. 4, pp. 727-732, 2011.

- [73] A. Scott, A. K. Au, E. Vinckenbosch, and A. Folch, "A microfluidic D-subminiature connector," *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 11, pp. 2036-2039, 2013.
- [74] Z. Yang and R. Maeda, "Socket with built-in valves for the interconnection of microfluidic chips to macro constituents," *Journal of Chromatography A*, vol. 1013, no. 1, pp. 29-33, 2003.
- [75] E. Wilhelm, C. Neumann, T. Duttenhofer, L. Pires, and B. E. Rapp, "Connecting microfluidic chips using a chemically inert, reversible, multichannel chip-to-world-interface," *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 22, pp. 4343-4351, 2013.
- [76] G. A. Cooksey, A. L. Plant, and J. Atencia, "A vacuum manifold for rapid world-to-chip connectivity of complex PDMS microdevices," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 9, pp. 1298-1300, 2009.
- [77] J. Atencia, G. A. Cooksey, A. Jahn, J. M. Zook, W. N. Vreeland, and L. E. Locascio, "Magnetic connectors for microfluidic applications," *Lab on a Chip*, vol. 10, no. 2, pp. 246-249, 2010.
- [78] A. C. Glavan *et al.*, "Rapid fabrication of pressure-driven open-channel microfluidic devices in omniphobic RF paper," *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 15, pp. 2922-2930, 2013.
- [79] E. Meng, S. Wu, and Y.-C. Tai, "Silicon couplers for microfluidic applications," *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, journal article vol. 371, no. 2, pp. 270-275, September 01 2001.
- [80] V. P. Ashish and V. K. Mayuresh, "Novel microfluidic interconnectors for high temperature and pressure applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no. 2, p. 337, 2003.
- [81] E. R. Murphy, T. Inoue, H. R. Sahoo, N. Zaborenko, and K. F. Jensen, "Solder-based chip-to-tube and chip-to-chip packaging for microfluidic devices," *Lab on a Chip*, vol. 7, no. 10, pp. 1309-1314, 2007.
- [82] D. M. Hartmann, J. T. Nevill, K. I. Pettigrew, G. Votaw, P.-J. Kung, and H. C. Crenshaw, "A low-cost, manufacturable method for fabricating capillary and optical fiber interconnects for microfluidic devices," *Lab on a Chip*, vol. 8, no. 4, pp. 609-616, 2008.

- [83] H.-l. Chang *et al.*, "A highly reliable integrated PDMS interconnector with a long cast flange for microfluidic systems," *Microsystem Technologies*, journal article vol. 18, no. 6, pp. 723-730, June 01 2012.
- [84] A. Waldbaur, J. Kittelmann, C. P. Radtke, J. Hubbuch, and B. E. Rapp, "Microfluidics on liquid handling stations (μ F-on-LHS): an industry compatible chip interface between microfluidics and automated liquid handling stations," *Lab on a Chip*, vol. 13, no. 12, pp. 2337-2343, 2013.
- [85] S. H. Ng, Z. F. Wang, and N. F. de Rooij, "Microfluidic connectors by ultrasonic welding," *Microelectronic Engineering*, vol. 86, no. 4, pp. 1354- 1357, 2009/04/01/ 2009.
- [86] W.-l. Wu, K. N. Sank, J. L. Brash, and P. R. Selvaganapathy, "Polyurethane-based microfluidic devices for blood contacting applications," *Lab on a Chip*, vol. 12, no. 5, pp. 960-970, 2012.
- [87] O. H. Paydar, C. N. Paredes, Y. Hwang, J. Paz, N. B. Shah, and R. N. Candler, "Characterization of 3D-printed microfluidic chip interconnects with integrated O-rings," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 205, pp. 199-203, 2014/01/01/ 2014.
- [88] M. B. Dentry, J. R. Friend, and L. Y. Yeo, "Continuous flow actuation between external reservoirs in small-scale devices driven by surface acoustic waves," *Lab on a Chip*, vol. 14, no. 4, pp. 750-758, 2014.
- [89] M. Rhee and M. A. Burns, "Microfluidic pneumatic logic circuits and digital pneumatic microprocessors for integrated microfluidic systems," *Lab on a Chip*, vol. 9, no. 21, pp. 3131-3143, 2009.
- [90] A. Singh, M. Shirolkar, M. V. Limaye, S. Gokhale, C. Khan-Malek, and S. K. Kulkarni, "A magnetic nano-composite soft polymeric membrane," *Microsystem Technologies*, journal article vol. 19, no. 3, pp. 409-418, March 01 2013.
- [91] H. Schlicke, C. J. Schroter, and T. Vossmeier, "Electrostatically driven drumhead resonators based on freestanding membranes of cross- linked gold nanoparticles," *Nanoscale*, vol. 8, no. 35, pp. 15880-15887, 2016.

- [92] J. Koh, J. Kim, J. H. Shin, and W. Lee, *Fabrication and integration of microprism mirrors for high-speed three-dimensional measurement in inertial microfluidic system*. 2014, pp. 114103-114103.
- [93] C.-H. Chiou, T.-Y. Yeh, and J.-L. Lin, "Deformation Analysis of a Pneumatically-Activated Polydimethylsiloxane (PDMS) Membrane and Potential Micro-Pump Applications," *Micromachines*, vol. 6, no. 2, p. 216, 2015.
- [94] R. Danzl, F. Helml, and S. Scherer, "Focus Variation – a Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 245-256, 2011.
- [95] R. Leach, "Introduction to Surface Texture Measurement," in *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 1-14.
- [96] J. Raja, B. Muralikrishnan, and S. Fu, "Recent advances in separation of roughness, waviness and form," *Precision Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 222-235, 2002/04/01/ 2002.
- [97] W. Kapłonek, K. Nadolny, and G. M. Królczyk, "The Use of Focus-Variation Microscopy for the Assessment of Active Surfaces of a New Generation of Coated Abrasive Tools," *Measurement Science Review*, vol. 16, no. 2, pp. pp. 42-53, 2016.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว

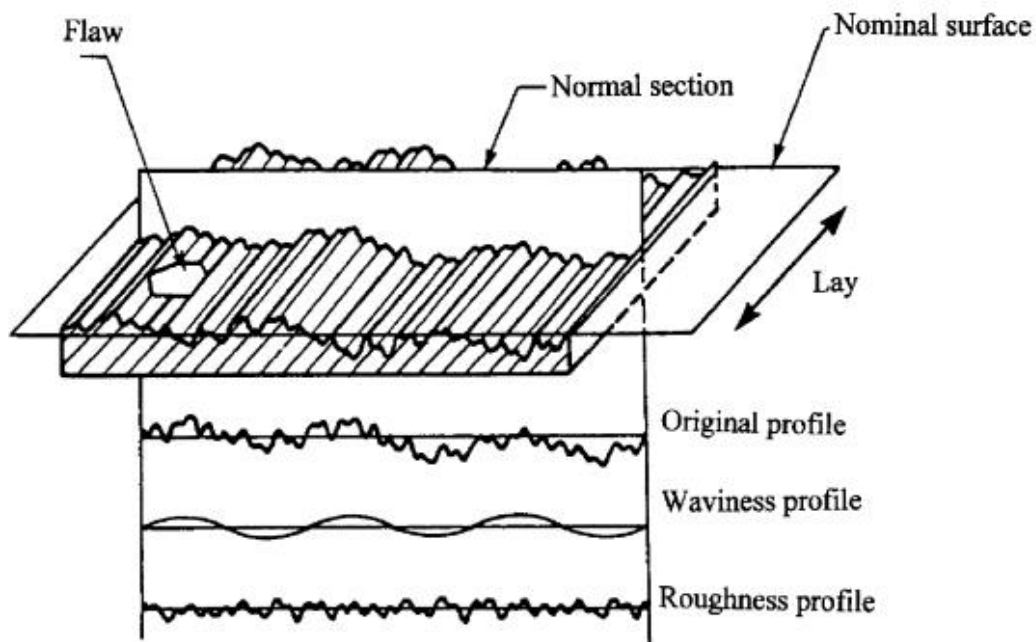
การวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว

การวัดความหยาบผิวแม่พิมพ์ เพื่อตรวจสอบความหยาบผิวที่มีผลต่อการเชื่อมประสาน ชิ้นงานซึ่งกรณีที่ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อย จะทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นควบคุมและฟิล์มบางในตอนเชื่อมประสานมีมากขึ้นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของการเชื่อมประสานชิ้นงาน

สภาพผิวของชิ้นงานโดยปกติเมื่อทำการพิจารณาจะพบโปรไฟล์ของพื้นผิวที่มีความหยาบผิวอยู่ในโปรไฟล์ ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งเราต้องทำการกรองโปรไฟล์ของชิ้นงานออกก่อนถึงจะได้ความหยาบผิวที่แท้จริงของชิ้นงาน ซึ่งเทคนิคการวัดสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ (1) ISO 25178 part 6 (2010) ซึ่งแบ่งตามประเภทการวัด เช่น แบบกราฟเชิงเส้น (Line Profiling) แบบพื้นที่ (Areal Topography) และแบบประยุกต์ (Area-Integrating) [95] (2) แบ่งตามหลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความหยาบผิว ซึ่งทำการวัดด้วยแสง (Optic Method) และวัดแบบสัมผัส (Contact / Pseudo-Contact Method)

การวัดความหยาบผิวที่ดีและไม่ทำลายอันตรายชิ้นงาน ควรเลือกพิจารณาการวัดแบบพื้นที่ด้วยการวัดแสง ซึ่งทำให้การวัดชิ้นงานรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้กรณีวัดแบบสัมผัส (Contact / Pseudo-Contact Method) เป็นการวัดโดยใช้หัววัดเข้าไปใกล้ชิ้นงานทั้งแบบสัมผัส กับแบบใช้แรงจากอะตอม ในกรณีการวัดด้วยแสง การวัดแบบ Interferometry ยกต่อการตีความหมาย ต้องให้ผู้ที่ชำนาญมาทำการวัด ในขณะที่การวัดแบบแพทเทิร์นพื้นที่ (structured light projection) เหมาะสำหรับการสแกนชิ้นงานสามมิติ การวัดความหยาบผิวด้วยวิธีการโฟกัส (Focus Detection Method) เป็นวิธีการที่มีความเหมาะสม โดยหลักการทำงานของวิธีการโฟกัส ด้วยการหาพื้นที่ที่ต้องการวัดโดยการปรับโฟกัสให้เห็นภาพแล้วทำการหาความหยาบผิวต่อไป

ความหยาบผิว (Roughness Profile) โดยปกติจะรวมอยู่กับแนวผิวชิ้นงาน (Waviness Profile) เป็นผิวจริง ซึ่งสำหรับงานขนาดเล็กเราจะพิจารณาความหยาบผิวโดยการตัดผลของแนวผิวชิ้นงาน (Waviness Profile) ออกดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 โพรไฟล์ชิ้นงานที่มีความหยาบผิว [96]

เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicona- InfiniteFocusSL) (รูปที่ ก.2) เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิวในระยะสามมิติ โดยใช้หลักการการปรับค่าระยะโฟกัส (Focus Variation) ซึ่งสามารถใช้วัดความหยาบผิวชิ้นงานได้โดยที่ไม่ทำลายสภาพผิว ไม่ต้องเปลี่ยนวัสดุอุปกรณ์ในการบำรุงรักษา และยังมีหลีกเลี่ยงปัญหาจากข้อจำกัดการวัด เช่น smoothing effect [94] โดยหลักการทำงาน คือ การหาช่วงระยะโฟกัส (Depth of Focus) ในช่วงการหลุดระยะโฟกัสทั้งตำแหน่งบน (Upper position) และตำแหน่งล่าง (Lower position) เพื่อทำการหาค่าความหยาบผิว เรียกว่าวิธีการปรับค่าระยะโฟกัส (Focus Variation) เป็นวิธีที่สามารถวัดความหยาบผิวทั้งพื้นที่และสีพื้นผิวที่แท้จริงได้ สามารถวัดได้ที่ค่าความละเอียดสูง (high resolution) สามารถวัดค่าทวนซ้ำได้ (high repeatability) และวัดค่าได้อย่างรวดเร็ว [97] โดยเครื่องมือนี้ตั้งอยู่ที่ศูนย์ทันตวัสดุศาสตร์ ที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.2 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิว (Alicona- InfiniteFocusSL)

เครื่องวัดความหยาบผิวแบบไม่สัมผัสผิวรุ่นนี้ จะมีเลนส์ที่มีกำลังขยาย 2 ขนาดไว้ให้บริการ คือ ขนาด 10X และ 50X ซึ่งคุณสมบัติของเลนส์ทั้ง 2 อยู่ใน

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของเลนส์ใกล้วัตถุ 10X และ 50X

กำลังขยายวัตถุ	10X	50X
ความสามารถของเลนส์ใกล้วัตถุ (Numerical Aperture)	0.3	0.6
ระยะทำงาน (Working Distance)	17.5 mm.	10.1 mm.
ค่าความละเอียดในแนวตั้ง (Vertical Resolution)	100 nm.	20 nm.
ค่าความสูงต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (Min. Measurable Height)	100 nm.	20 nm.
ค่าความสูงสูงสุดที่สามารถวัดได้ (Max. Measurable Height)	16 mm.	9 mm.
ค่าความหยาบผิวต่ำสุดที่วัดได้ (Min. Measurable Roughness-Ra)	0.3 μm .	0.08 μm .
พื้นที่การวัดต่อจุด (Measurement Area in point)	2X2	0.4X0.4

การเลือกเลนส์จะต้องทำการตรวจสอบเลนส์กับค่าความหยาบผิวที่สามารถใช้วัดชิ้นงานที่ต้องการได้ ซึ่งจะต้องทำการเลือกเลนส์ และทำการลาก profile Length ที่ผิวให้ได้ความยาวที่ต้องการโดยพิจารณาค่า Ra ว่าตกในช่วงดังกล่าวหรือไม่ หากตกในช่วงดังกล่าวให้ทำการเลือกค่านั้นเป็นค่าหลักในการวัด โดยการเลือกระยะ Cut Off Length (Lc) กับช่วงค่าความหยาบผิว และระยะการลากโปรไฟล์วัดค่าตาม ISO 4288-1996 จะเป็นดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 การเลือกใช้ระยะ Cut Off Length (Lc) กับช่วงค่าความหยาบผิว และระยะการลากโปรไฟล์วัดค่าตาม ISO 4288-1996

Ra range	Lc	Profile Length
0-0.02 μm	80 μm	0.4 mm
0.01-0.1 μm	250 μm	1.25 mm
0.1-2 μm	800 μm	4 mm
2-10 μm	2500 μm	12.5 mm
10-80 μm	8000 μm	40 mm

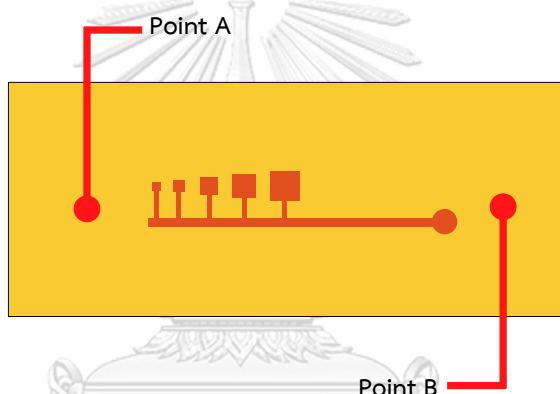
จากการทดสอบพบว่า เลนส์กำลังขยาย 10X ค่า Lc = 800 μm และ Profile Length = 4 mm คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดแม่พิมพ์

ขั้นตอนการวัดค่าแม่พิมพ์

1. ทำการเปิดโปรแกรม และวางชิ้นงานตรงตำแหน่งเลนส์ขยายกำลัง
2. เลือกค่าเลนส์กำลังขยาย 10X และทำการกดปุ่ม Reset Measurement Setting เพื่อทำการเคลียร์ค่า
3. กดปุ่ม Focusing Help จะทำให้มีเลเซอร์ในการเลือกจุดที่ต้องการวัดบนชิ้นงาน
4. ทำการเลื่อนกล้องลงในแนวตั้ง ซึ่งควรให้เลนส์อยู่ห่างจากตำแหน่งผิวประมาณ 16 mm. เมื่อใกล้แล้วให้ทำการปรับละเอียดโดยการใช้นิ้วสามมิติในการกดปุ่มลูกบิดลง โดยทำการกดเลข 1 ก่อนกดปุ่มลูกบิด (เลข 1-4 คือความเร็วในเคลื่อนที่ โดยเลข 1 จะมีความเร็วต่ำสุด) ให้จุดเลเซอร์รวมเป็นจุดเดียวกัน
5. กดปุ่ม Focusing Help เพื่อกลับมาให้เห็นภาพผิวชิ้นงาน
6. กด Automatic Brightness

7. กดปุ่มลูกบิดลง ให้ภาพพื้นผิวหลุดออกจากกระยะโฟกัสโดยการเลื่อนกล้องเข้าไปใกล้ชิ้นงานและบันทึกค่า
8. ดึงปุ่มลูกบิดขึ้น ให้ภาพพื้นผิวหลุดออกจากกระยะโฟกัสโดยการเลื่อนกล้องออกจากชิ้นงานและบันทึกค่า
9. กดปุ่ม Start Measurement เพื่อทำการบันทึกภาพ

ภาพที่ได้จากขั้นตอนนี้จะเป็นภาพสภาพผิวจริงที่ยังไม่ได้ทำการกรองโปรไฟล์ของชิ้นงานออก คำแนะนำในการทำงานคือ ให้ทำการตั้งค่ากล้องก่อนและทำการบันทึกภาพทุกจุดที่ต้องการวัดก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป เพราะพื้นผิวของแม่พิมพ์ที่ต้องการวัดมีความสูงเท่ากันจึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับค่าใหม่ โดยการบันทึกภาพชิ้นงานแม่พิมพ์นี้ 2 จุดดังรูปที่ ก.3



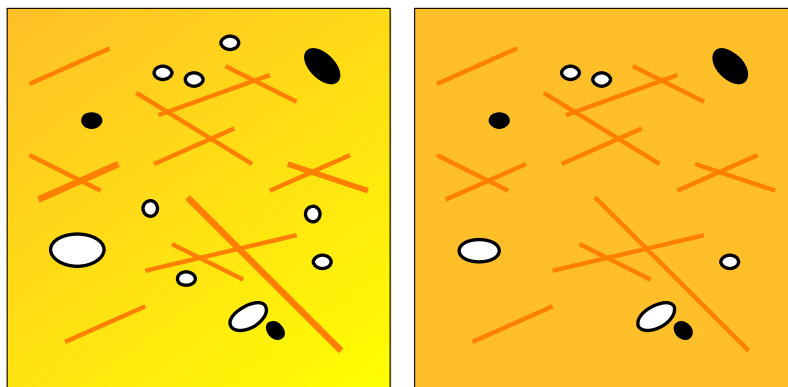
รูปที่ ก.3 จุดวัดความหยาบผิวของแม่พิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

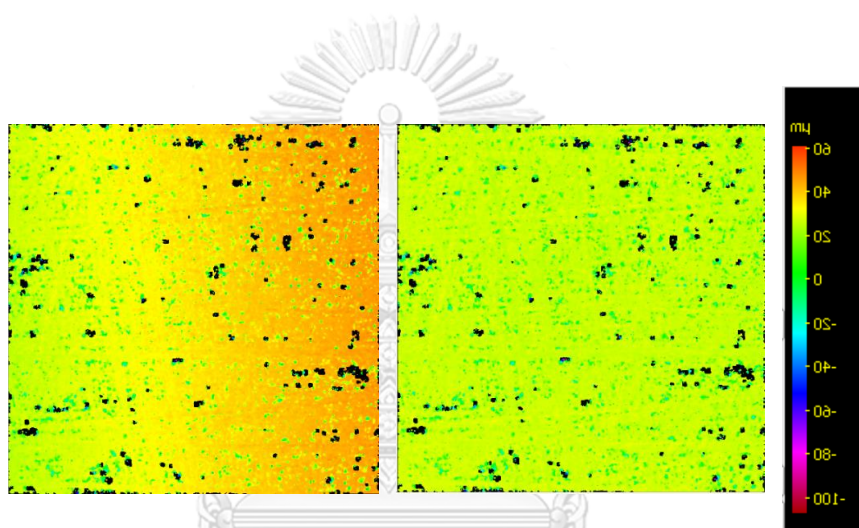
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากบันทึกภาพทุกจุดแล้ว จำเป็นต้องกรองภาพออกให้เหลือแต่ผลของความหยาบผิว โดยการตัดผลของโปรไฟล์ออก การวัดความหยาบผิวมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ การวัดความหยาบผิวแบบทั้งชิ้นงานซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เวลานาน อีกวิธีหนึ่งคือการวัดเป็นจุดซึ่งสามารถใช้วัดความหยาบผิวได้เช่นกัน ถือว่าเป็นวิธีที่เร็วและสะดวกกว่า ดังนั้นในขั้นตอนการกรองภาพให้ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้ ดังรูปที่ ก.4 และรูปที่ ก.5

1. Double Click ที่ภาพที่ต้องการกรอง
2. กดเลือก Form Removal



รูปที่ ก.4 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอเทียบ (ขวา) ภาพพื้นผิวที่ผ่านการกรอแล้ว

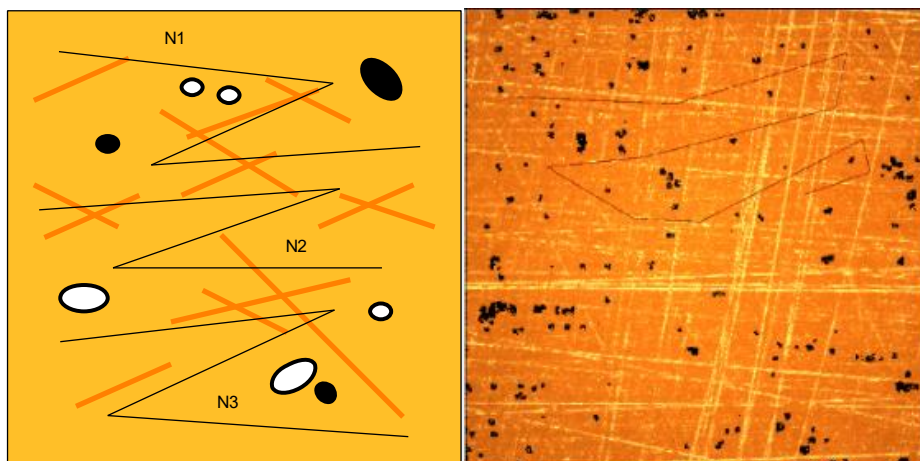


รูปที่ ก.5 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวจริงที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอเทียบ (ขวา) ภาพพื้นผิวจริงที่ผ่านการกรอแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

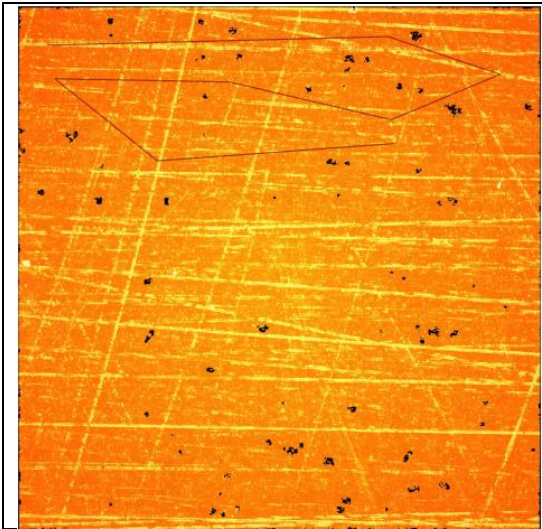
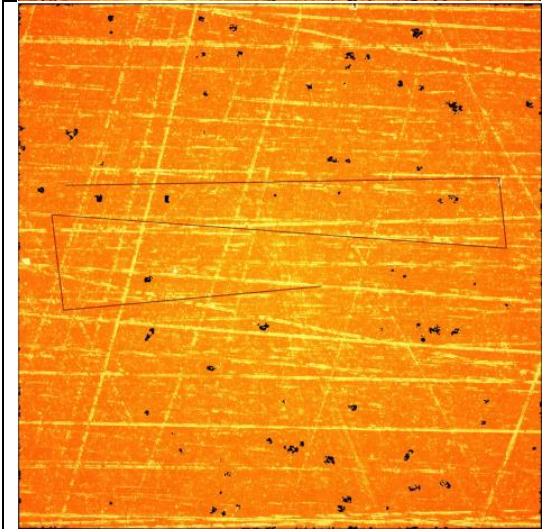
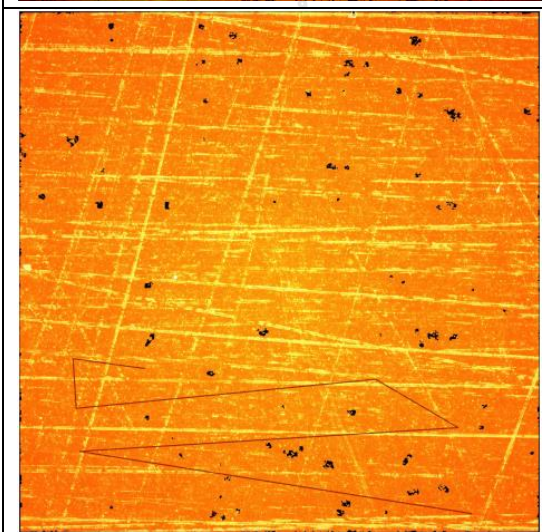
การกรอผิวจะทำให้เราสามารถวัดค่าความหยาบผิวได้ ขั้นตอนต่อไปคือการลากเส้นเพื่อใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว โดยใน 1 ภาพนี้ สามารถวัดได้หลายค่า ซึ่งในการวัดที่ดีควรมีการวัดค่าซ้ำ ดังนั้นควรวัดค่าความหยาบผิวอย่างน้อย 3 ครั้งต่อภาพ โดยในการวัดแต่ละครั้งให้ลากเส้นที่ต้องการวัดให้ได้ 4 mm. โดยให้หลบบริเวณที่เป็นหลุม เพื่อลดความผิดพลาดจากการวัด แล้วนำค่าความหยาบผิวมาหาค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ ก.6



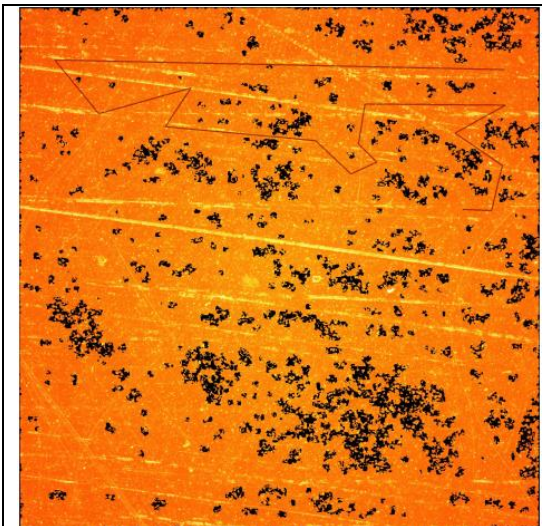
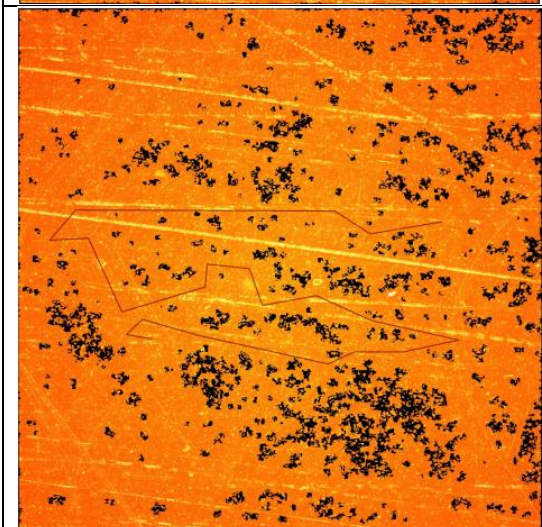
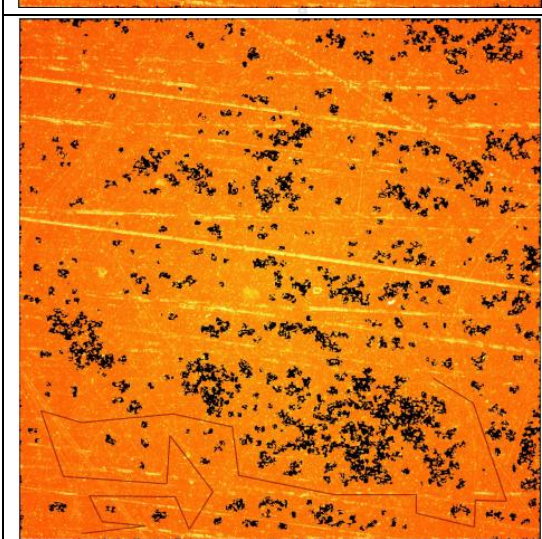
รูปที่ ก.6 (ซ้าย) ภาพพื้นผิวที่ผ่านการกรองที่ต้องลากเส้นโปรไฟล์ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย (ขวา) ภาพพื้นผิวจริงที่ผ่านการกรองที่ต้องลากเส้นโปรไฟล์ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย



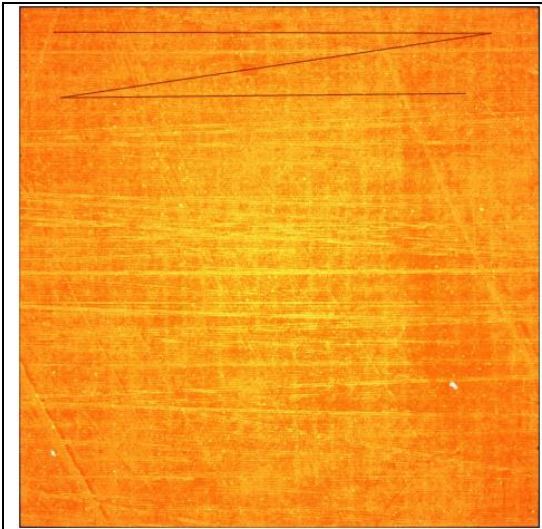
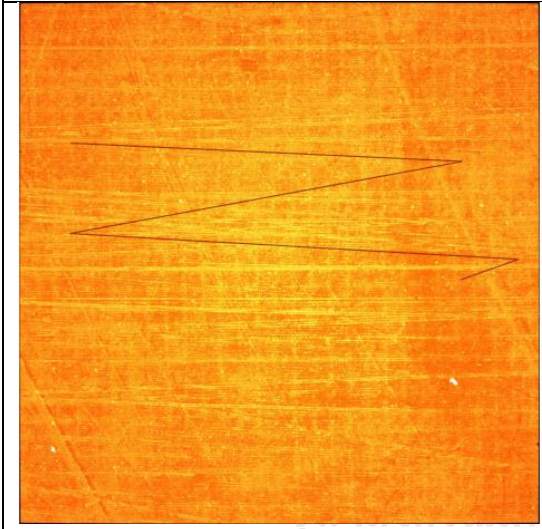
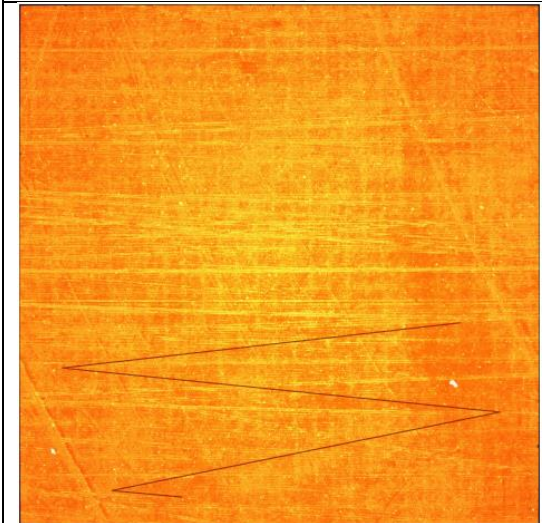
ตารางที่ ก.3 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 1 จุด A

	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด A ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 4.91141396μm Rq: 8.29411943μm Rz: 42.59925099μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด A ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 2.39045401μm Rq: 4.41694715μm Rz: 28.88146604μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด A ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 3.39783498μm Rq: 6.51677495μm Rz: 40.78003508μm</p>

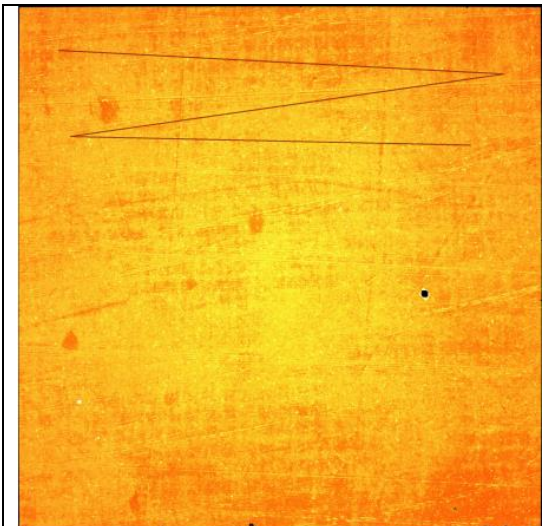
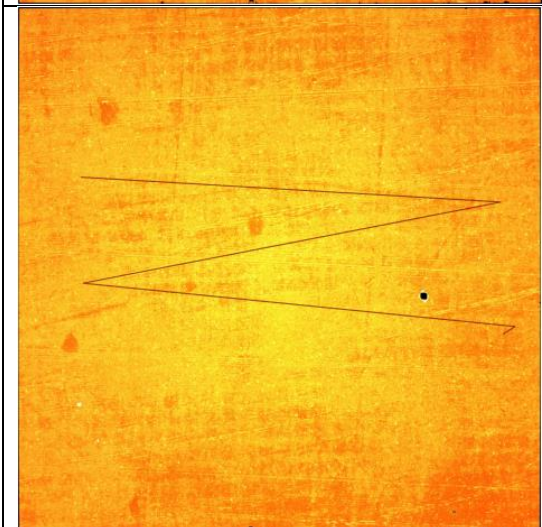
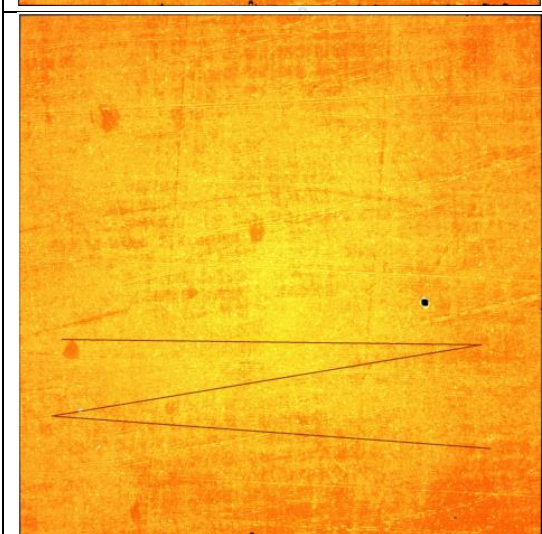
ตารางที่ ก.4 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 1 จุด B

	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด B ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 6.47767562μm</p> <p>Rq: 9.94142954μm</p> <p>Rz: 51.97199530μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด B ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 5.44850214μm</p> <p>Rq: 8.74582149μm</p> <p>Rz: 49.00345490μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 1 จุด B ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 5.52940468μm</p> <p>Rq: 9.00909256μm</p> <p>Rz: 57.74341232μm</p>

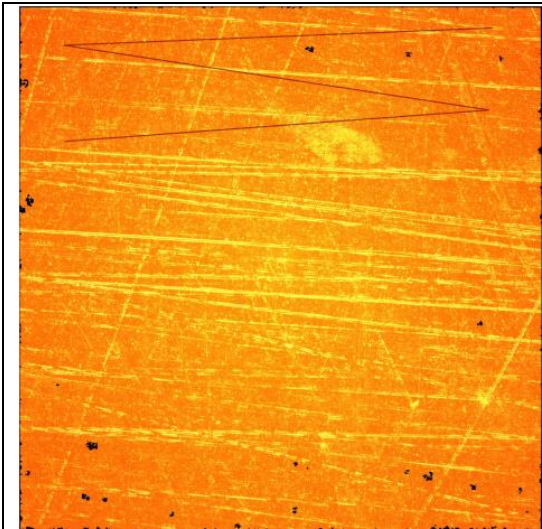
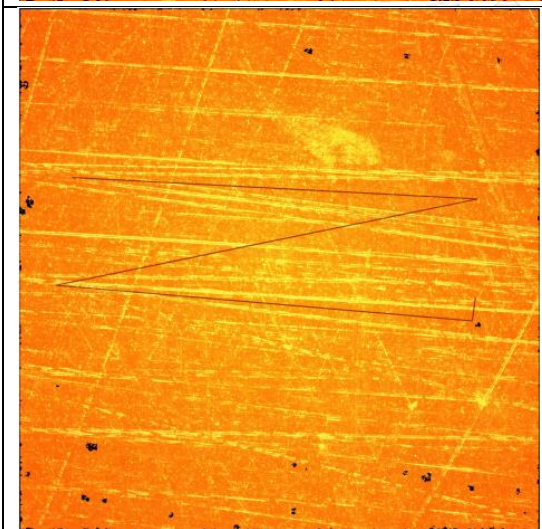
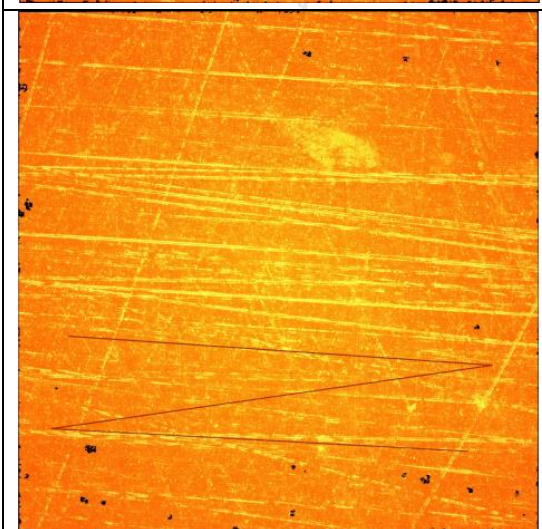
ตารางที่ ก.5 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 2 จุด A

	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด A ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 439.79442992nm Rq: 622.94141516nm Rz: 4.44351256μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด A ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 503.11151045nm Rq: 1.32515502μm Rz: 8.81576002μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด A ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 590.15132563nm Rq: 1.48901924μm Rz: 14.49966649μm</p>

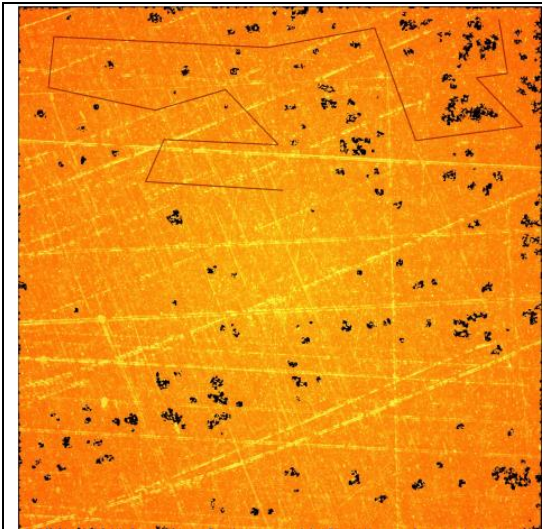
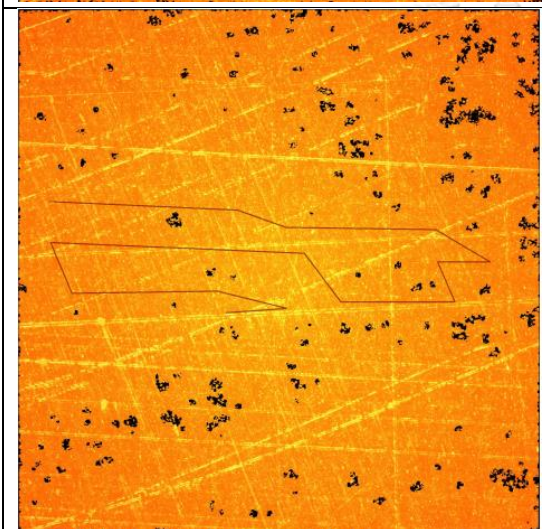
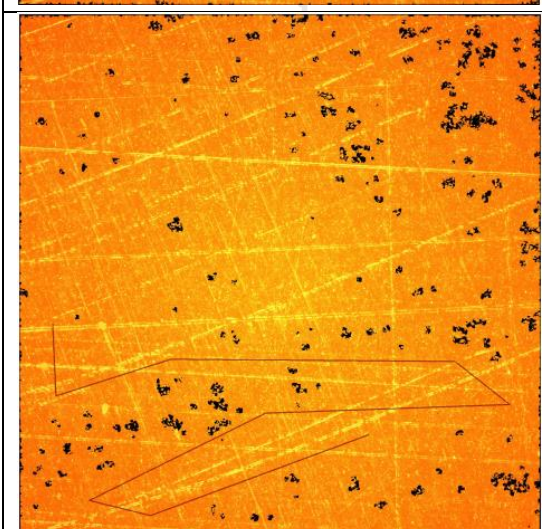
ตารางที่ ก.6 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 2 จุด B

	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด B ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 383.73058885nm Rq: 495.76546630nm Rz: 2.88683803μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด B ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 345.21998095nm Rq: 444.30542315nm Rz: 2.57594331μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 2 จุด B ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 313.29646484nm Rq: 423.86982694nm Rz: 3.05730840μm</p>

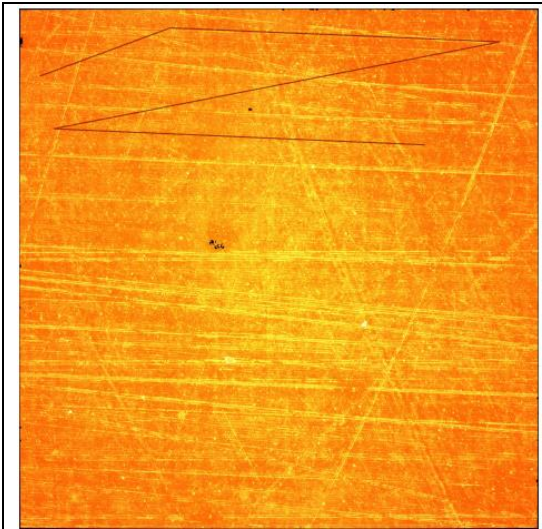
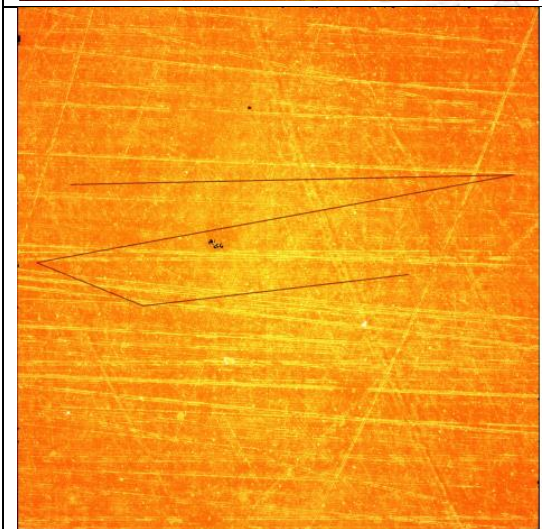
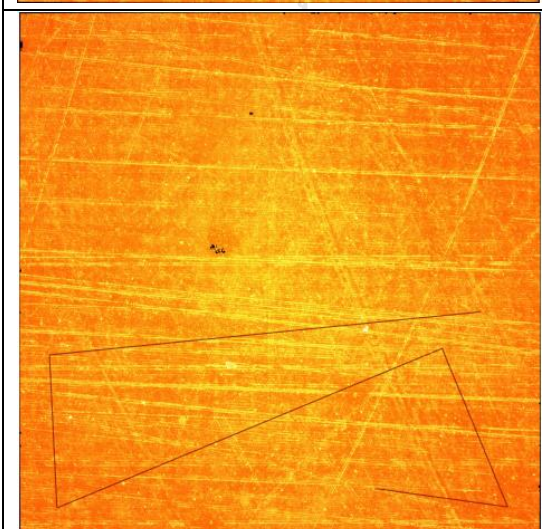
ตารางที่ ก.7 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 3 จุด A

	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด A ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 2.09339548μm</p> <p>Rq: 4.04584791μm</p> <p>Rz: 35.50347903μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด A ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 1.95537105μm</p> <p>Rq: 4.36657347μm</p> <p>Rz: 28.79242702μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด A ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 1.90092227μm</p> <p>Rq: 4.06358040μm</p> <p>Rz: 33.79786071μm</p>

ตารางที่ ก.8 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 3 จุด B

	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด B ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 6.39890907μm</p> <p>Rq: 10.25179148μm</p> <p>Rz: 56.53571503μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด B ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 4.95987767μm</p> <p>Rq: 8.62976160μm</p> <p>Rz: 50.75872864μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 3 จุด B ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 4.88230761μm</p> <p>Rq: 8.70408801μm</p> <p>Rz: 53.39331457μm</p>

ตารางที่ ก.9 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 4 จุด A

	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด A ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 906.52776322nm</p> <p>Rq: 2.36250082μm</p> <p>Rz: 24.54260337μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด A ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 891.60744865nm</p> <p>Rq: 1.93562732μm</p> <p>Rz: 13.70808431μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด A ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 1.09756695μm</p> <p>Rq: 3.09115761μm</p> <p>Rz: 12.19218376μm</p>

ตารางที่ ก.10 ตารางบันทึกภาพและการวัดค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ที่ 4 จุด B

	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด B ครั้งที่ 1 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 2.17372041μm</p> <p>Rq: 4.12079834μm</p> <p>Rz: 30.91438549μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด B ครั้งที่ 2 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 1.02572897μm</p> <p>Rq: 2.90986044μm</p> <p>Rz: 19.03362981μm</p>
	<p>แม่พิมพ์ที่ 4 จุด B ครั้งที่ 3 (Lc:= 800.0μm)</p> <p>Ra: 952.92144238nm</p> <p>Rq: 2.62424983μm</p> <p>Rz: 20.39090790μm</p>

ภาคผนวก ข

ค่าระยะกระดกตัวของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์

ภาคผนวก ข เป็นการรวบรวมผลการทดลองการวัดระยะกระดกตัวของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ 3 ขนาด คือ ขนาด 1500 μm , ขนาด 2000 μm และขนาด 2500 μm ตามลำดับ โดยทำการทดลองที่แรงดันอากาศ 5 ค่า คือ 0, 15, 20, 25, 27 kPa โดยทำการทดลองชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น โดยผลการทดลองในตารางที่ ข.1 ถึงตารางที่ ข.18 จะเป็นการบันทึกค่าระยะกระดกตัวของชิ้นงานทดสอบที่ 1 ถึงชิ้นงานทดสอบที่ 5 โดยจะมีชิ้นงานทดสอบชิ้นที่ 3 ทำการทดลองซ้ำ 2 รอบ เพื่อทำการวัดผลความแตกต่างของระยะกระดกตัวของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์

ตารางที่ ข.19 ถึงตารางที่ ข.21 เป็นการบันทึกค่าระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสของชิ้นงานทดสอบที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (การวัดแบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1) ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง (การวัดแบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2) และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง (การวัดแบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3)

ตารางที่ ข.22 ถึงตารางที่ ข.24 จะทำการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ ของชิ้นงานทดสอบที่ 1-5 เพื่อทดสอบวัฏจักรในแต่ละช่วงแรงดันอากาศที่ 15, 20, 25, 27 kPa ตามลำดับ

ตารางที่ ข.25 ถึงตารางที่ ข. 27 จะเป็นการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของชิ้นงานทดสอบ 1-5 โดยการรวมผลการทำซ้ำระยะกระดกตัวของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวมेटิกส์ เพื่อดูความแตกต่างของระยะกระดกที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ ข.1 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 1

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 1	15	165	157	159	160	4
	20	195	197	189	193	4
	25	204	203	201	203	2
	27	229	221	235	228	7
	25	215	212	212	213	2
	20	199	207	205	204	4
	15	161	161	173	165	7
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 2	15	179	179	181	180	1
	20	201	201	207	203	3
	25	226	219	232	226	7
	27	240	230	255	242	12
	25	218	214	221	217	3
	20	205	206	203	205	2
	15	186	170	181	179	8
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 3	15	168	175	167	170	4
	20	184	206	206	199	13
	25	232	230	224	229	4
	27	240	223	244	236	11
	25	237	222	218	226	10
	20	194	195	204	198	6
	15	168	170	165	168	3

ตารางที่ ข.2 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 1

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 1	15	299	303	284	295	10
	20	341	339	346	342	3
	25	368	367	363	366	2
	27	387	373	367	375	10
	25	364	366	355	362	6
	20	339	319	336	331	11
	15	285	302	291	293	9
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 2	15	269	291	271	277	12
	20	310	290	292	297	11
	25	361	340	361	354	12
	27	351	367	341	353	13
	25	335	330	343	336	7
	20	320	308	326	318	9
	15	261	268	260	263	5
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 3	15	232	255	258	248	14
	20	311	297	284	297	14
	25	361	355	346	354	8
	27	375	358	366	366	9
	25	341	351	352	348	6
	20	314	284	292	296	15
	15	258	256	258	257	1

ตารางที่ ข.3 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 1

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	412	387	387	395	14
	20	431	435	430	432	2
	25	491	473	483	482	9
	27	492	510	508	503	10
	25	494	483	477	485	9
	20	403	425	407	412	12
	15	358	368	347	358	11
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	305	326	305	312	12
	20	346	387	374	369	21
	25	488	451	464	468	19
	27	490	475	485	483	8
	25	445	440	459	448	10
	20	373	378	387	379	7
	15	313	326	304	314	11
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	346	348	346	347	1
	20	385	366	361	371	12
	25	477	470	488	479	9
	27	489	481	509	493	14
	25	468	480	496	481	14
	20	373	366	387	375	10
	15	348	352	305	335	26

ตารางที่ ข.4 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 2

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 1	15	180	166	149	165	16
	20	194	181	177	184	9
	25	108	204	197	170	53
	27	216	234	225	225	9
	25	205	209	210	208	3
	20	194	284	172	216	59
	15	173	152	152	159	12
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 2	15	158	162	150	157	6
	20	189	191	181	187	5
	25	211	213	214	213	1
	27	222	229	225	225	4
	25	201	209	212	207	5
	20	182	193	178	185	8
	15	158	158	164	160	4
แบบชิ้นปับไดครั้งที่ 3	15	146	152	139	146	7
	20	183	176	173	177	5
	25	209	208	202	206	4
	27	227	213	216	219	8
	25	219	200	205	208	10
	20	180	177	174	177	3
	15	151	158	142	150	8

ตารางที่ ข.5 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 2

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	237	228	225	230	6
	20	312	278	267	286	23
	25	343	335	333	337	6
	27	367	352	361	360	8
	25	336	329	341	335	6
	20	306	280	280	289	15
	15	234	228	231	231	3
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	226	224	234	228	5
	20	317	310	293	307	13
	25	357	349	351	352	4
	27	398	371	380	383	14
	25	354	345	329	342	13
	20	310	321	307	313	7
	15	241	222	231	232	10
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	221	219	225	221	3
	20	310	278	271	286	21
	25	353	330	355	346	14
	27	394	379	360	378	17
	25	345	356	340	347	8
	20	306	292	258	285	24
	15	229	241	213	227	14

ตารางที่ ข.6 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 2

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	398	395	385	393	7
	20	468	470	488	475	11
	25	518	513	512	514	3
	27	530	533	529	531	2
	25	522	524	511	519	7
	20	470	469	483	474	8
	15	412	395	389	399	12
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	388	393	405	395	9
	20	488	471	483	481	9
	25	537	546	534	539	7
	27	562	559	576	566	9
	25	519	549	547	538	17
	20	498	515	474	496	20
	15	395	390	421	402	16
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	397	408	393	399	8
	20	468	455	443	455	12
	25	534	544	535	538	5
	27	557	555	541	551	9
	25	545	546	531	541	8
	20	520	459	461	480	34
	15	397	413	395	402	10

ตารางที่ ข.7 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 1	15	187	199	182	189	9
	20	222	225	214	220	6
	25	262	254	246	254	8
	27	261	256	251	256	5
	25	238	253	244	245	8
	20	242	228	231	233	7
	15	153	197	189	180	23
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 2	15	192	173	186	184	10
	20	225	220	219	221	3
	25	257	252	245	251	6
	27	261	258	267	262	4
	25	255	231	229	239	14
	20	234	205	215	218	15
	15	186	180	177	181	5
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 3	15	169	176	175	173	3
	20	227	225	210	221	10
	25	256	264	266	262	5
	27	257	271	280	269	12
	25	242	249	253	248	6
	20	235	229	224	229	6
	15	176	175	160	170	8

ตารางที่ ข.8 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 1	15	258	281	294	278	18
	20	322	316	318	319	3
	25	363	353	355	357	5
	27	382	350	394	375	23
	25	399	370	360	376	20
	20	326	312	302	313	12
	15	260	287	297	281	19
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 2	15	250	254	262	255	6
	20	321	334	332	329	7
	25	353	358	373	361	10
	27	354	370	367	364	8
	25	349	371	379	366	16
	20	329	332	317	326	8
	15	275	258	275	269	10
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 3	15	253	261	258	257	4
	20	332	321	324	326	6
	25	350	366	370	362	10
	27	375	367	362	368	6
	25	354	364	364	361	5
	20	340	310	330	327	15
	15	268	246	290	268	22

ตารางที่ ข.9 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1

แอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 1						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	343	345	343	343	1
	20	463	447	429	446	17
	25	484	483	481	483	1
	27	533	501	513	516	16
	25	483	479	486	483	3
	20	456	432	425	438	16
	15	354	351	337	347	9
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	356	352	355	354	2
	20	411	455	443	436	23
	25	466	488	490	481	13
	27	505	508	518	511	7
	25	471	489	486	482	10
	20	438	439	437	438	1
	15	364	338	346	350	13
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	329	356	335	340	14
	20	447	429	416	431	16
	25	481	473	467	474	7
	27	518	514	515	515	2
	25	467	497	483	482	15
	20	445	432	447	441	8
	15	348	310	356	338	24

ตารางที่ ข.10 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 1	15	153	164	180	166	14
	20	214	215	222	217	4
	25	221	238	227	229	9
	27	247	268	243	253	13
	25	223	240	214	226	13
	20	208	214	206	209	4
	15	153	154	177	161	13
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 2	15	158	204	183	182	23
	20	197	213	226	212	15
	25	233	221	241	232	10
	27	240	257	257	251	10
	25	223	238	237	233	8
	20	198	213	218	210	11
	15	163	176	188	176	13
แบบชิ้นบันไดครั้งที่ 3	15	148	144	157	150	7
	20	202	208	208	206	3
	25	232	241	235	236	5
	27	236	248	256	247	10
	25	232	232	228	231	2
	20	197	209	199	202	6
	15	183	183	175	180	4

ตารางที่ ข.11 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	211	225	253	230	21
	20	329	322	315	322	7
	25	347	395	353	365	26
	27	386	415	391	397	15
	25	356	393	335	361	29
	20	325	318	316	320	5
	15	254	242	271	255	14
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	220	261	260	247	24
	20	317	328	313	319	8
	25	356	383	373	371	14
	27	400	399	399	399	1
	25	379	387	359	375	15
	20	331	339	328	332	6
	15	266	285	267	273	11
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	228	239	213	227	13
	20	323	326	313	321	7
	25	340	374	344	353	18
	27	387	407	370	388	18
	25	378	384	336	366	26
	20	313	320	311	315	5
	15	273	292	270	278	12

ตารางที่ ข.12 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 3 ทดลองครั้งที่ 2						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	322	333	347	334	12
	20	416	418	433	423	9
	25	469	492	460	474	17
	27	487	532	504	508	23
	25	472	493	489	485	11
	20	416	444	439	433	15
	15	363	322	303	329	31
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	300	334	304	313	19
	20	440	438	446	441	4
	25	478	479	460	472	11
	27	527	522	515	521	6
	25	472	492	495	486	12
	20	450	432	453	445	11
	15	313	336	311	320	14
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	290	299	314	301	12
	20	438	456	433	443	12
	25	461	480	467	470	10
	27	522	507	524	518	9
	25	480	470	470	474	6
	20	440	426	458	441	16
	15	307	353	336	332	23

ตารางที่ ข.13 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 4

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 4						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	238	189	208	211	25
	20	291	317	308	306	13
	25	298	289	328	305	20
	27	291	305	352	316	32
	25	308	328	322	319	10
	20	287	275	308	290	17
	15	245	194	266	235	37
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	189	191	195	192	3
	20	236	236	267	246	18
	25	303	288	307	300	10
	27	321	317	329	322	6
	25	295	308	323	309	14
	20	255	300	289	282	24
	15	203	235	191	209	23
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	191	208	216	205	13
	20	249	229	244	241	10
	25	252	287	272	271	18
	27	273	302	289	288	15
	25	260	278	288	275	15
	20	253	272	268	264	10
	15	236	208	249	231	21

ตารางที่ ข.14 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 4

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 4						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	230	227	233	230	3
	20	301	317	327	315	13
	25	388	382	395	388	6
	27	377	414	415	402	22
	25	354	377	387	373	17
	20	317	347	327	331	15
	15	237	262	329	276	48
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	252	253	232	246	12
	20	284	288	270	281	10
	25	376	362	347	362	14
	27	387	375	377	380	6
	25	367	354	352	358	8
	20	359	353	324	345	19
	15	257	279	233	256	23
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	231	244	225	233	10
	20	322	267	294	295	27
	25	282	314	294	297	16
	27	294	337	311	314	22
	25	339	307	328	324	16
	20	287	284	289	287	3
	15	275	244	269	263	16

ตารางที่ ข.15 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 4

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 4						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 1	15	377	370	385	377	7
	20	434	437	426	432	6
	25	485	528	488	500	24
	27	547	559	532	546	13
	25	518	508	464	497	28
	20	476	459	252	396	124
	15	378	402	401	394	13
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 2	15	391	385	380	386	6
	20	425	448	489	454	32
	25	481	491	481	485	6
	27	537	537	537	537	0
	25	494	509	502	502	7
	20	439	461	447	449	11
	15	389	406	372	389	17
แบบชิ้นป้อนได้ครั้งที่ 3	15	394	352	359	368	23
	20	434	459	430	441	16
	25	464	477	464	469	8
	27	517	507	493	505	12
	25	472	487	498	486	13
	20	393	482	445	440	45
	15	372	339	317	343	28

ตารางที่ ข.16 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 5

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 5						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	182	175	186	181	6
	20	204	201	204	203	2
	25	228	256	222	235	18
	27	233	239	236	236	3
	25	214	222	216	217	4
	20	208	210	201	206	4
	15	185	180	183	183	2
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	165	167	172	168	4
	20	205	206	202	204	2
	25	213	224	232	223	10
	27	245	258	251	252	6
	25	228	236	234	233	4
	20	200	203	206	203	3
	15	186	179	179	181	4
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	158	162	158	159	2
	20	177	181	174	177	4
	25	216	204	218	213	7
	27	252	215	246	238	20
	25	220	193	231	215	19
	20	189	184	195	189	5
	15	171	157	169	166	8

ตารางที่ ข.17 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 5

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 5						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	263	276	279	273	8
	20	317	322	328	323	6
	25	336	388	346	357	28
	27	351	365	399	372	25
	25	343	341	361	348	11
	20	317	321	330	322	7
	15	260	269	281	270	11
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	294	281	281	285	7
	20	313	378	325	338	35
	25	352	365	355	357	7
	27	395	372	409	392	19
	25	365	353	385	368	16
	20	301	323	334	319	17
	15	288	274	289	284	8
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	230	237	236	234	4
	20	302	275	291	289	13
	25	354	359	360	358	3
	27	392	372	394	386	12
	25	365	355	352	357	7
	20	295	297	274	289	12
	15	275	250	257	261	13

ตารางที่ ข.18 ตารางบันทึกระยะกระดกของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 5

แอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 5						
การวัด ระยะ กระดก	แรงดันอากาศ (kPa)	วัดครั้งที่ 1 (μm)	วัดครั้งที่ 2 (μm)	วัดครั้งที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย (μm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	377	377	377	377	0
	20	449	437	435	440	8
	25	503	492	491	495	7
	27	524	534	534	531	6
	25	502	446	479	476	28
	20	437	453	448	446	8
	15	385	372	371	376	8
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	372	395	402	390	16
	20	434	426	432	431	4
	25	500	489	486	492	7
	27	533	512	536	527	13
	25	478	467	505	483	20
	20	451	460	453	455	4
	15	374	404	399	392	16
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	287	323	371	327	42
	20	426	426	443	432	10
	25	497	461	484	481	18
	27	521	509	519	517	6
	25	492	481	479	484	7
	20	434	437	428	433	5
	15	372	379	383	378	6

ตารางที่ ข.19 ตารางบันทึกระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์เวเตอร์นิวมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง

ระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์เวเตอร์นิวมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ของชิ้นงานที่ 1-5							
การวัด ระยะ กระดก	แรงดัน อากาศ (kPa)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 1 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 2 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 5 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงาน ทุกชิ้น (μm)
แบบชิ้นโบว์แดงที่ 1	15	160	165	189	211	181	181
	20	193	184	220	306	203	221
	25	203	170	254	305	235	233
	27	228	225	256	316	236	252
	25	213	208	245	319	217	240
	20	204	216	233	290	206	230
	15	165	159	180	235	183	184
แบบชิ้นโบว์แดงที่ 2	15	180	157	184	192	168	176
	20	203	187	221	246	204	212
	25	226	213	251	300	223	242
	27	242	225	262	322	252	260
	25	217	207	239	309	233	241
	20	205	185	218	282	203	218
	15	179	160	181	209	181	182
แบบชิ้นโบว์แดงที่ 3	15	170	146	173	205	159	171
	20	199	177	221	241	177	203
	25	229	206	262	271	213	236
	27	236	219	269	288	238	250
	25	226	208	248	275	215	234
	20	198	177	229	264	189	212
	15	168	150	170	231	166	177

ตารางที่ ข.20 ตารางบันทึกระยะกระดกเฉลี่ยของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง

ระยะกระดกเฉลี่ยของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ของชิ้นงานที่ 1-5							
การวัด ระยะ กระดก	แรงดัน อากาศ (kPa)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 1 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 2 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 5 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงาน ทุกชิ้น (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	295	230	278	230	273	261
	20	342	286	319	315	323	317
	25	366	337	357	388	357	361
	27	375	360	375	402	372	377
	25	362	335	376	373	348	359
	20	331	289	313	331	322	317
	15	293	231	281	276	270	270
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	277	228	255	246	285	258
	20	297	307	329	281	338	310
	25	354	352	361	362	357	357
	27	353	383	364	380	392	374
	25	336	342	366	358	368	354
	20	318	313	326	345	319	324
	15	263	232	269	256	284	261
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	248	221	257	233	234	239
	20	297	286	326	295	289	299
	25	354	346	362	297	358	343
	27	366	378	368	314	386	362
	25	348	347	361	324	357	347
	20	296	285	327	287	289	297
	15	257	227	268	263	261	255

ตารางที่ ข.21 ตารางบันทึกระยะกระดกเฉลี่ยของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 1-5 โดยแยก 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาก่อนการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม ช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง และช่วงเวลาหลังการให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง

ระยะกระดกเฉลี่ยของแอคชูเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ของชิ้นงานที่ 1-5							
การวัด ระยะ กระดก	แรงดัน อากาศ (kPa)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 1 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 2 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 3 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 4 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงานที่ 5 (μm)	ค่าเฉลี่ย ชิ้นงาน ทุกชิ้น (μm)
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 1	15	395	393	343	377	377	377
	20	432	475	446	432	451	447
	25	482	514	483	500	493	494
	27	503	531	516	546	517	523
	25	485	519	483	497	495	496
	20	412	474	438	396	441	432
	15	358	399	347	394	368	373
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 2	15	312	395	354	386	390	367
	20	369	481	436	454	431	434
	25	468	539	481	485	492	493
	27	483	566	511	537	527	525
	25	448	538	482	502	483	491
	20	379	496	438	449	455	443
	15	314	402	350	389	392	369
แบบขึ้นบันไดครั้งที่ 3	15	347	399	340	368	327	356
	20	371	455	431	441	432	426
	25	479	538	474	469	481	488
	27	493	551	515	505	517	516
	25	481	541	482	486	484	495
	20	375	480	441	440	433	434
	15	335	402	338	343	378	359

ตารางที่ ข.22 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร

ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์เวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร					
ค่าแรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกแบบขั้นบันไดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1-5 (μm)				
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยผลจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักร (μm)
15	181	176	171	176	5
20	221	212	203	212	9
25	233	242	236	237	5
27	252	260	250	254	6
25	240	241	234	239	4
20	230	218	212	220	9
15	184	182	177	181	4
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักรเฉลี่ย (μm)					6

ตารางที่ ข.23 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร

ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2000 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร					
ค่าแรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกแบบขั้นบันไดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1-5 (μm)				
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยผลจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักร (μm)
15	261	258	239	253	12
20	317	310	299	309	9
25	361	357	343	354	9
27	377	374	362	371	8
25	359	354	347	353	6
20	317	324	297	313	14
15	270	261	255	262	8
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักรเฉลี่ย (μm)					9

ตารางที่ ข.24 ตารางวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร

ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2500 μm ที่เกิดจากการใช้งานในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบวัฏจักร					
ค่าแรงดันอากาศ (kPa)	ระยะกระดกแบบขั้นบันไดเฉลี่ยของตัวอย่างที่ 1-5 (μm)				
	ครั้งที่ 1 (ทดสอบก่อนให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม)	ครั้งที่ 2 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 25000 ครั้ง)	ครั้งที่ 3 (ทดสอบหลังให้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม 50000 ครั้ง)	ค่าเฉลี่ยผลจากการทดสอบ 3 ช่วงเวลา	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักร (μm)
15	377	367	356	367	10
20	447	434	426	436	11
25	494	493	488	492	3
27	523	525	516	521	4
25	496	491	495	494	3
20	432	443	434	436	6
15	373	369	359	367	7
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานวัฏจักรเฉลี่ย (μm)					6

ตารางที่ ข.25 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1500 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5

	ระยะกระดกแบบขั้นบันได (μm)	ค่าแรงดันอากาศ (kPa)						
		15	20	25	27	25	20	15
ชิ้นงานที่ 1	0 ครั้ง	160	193	203	228	213	204	165
	25000 ครั้ง	180	203	226	242	217	205	179
	50000 ครั้ง	170	199	229	236	226	198	168
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	170	198	219	235	219	202	170
ชิ้นงานที่ 2	0 ครั้ง	165	184	170	225	208	216	159
	25000 ครั้ง	157	187	213	225	207	185	160
	50000 ครั้ง	146	177	206	219	208	177	150
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	156	183	196	223	208	193	156
ชิ้นงานที่ 3	0 ครั้ง	189	220	254	256	245	233	180
	25000 ครั้ง	184	221	251	262	239	218	181
	50000 ครั้ง	173	221	262	269	248	229	170
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	182	221	256	263	244	227	177
ชิ้นงานที่ 4	0 ครั้ง	211	306	305	316	319	290	235
	25000 ครั้ง	192	246	300	322	309	282	209
	50000 ครั้ง	205	241	271	288	275	264	231
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	203	264	292	309	301	279	225
ชิ้นงานที่ 5	0 ครั้ง	181	203	235	236	217	206	183
	25000 ครั้ง	168	204	223	252	233	203	181
	50000 ครั้ง	159	177	213	238	215	189	166
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	169	195	223	242	221	200	177
ค่าเฉลี่ยรวม		176	212	237	254	239	220	181
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้าง (μm)		18	32	37	34	37	35	26
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้างเฉลี่ย (μm)		37						

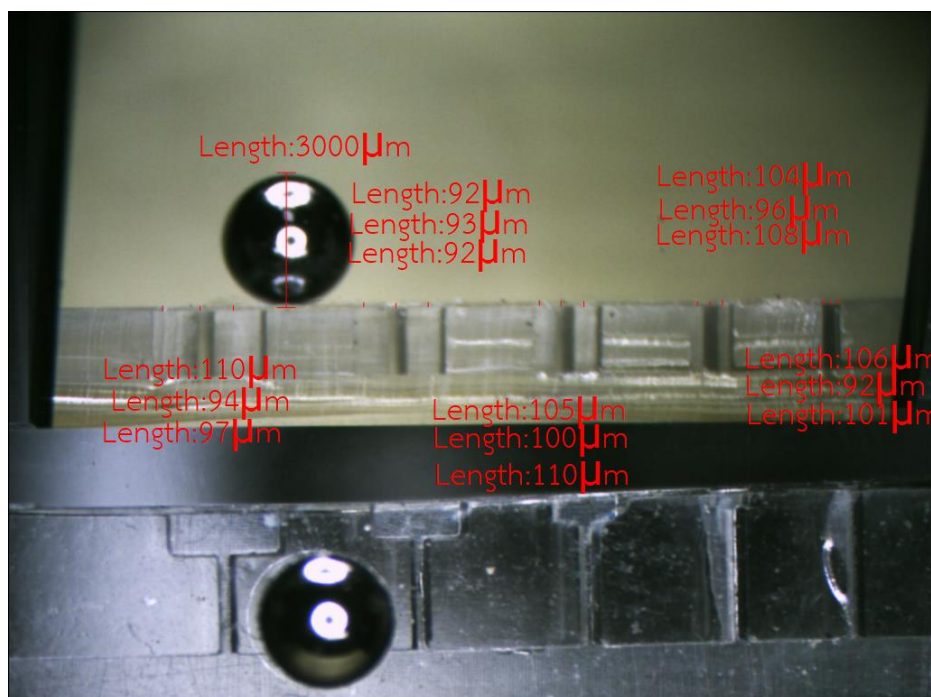
ตารางที่ ข.26 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์วอเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2000 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5

	ระยะกระดกแบบขั้นบันได (μm)	ค่าแรงดันอากาศ (kPa)						
		15	20	25	27	25	20	15
ชิ้นงานที่ 1	0 ครั้ง	295	342	366	375	362	331	293
	25000 ครั้ง	277	297	354	353	336	318	263
	50000 ครั้ง	248	297	354	366	348	296	257
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	273	312	358	365	349	315	271
ชิ้นงานที่ 2	0 ครั้ง	230	286	337	360	335	289	231
	25000 ครั้ง	228	307	352	383	342	313	232
	50000 ครั้ง	221	286	346	378	347	285	227
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	226	293	345	374	342	295	230
ชิ้นงานที่ 3	0 ครั้ง	278	319	357	375	376	313	281
	25000 ครั้ง	255	329	361	364	366	326	269
	50000 ครั้ง	257	326	362	368	361	327	268
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	263	324	360	369	368	322	273
ชิ้นงานที่ 4	0 ครั้ง	230	315	388	402	373	331	276
	25000 ครั้ง	246	281	362	380	358	345	256
	50000 ครั้ง	233	295	297	314	324	287	263
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	236	297	349	365	351	321	265
ชิ้นงานที่ 5	0 ครั้ง	273	323	357	372	348	322	270
	25000 ครั้ง	285	338	357	392	368	319	284
	50000 ครั้ง	234	289	358	386	357	289	261
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	264	317	357	383	358	310	271
ค่าเฉลี่ยรวม		253	309	354	371	353	313	262
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้าง (μm)		20	13	6	8	10	11	18
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้างเฉลี่ย (μm)		23						

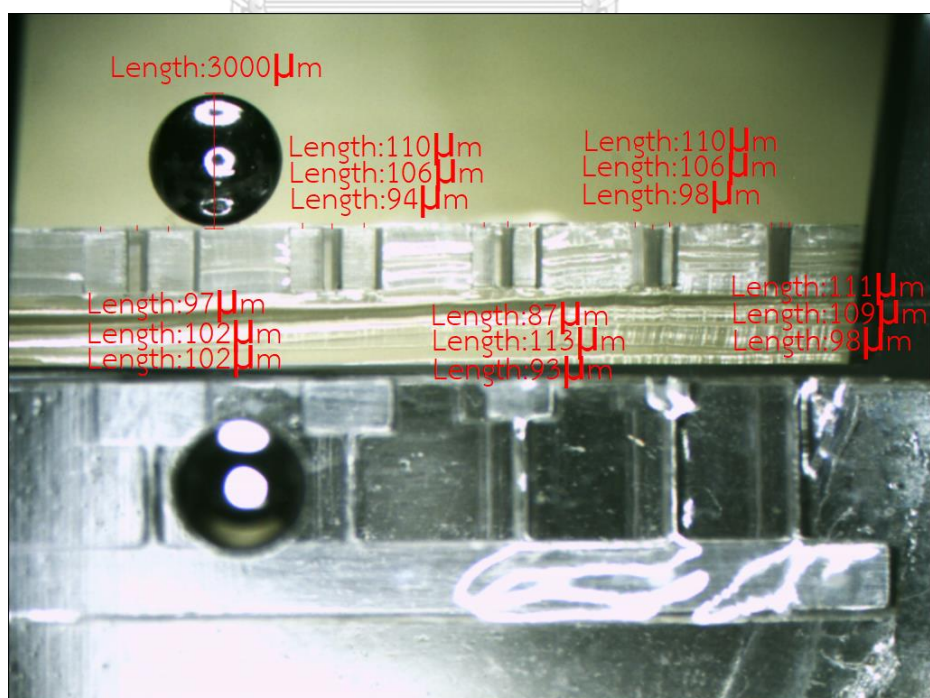
ตารางที่ ข. 27 ตารางการวิเคราะห์ผลระยะกระดกเฉลี่ยของแอกซ์ฮิวเตอร์นิวเมติกส์สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2500 μm ที่เกิดจากการสร้างชิ้นงานของตัวอย่างที่ 1-5

	ระยะกระดกแบบขั้นบันได (μm)	ค่าแรงดันอากาศ (kPa)						
		15	20	25	27	25	20	15
ชิ้นงานที่ 1	0 ครั้ง	395	432	482	503	485	412	358
	25000 ครั้ง	312	369	468	483	448	379	314
	50000 ครั้ง	347	371	479	493	481	375	335
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	351	390	476	493	471	389	336
ชิ้นงานที่ 2	0 ครั้ง	393	475	514	531	519	474	399
	25000 ครั้ง	395	481	539	566	538	496	402
	50000 ครั้ง	399	455	538	551	541	480	402
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	396	470	530	549	533	483	401
ชิ้นงานที่ 3	0 ครั้ง	343	446	483	516	483	438	347
	25000 ครั้ง	354	436	481	511	482	438	350
	50000 ครั้ง	340	431	474	515	482	441	338
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	346	438	479	514	482	439	345
ชิ้นงานที่ 4	0 ครั้ง	377	432	500	546	497	396	394
	25000 ครั้ง	386	454	485	537	502	449	389
	50000 ครั้ง	368	441	469	505	486	440	343
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	377	442	484	530	495	428	375
ชิ้นงานที่ 5	0 ครั้ง	377	451	493	517	495	441	368
	25000 ครั้ง	390	431	492	527	483	455	392
	50000 ครั้ง	327	432	481	517	484	433	378
	ค่าเฉลี่ยผลการทำซ้ำ	365	438	488	520	488	443	379
ค่าเฉลี่ยรวม		367	436	492	521	494	436	367
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้าง (μm)		20	29	22	21	23	34	27
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการสร้างเฉลี่ย (μm)		25						

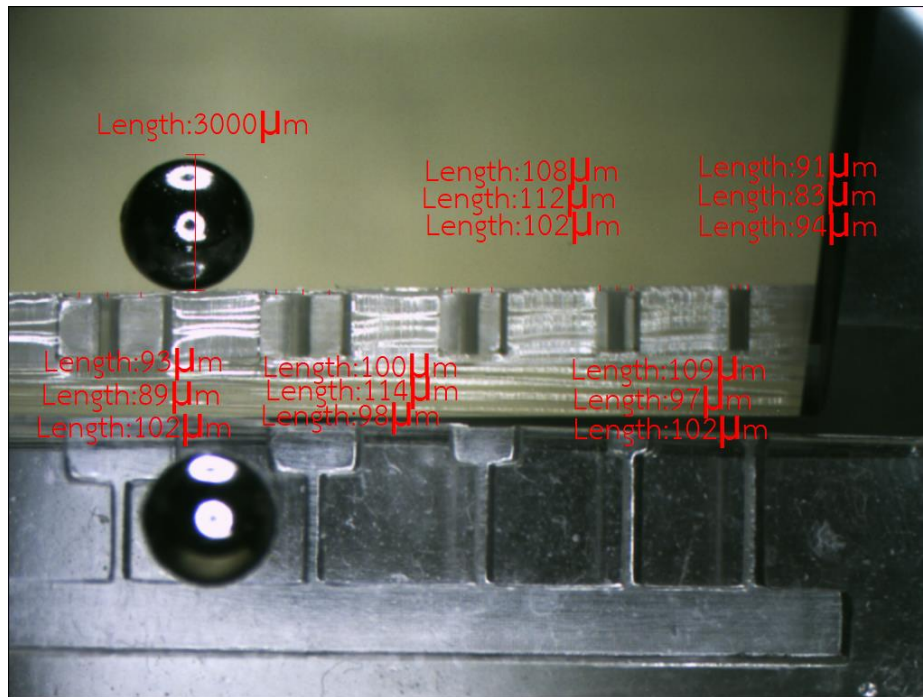
ภาคผนวก ค
ค่าความหนาของการวัดฟิล์มบาง



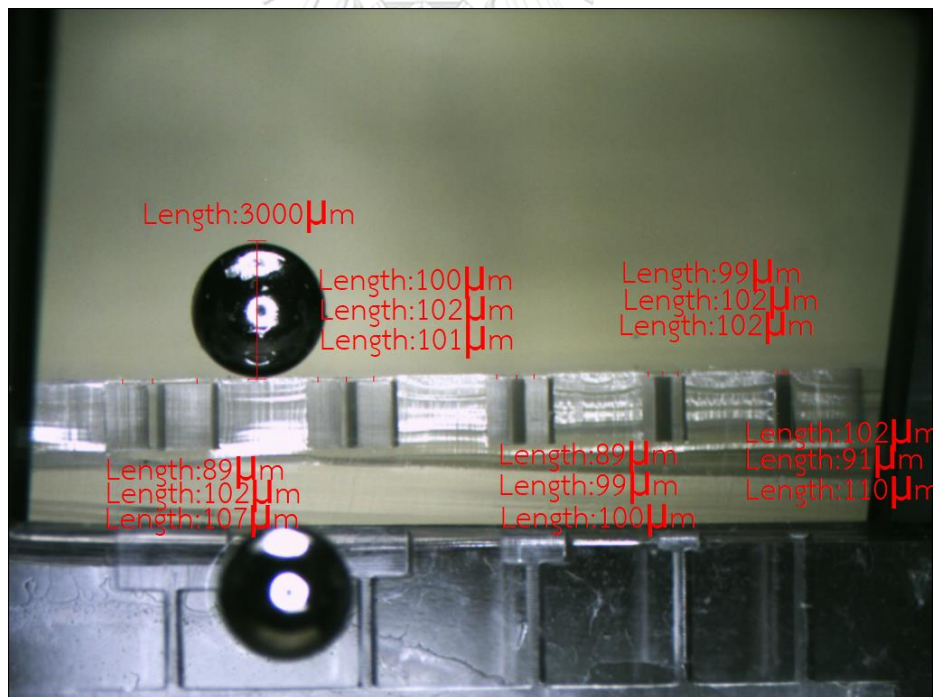
รูปที่ ค.1 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 1



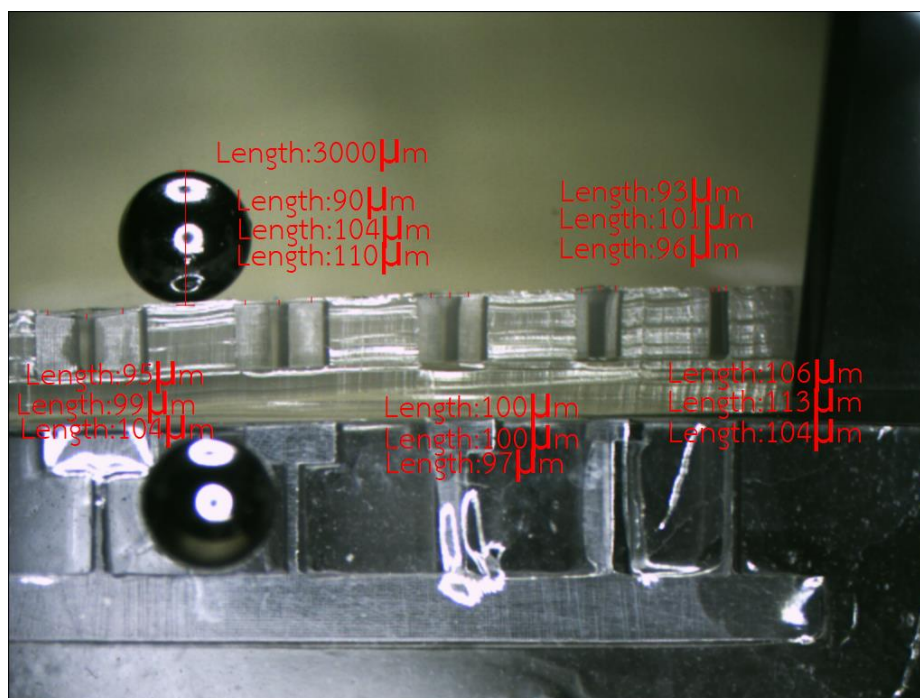
รูปที่ ค.2 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 2



รูปที่ ค.3 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 3



รูปที่ ค.4 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 4



รูปที่ ค.5 การวัดค่าความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานทดสอบที่ 5

ตารางที่ ค.1 ตารางบันทึกการวัดค่าความหนาของฟิล์มบาง

		ความหนาของฟิล์มบาง (μm)					ค่าเฉลี่ยรวม (ชั้นงาน)
		ตำแหน่ง A	ตำแหน่ง B	ตำแหน่ง C	ตำแหน่ง D	ตำแหน่ง E	
ชั้นงานที่ 1	วัดครั้งที่ 1	110	92	105	104	106	103
	วัดครั้งที่ 2	94	93	110	96	92	97
	วัดครั้งที่ 3	97	92	110	108	101	102
	ค่าเฉลี่ย (ตำแหน่ง)	100	92	108	103	100	101
ชั้นงานที่ 2	วัดครั้งที่ 1	97	110	87	110	111	103
	วัดครั้งที่ 2	102	106	113	106	109	107
	วัดครั้งที่ 3	102	94	93	98	98	97
	ค่าเฉลี่ย (ตำแหน่ง)	100	103	98	105	106	102
ชั้นงานที่ 3	วัดครั้งที่ 1	93	100	108	109	91	100
	วัดครั้งที่ 2	89	114	112	97	83	99
	วัดครั้งที่ 3	102	98	102	102	94	100
	ค่าเฉลี่ย (ตำแหน่ง)	95	104	107	103	89	100
ชั้นงานที่ 4	วัดครั้งที่ 1	89	100	89	99	102	96
	วัดครั้งที่ 2	102	102	99	102	91	99
	วัดครั้งที่ 3	107	101	100	102	110	104
	ค่าเฉลี่ย (ตำแหน่ง)	99	101	96	101	101	100
ชั้นงานที่ 5	วัดครั้งที่ 1	95	90	100	93	106	97
	วัดครั้งที่ 2	99	104	100	101	113	103
	วัดครั้งที่ 3	104	110	97	96	104	102
	ค่าเฉลี่ย (ตำแหน่ง)	99	101	99	97	108	101
ค่าเฉลี่ยความหนาฟิล์มบางจากทุกตำแหน่งและทุกชั้นงาน (μm)							101

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิวพล ฉายแก้ว เกิดเมื่อวันศุกร์ที่ 15 มิถุนายน พุทธศักราช 2533 สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หลังจากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัทพานาโซนิค ออโต้โมทีฟ ซีเอสเต็มส์ เอเชียแปซิฟิก ตำแหน่งรองหัวหน้างานของแผนกวิจัยและพัฒนา โดยมีความรับผิดชอบในการตรวจสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ของวิทยุรถยนต์และการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ ก่อนเข้ามาศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

