การทดสอบไมโครแอคชัวเอเตอร์แบบนิวมาติกส์ที่สร้างด้วยเทคนิคชั้นสังเวย

Tests of Pneumatic Micro-Actuators Fabricated with Sacrificial-Layer Technique

ศิวพล ฉายแก้ว[1*], ธนพร เสาวรัตน์ชัย[1], วีระยุทธ ศรีธุระวานิช[1] และ อลงกรณ์ พิมพ์พิณ[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ E-mail : siwapol.c@student.chula.ac.th, โทรศัพท์ : 081-353-8466

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอไมโครแอคชัวเอเตอร์แบบนิวมาติกส์ซึ่งมีองค์ประกอบหลักอยู่สองส่วนคือ ชั้นควบคุมที่เป็นช่องการไหลของอากาศ และฟิล์มบางที่ทำหน้าที่เป็นวาล์ว ฟิล์มบางจะกระดกตัวเมื่อป้อนอากาศอัดตัวเข้ามาในชั้นควบคุม โดยชั้นควบคุมจะหล่อด้วยวิธี Soft Lithography ในแม่พิมพ์ที่สร้างจากการพิมพ์สามมิติ ชั้นควบคุมสร้างจากสาร PDMS (โพลีไดเมททิลไซโลเซน) ในขณะที่ฟิล์มบางนั้นไม่สามารถใช้วิธีดังกล่าวได้เนื่องจากบางมาก (<100 ไมโครเมตร) ดังนั้นเทคนิคการปลูกฟิล์มบางจาก PDMS บนชั้นสังเวยซึ่งเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จึงถูกนำมาใช้ โดยเริ่มจากการเคลือบชั้นสังเวยบนแผ่นสเตนเลสแล้วเคลือบ PDMS ทับด้านบน หลังจากนั้นจะประสานชิ้นงานระหว่างชั้นควบคุมและฟิล์มบางเข้าด้วยกันด้วยหลักการการปล่อยประจุแบบโคโรน่า ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์มีราคาถูกและขนาดเล็ก หลังจากที่ทำการประสานชิ้นงานเข้าด้วยกันแล้วก็จะทำการละลายชั้นสังเวยซึ่งจะเหลือฟิล์มบาง PDMS ที่เคลือบปิดชั้นควบคุมอยู่เท่านั้น ในขั้นตอนต่อไปจะวัดความแข็งแรงของการประสานด้วยการอัดแรงดันอากาศในช่วง 0-100 kPa เข้าไปในชั้นควบคุม การทดสอบแสดงว่าความแข็งแรงของการประสานชิ้นงานอยู่ในช่วง 0-25 kPa ข้อจำกัดหนึ่งคือแม่พิมพ์ของชั้นควบคุมมีผิวไม่เรียบ

คำหลัก: ระบบของไหลจุลภาค, ไมโครแอคชัวเอเตอร์แบบนิวมาติกส์, ชั้นสังเวย, ความแข็งแรงของการประสาน

Abstract

This work has developed a pneumatic micro-actuator that has two main parts such as control layer and membrane. Control layer could be fabricated from polydimethylsiloxane (PDMS) with soft lithography technique in a 3D-printed plastic mold. However, the same technique could not be applied for a membrane due to its thickness is thinner than 100 μm. Therefore, this work proposed a PDMS film deposition on a sacrificial layer before bonding the membrane on the control layer. The sacrificial material was polyvinyl alcohol (PVA), whose important properties are solubility in water and hazardless. For the fabrication of PDMS membrane, it started with a consecutive deposition of sacrificial layer and PDMS on a stainless substrate. The PDMS membrane was then bonded on the control layer using a corona discharge technique. This technique is very effective, and the equipment is cheap and portable. After bonding, the PVA layer was dissolved, and only PDMS membrane was left behind on the control layer. The bonding strength was tested by applying air pressure between 0-100

kPa to the system. The results showed that the bonding strength is between 0-25 kPa. One limitation was a roughness of plastic mold for the control layer.

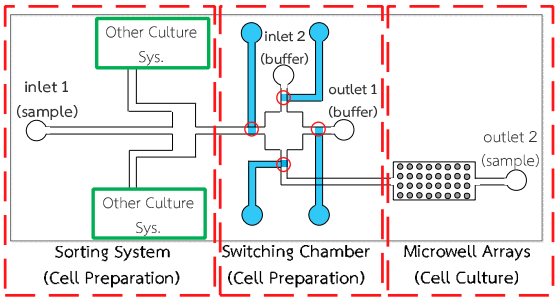
Keywords: Microfluidic system, Pneumatic micro-actuator, Sacrificial layer, Bonding strength

1. บทนำ

ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบกลไฟฟ้าจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนาระบบในส่วนของการคัดแยกเซลล์ด้วยอุปกรณ์ท่อขดแบบเกลียว [1] ซึ่งมีอัตราการไหล 1 mL/min และระบบการดักจับเซลล์ในหลุมรูปทรงสามเหลี่ยมขนาดจุลภาค [2] ซึ่งมีอัตราการไหล 0.1 mL/h เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เซลล์เม็ดเลือดทางชีววิทยา อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของทั้งสองระบบมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้การนำมาทั้งสองระบบมาประกอบเข้าด้วยกันโดยตรงนั้นมีความลำบากต่อการใช้งาน

ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการสร้างอุปกรณ์คั่นกลางระหว่างส่วนของการคัดแยกเซลล์และระบบการดักจับเซลล์เพื่อจะช่วยลดความเร็วของการไหล รวมทั้งส่งถ่ายเซลล์ไปในส่วนอื่นๆด้วย อุปกรณ์นี้จะช่วยให้ระบบการวิเคราะห์เซลล์เดี่ยวสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและทำงานที่พารามิเตอร์ของการไหลที่เหมาะสมได้ อุปกรณ์ดังกล่าวจะประกอบด้วยไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวาล์วควบคุมการไหลทำหน้าที่เปิดปิดการไหลไปในทิศทางที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 1

ไมโครแอคชัวเอเตอร์ที่นำมาใช้งานเป็นไมโครวาล์วมีหลายประเภท ขึ้นกับรูปแบบพลังงานที่ใช้ แต่ด้วยในงานระบบช่องทางไหลจุลภาคประเภทการวิเคราะห์เซลล์เดียวซึ่งไม่ต้องการพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า เป็นต้น มารบกวนเซลล์ ไมโครแอคชัวเอเตอร์แบบนิวมาติกส์ หรือในที่นี้คือ ไมโครวาล์วแบบนิวมาติกส์ เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้



รูปที่ 1 ระบบของไหลจุลภาคที่ประกอบด้วยส่วนคัดแยกและดักจับเซลล์

ไมโครวาล์วแบบนิวมาติกส์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภทได้ เช่น การคัดแยกขนาดเซลล์ [3] ไมโครปั๊ม [4] อุปกรณ์เปิดปิดฟังก์ชั่นการใช้งานในระบบช่องทางไหลจุลภาค [5] เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใช้งานมีข้อจำกัดเพราะการสร้างไมโครวาล์วแบบนิวมาติกส์จะมีความยุ่งยากในการสร้างฟิล์มบาง เนื่องจากขนาดที่บางมาก ซึ่งไม่สามารถใช้วิธี Soft Lithography แบบธรรมดาในการสร้างได้

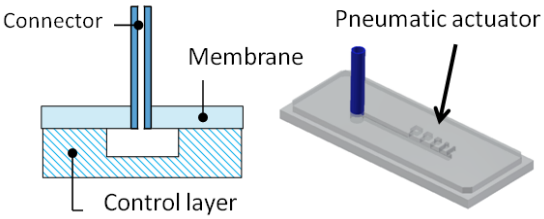
ในการสร้างฟิล์มบางมีหลายวิธี เช่น วิธีการสร้างโดยใช้ Photoresist และเทหล่อชั้นควบคุมพร้อมฟิล์มบาง [6] ซึ่งยากต่อการควบคุมความหนาของฟิล์มและเสียเวลาในการสร้าง หรือวิธีปลูกฟิล์มบนชั้นพลาสติกซึ่งจะทำให้ความยืดหยุ่นของฟิล์มบางลดลง [7]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างฟิล์มบางบนชั้นสังเวยแล้วนำไปเชื่อมประสานก่อนที่จะทำการล้างชั้นสังเวยออก โดยการเลือกใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นชั้นสังเวยซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถละลายน้ำได้โดยไม่ทำอันตรายต่อชิ้นงาน มีราคาถูก และง่ายต่อการเปลี่ยนความหนาของฟิล์มโดยการเปลี่ยนความเร็วรอบและเวลาในการปลูก

ฟิล์มจะช่วยให้การสร้างฟิล์มบางสำหรับไมโครวาล์วแบบนิวมาติกส์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และจะทดสอบความแข็งแรงในการประสานชิ้นงานในเบื้องต้น

2. กระบวนการสร้าง

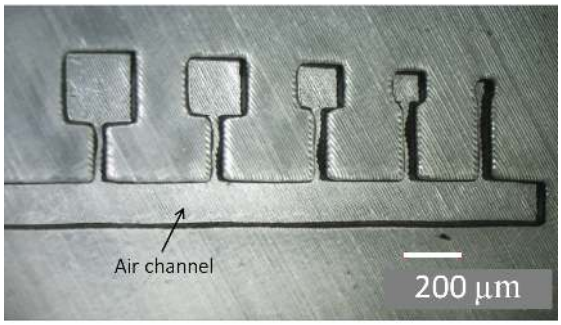
ไมโครวาล์วประกอบไปด้วยสามส่วนมาประกบกันคือ ชั้นควบคุม ฟิล์มบาง และท่อลมเชื่อมต่อภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเมื่อใช้งาน ลมอัดจากระบบนิวมาติกส์จะไหลเข้าสู่ไมโครวาล์วทางท่อลม เมื่อความดันภายในชั้นควบคุมสูงขึ้น จะทำให้ฟิล์มบางเกิดการขยายและกระดกตัว ในทางกลับกันเมื่อลดแรงดันอากาศลง ฟิล์มบางจะเคลื่อนที่กลับสู่สภาพเดิม ซึ่งเราสามารถนำคุณสมบัตินี้ไปใช้งานเพื่อเปิดปิดการไหลได้



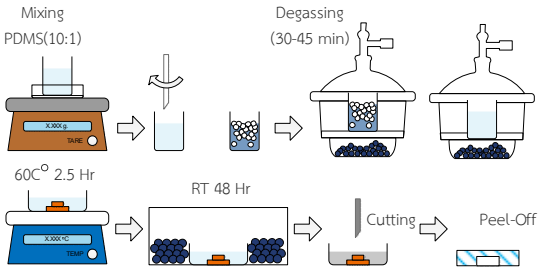
รูปที่ 2 องค์ประกอบหลักของไมโครวาล์ว

2.1 ชั้นควบคุม

ในกระบวนการหล่อชั้นควบคุมจะทำการเทสารโพลีไดเมททิลไซโลเซน (Polydimethylsiloxane-PDMS) ลงบนแม่พิมพ์ที่สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติโดยกระบวนการ Stereo lithography เรียกว่ากระบวนการ Soft Lithography เมื่อทำการเทสารผสม PDMS ลงบนแม่พิมพ์ที่วางในจานเพาะเชื้อแล้วให้นำไปตั้งบนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง แล้วจึงนำงานไปพักในภาชนะปิดที่มีสารดูดความชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วทำการตัดออกและลอกชั้นควบคุมออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานแสดงในรูปที่ 3ก โดยกระบวนการสร้างชั้นควบคุมแสดงในรูปที่ 3ข



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 กระบวนการสร้างชั้นควบคุม (ก) ชั้นควบคุมหลังลอกออกจากแม่พิมพ์ (ข) กระบวนการ Soft Lithography

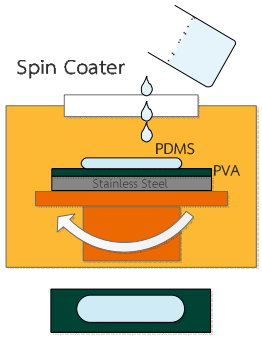
2.2. ฟิล์มบาง

การสร้างฟิล์มบางไม่สามารถใช้วิธีการในข้างต้นได้ เนื่องจากบางมาก (<100 ไมโครเมตร) ดังนั้นทางเลือกหนึ่งในการสร้างฟิล์มบางฟิล์มบางคือการสร้างบนชั้นสังเวยเพื่อให้เป็นที่รับแรงชั่วคราว แล้วนำไปประสานชิ้นงานก่อนทำการล้างออก โดยในที่นี้เราจะใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญคือ สามารถละลายน้ำและไม่ทำลายวัสดุอื่นๆของชิ้นงาน

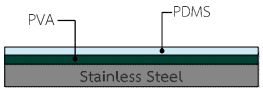
กระบวนการสร้างเริ่มจาก การนำแผ่นสเตนเลสจุ่มสารโพลีไวนิลแอลกอฮอล์แล้วนำมาวางบนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมงเพื่อให้ชั้นสังเวยแห้งสนิท หลังจากนั้นให้ลอกแผ่นสเตนเลสที่จุ่มสารที่แห้งแล้วออกมา และใช้น้ำสะอาดเช็ดแผ่นสเตนเลสด้านล่างเพื่อกำจัดคราบสารออกให้หมด

เมื่อนำสาร PDMS หยดด้านบนของแผ่นสเตนเลสแล้วปั่นที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาทีและ

1,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาทีตามลำดับ ในการเท PDMS บนแผ่นชิ้นงานให้เทตามแนวยาวของชิ้นงาน เพื่อให้ PDMS กระจายตัวไปได้อย่างทั่วถึง หลังจากนั้นให้นำมาตั้งไว้บนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงจนชิ้นงานแห้งสนิท ดังแสดงในรูปที่ 4ก-ข



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 การสร้างฟิล์มบาง (ก) การปั่นเหวี่ยงฟิลม์ PDMS บนชั้นสังเวย และ (ข) PDMS บนชั้นสังเวย

2.3 ท่อลมเชื่อมต่อ

การใช้งานระบบช่องทางไหลจุลภาคจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อออกสู่ภายนอก ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้ท่อหรือเข็มเชื่อมต่อ [8] การใช้แรงกดทับทางกลเพื่อให้ท่อเชื่อมต่อกัน [9] หรือการสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อถาวร [10] เป็นต้น ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบถาวร เพราะเป็นวิธีที่สะดวกต่อการเชื่อมต่อระบบลมจากภายนอกเข้าสู่ไมโครวาล์วแบบนิวมาติกส์

การเชื่อมต่อนี้จะทำการเชื่อมต่อโดยการสอดท่อลมผ่านรูที่เจาะบนชั้น PDMS โดยการเจาะด้วยที่เจาะขนาด 4 มิลลิเมตร รูนี้ยังช่วยระบายไอร้อนในเวลาที่ตั้งบนเตาร้อนและทำให้ชิ้นงานประสานกันดีขึ้น เนื่องจากจะไม่เกิดไอน้ำไปดันให้ไมโครวาล์วเสียสภาพ

3. การประสานชิ้นงาน

การประสานชิ้นงานที่ทำจาก PDMS เข้าด้วยกันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือ O_2 Plasma วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้เวลาในการประสานชิ้นงานนาน โดยจะต้องเสียเวลาในการเปิดปิดระบบสุญญากาศ

การคายประจุโคโรน่า (Corona Discharge) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเชื่อมประสานชิ้นงานประเภท PDMS หรือแก้วเหมือน O_2 Plasma แต่ต่างกันที่รูปแบบอุปกรณ์ การใช้วิธีการคายประจุโคโรน่าจะขจัดสิ่งปนเปื้อนและสร้างกลุ่มสารเคมีที่ทำปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยน -O-Si (CH3)2- ใน PDMS [11] เป็นสารเคมีกลุ่ม Siloxane ซึ่งจะเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวจากไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งทำให้การเชื่อมประสานของ PDMS-PDMS ประสานกันได้ดียิ่งขึ้น [12]

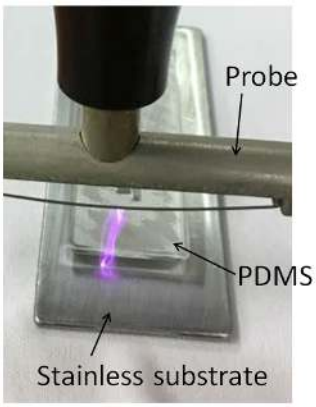
การประสานชิ้นงานโดยการคายประจุโคโรน่า จะใช้เครื่องสร้างการคายประจุโคโรน่า (ELECTRO-TECHNIC PRODUCTS/BD-20) ซึ่งจะสร้างประจุโคโรน่าโดยการใช้แรงดันไฟฟ้า (10-50 kV) และความถี่สูงในช่วง (4-5 MHz) ดังแสดงในรูปที่ 5ก

กระบวนการประสานชิ้นงานเริ่มจากการนำชั้นควบคุมและฟิล์มบางมาใส่ประจุด้วยเครื่องคายประจุโคโรน่า โดยให้ทำเป็นเวลา 2 นาทีต่อชิ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานทั้ง 2 มาประกบติดกันด้วยมือ แล้วใส่ประจุต่ออีก 2 นาที ก่อนนำไปตั้งบนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้การประสานแข็งแรงขึ้น [13] แผนภาพการสร้างแสดงในรูปที่ 5ข

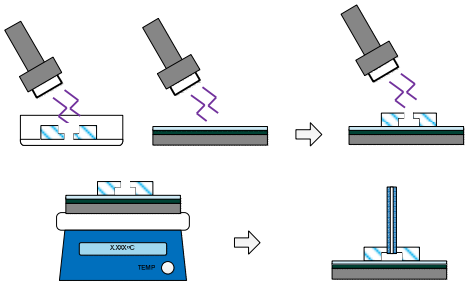
หากต้องการลอกชิ้นงานที่ประสานแล้วออกจากชั้นสังเวยให้นำไปล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ โดยใช้เครื่องล้างอัลตราโซนิคเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุ น้ำบริสุทธิ์แล้วตั้งบนเตาร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และปั่นหมุน จนชิ้นงานหลุดออกจากแผ่นสเตนเลส

รูปที่ 5ค แสดงภาพตัดขวางของชั้นควบคุมและฟิล์มบางที่ล้างออกโดยสมบูรณ์แล้ว ในกรณีที่ล้างชั้นสังเวย

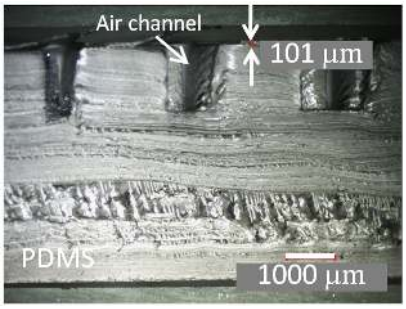
ออกไม่สมบูรณ์จะทำให้ฟิล์มบางมีโอกาสหลุดออกไม่ประสานกับชั้นควบคุมได้ ดังแสดงฟองอากาศสีขาวในรูปที่ 5ง เพราะชั้นสังเวยจะรั้งให้ฟิล์มลอกออกมาด้วยกัน



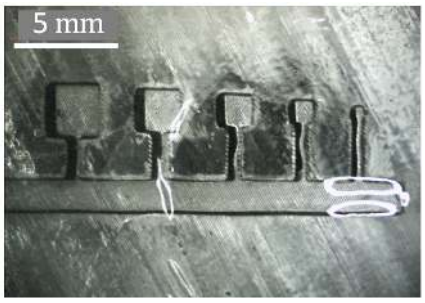
(ก)



(ข)



(ค)

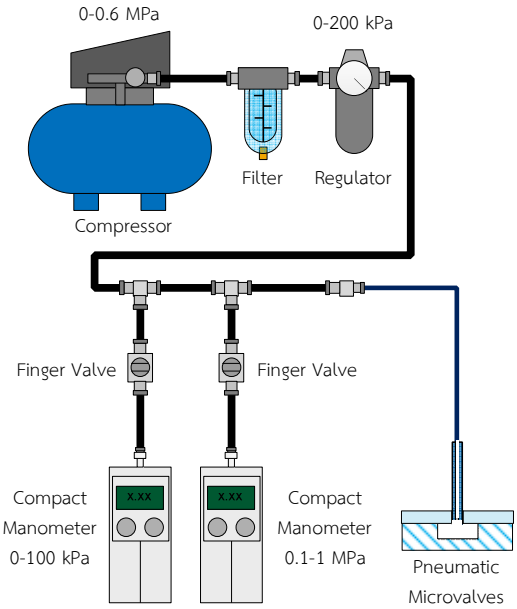


(ง)

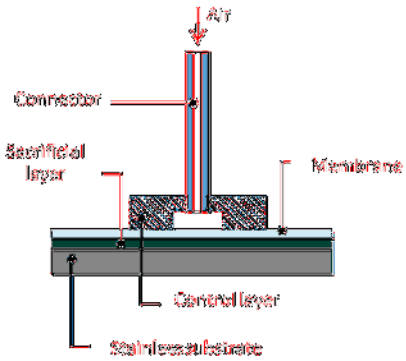
รูปที่ 5 การประสานชิ้นงาน (ก) การให้ประจุโคโลน่า (ข) กระบวนการประสานชิ้นงาน (ค) ภาพตัดขวางของชิ้นงาน (ง) ช่องอากาศที่เกิดระหว่างการสร้าง

4. ระบบนิวมาติกส์และการควบคุม

ระบบที่ใช้ในการควบคุมไมโครวาล์ว คือระบบนิวมาติกส์ซึ่งต้องประกอบไปด้วยปั๊มลม ตัวกรอง ตัวปรับแรงดัน และมานอมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6ก



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 6 อุปกรณ์ควบคุมความดันลมและทดสอบความแข็งแรงของการประสาน (ก) วงจรนิวมาติกส์ (ข) ชุดทดสอบความแข็งแรง (ค) รูปถ่ายชิ้นงาน

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบนิวมาติกส์ ประกอบด้วย ปั๊มลม (PUMA/mini pancake OL-1204) ตัวกรองลมดักน้ำ (SMC/AF20-02BC-A) ตัวควบคุมแรงดัน(SMC/IR2000-02BG) และมานอมิเตอร์(SMC/ PPA100 และ PPA102) โดยปั๊มลมสามารถใช้งานได้ในช่วง 0-0.6 MPa และตัวควบคุมแรงดันใช้งานได้ในช่วง 0-200 kPa

อุปกรณ์นิวมาติกส์นี้จะทำการปรับระดับแรงดันอากาศให้อยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งานได้ และในส่วนการเชื่อมต่อกับมานอมิเตอร์จะมีวาล์วสำหรับป้องกันแรงดันอากาศในช่วงที่ไม่ได้อยู่ในค่าการใช้งาน

5. การทดสอบความแข็งแรง

ความแข็งแรงในการเชื่อมประสานด้วยวิธีการคายประจุโคโรน่าจะเป็นข้อจำกัดในการเลือกใช้ช่วงความดัน การทดสอบจะทำโดยการวัดแรงดันอากาศที่เพิ่มระดับจนชิ้นงานเสียหาย

การทดลองนี้จะทำก่อนที่จะล้างเอาชั้นสังเวยออกโดยการเพิ่มระดับแรงดันอากาศในช่วง 0 - 200 kPa และทำการปรับแรงดันอากาศขึ้นทุก 10 kPa เป็นเวลา 5 นาทีต่อ 1 ค่า การทดสอบความแข็งแรงของการเชื่อมประสานจะใช้ตัวอย่าง 3 ชิ้น และต่อท่อลมจากระบบนิวมาติกส์เข้าสู่ไมโครวาล์วโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 6 ข-ค ผลการทดลองแสดงว่าความดันที่จ่ายไปที่ไมโครวาล์วได้มีค่าประมาณ 25±5 kPa โดยที่ค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันอากาศสูงสุดก่อนที่ลมอัดจะไหลออกทางด้านข้างของชิ้นงานตามรอยประสาน ปัญหาอย่างหนึ่งคือความหยาบผิวของแม่พิมพ์ควรจะมีค่าน้อยลง เพื่อทำให้ชิ้นงาน PDMS มีผิวเรียบมากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 3ก) และทำให้การประสานชิ้นงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

6. สรุปผล

การสร้างแอคชัวเอเตอร์แบบนิวมาติกส์ด้วยชั้นสังเวยและประจุโคโลน่าเพื่อการประสานชิ้นงานสามารถสร้างชิ้นงานได้ด้วยดี การล้างไวนิลแอลกอฮอล์สามารถทำได้ง่ายด้วยน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งอาจจะใช้เวลาค่อนข้างนานแต่ก็ไม่เกิดความเสียหายต่อวัสดุอื่นๆ เมื่อนำแอคชัวเอเตอร์ที่เป็นต้นแบบมาทดสอบ พบว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะสามารถทนแรงดันอากาศได้ในช่วง 0-25 kPa ก่อนที่รอยประสานจะเกิดความเสียหาย

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนวิจัยจากโครงการแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาฯ สร้างเสริมพลังจุฬาฯก้าวสู่ศตวรรษที่ 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (อุปกรณ์การแพทย์ชาญฉลาด)

8. เอกสารอ้างอิง

[1] อรรถวุฒิ ถนอมศรีเดชชัย, "การคัดแยกเซลล์ด้วยขนาดโดยใช้ท่อจุลภาครูปร่างขดเกลียว," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาฯ, 2557.

[2] เทวัญ ตงมณี, "การศึกษาเทคนิคหลุมขนาดจุลภาครูปทรงสามเหลี่ยมสำหรับการดักจับอนุภาคขนาดจุลภาค," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาฯ, 2558.

[3] 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,* 10.1039/C5LC01328C vol. 16, no. 3, pp. 574-585, 2016.

[4] 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.

[5] 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,* 10.1039/B806803H vol. 9, no. 3, pp. 417-426, 2009.

[6] J. D. Tice, A. V. Desai, T. A. Bassett, C. A. Apblett, and P. J. A. Kenis, "Control of pressure-driven components in integrated microfluidic devices using an on-chip electrostatic microvalve," *RSC Advances,* 10.1039/C4RA10341F vol. 4, no. 93, pp. 51593-51602, 2014.

[7] 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.

[8] 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,* 10.1038/nbt951 vol. 22, no. 4, pp. 435-439, 04//print 2004.

[9] 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,* 10.1039/B820683J vol. 9, no. 9, pp. 1298-1300, 2009.

[10] A. C. Glavan *et al.*, "Rapid fabrication of pressure-driven open-channel microfluidic devices in omniphobic RF paper," *Lab on a Chip,* 10.1039/C3LC50371B vol. 13, no. 15, pp. 2922-2930, 2013.

[11] K. Haubert, T. Drier, and D. Beebe, "PDMS bonding by means of a portable, low-cost corona system," *Lab on a Chip,* 10.1039/B610567J vol. 6, no. 12, pp. 1548-1549, 2006.

[12] K.-S. Koh, J. Chin, J. Chia, and C.-L. Chiang, "Quantitative Studies on PDMS-PDMS Interface Bonding with Piranha Solution and its Swelling Effect," *Micromachines,* vol. 3, no. 2, p. 427, 2012.

[13] J. Wu and N. Y. Lee, "One-step surface modification for irreversible bonding of various plastics with a poly(dimethylsiloxane) elastomer at room temperature," *Lab on a Chip,* 10.1039/C3LC51324F vol. 14, no. 9, pp. 1564-1571, 2014.