

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การพัฒนากระบวนการสร้างเมมเบรนฝังไมโครคอยล์

Development of a Fabrication Process of Micro Coil Embedded Membrane

ภากร นนทวิวัฒน์วิชัย^{1,*}, ชินชัย อุดมธารักษ์², นที จรัสสุริยงค์²,
อติ บุญจิตราดุลย์¹, อลงกรณ์ พิมพ์พิณ¹ และ ถนอม โลมาศ³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

² วิศวกรรมนาโน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

³ หน่วยปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จ.ปทุมธานี 12120

* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 218-6610, โทรสาร: (662) 252-2889

E-mail: shockup@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ของโลหะฝังอยู่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของไมโครแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยงานนี้ใช้ Polydimethylsiloxane (PDMS) และนิกเกิลเป็นวัสดุเมมเบรนและคอยล์โลหะ ตามลำดับ กระบวนการสร้างที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ Photolithography, กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electroplating) และ Membrane Development โดยกระบวนการเริ่มจากการนำแผ่นสแตนเลสมาขัดผิวแล้วเคลือบด้วยโพไลรีซิส หลังจากนั้นทำ Photolithography เพื่อสร้างลวดลายของคอยล์นิกเกิล ต่อมาจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต แล้วทำการปลูกนิกเกิลด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีจนได้ความหนาตามที่ต้องการ ซึ่งพบว่าค่า Current density ที่ใช้ไม่ควรเกิน 66.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในส่วนสุดท้ายจึงนำคอยล์นิกเกิลที่หลุดออกจากแผ่นสแตนเลสไปวางลงบนชั้นของ PDMS ที่ผ่านการทำโพสิเมอร์ไลเซชันบนแผ่นพลาสติกใส แล้วจึงเท PDMS ทับอีกครั้งและทำโพสิเมอร์ไลเซชันเพื่อให้คอยล์นิกเกิลแทรกอยู่ระหว่างชั้นของ PDMS สุดท้ายจึงลอกชั้นของ PDMS ออกจากแผ่นพลาสติกใสได้เป็นแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่ภายใน ในการศึกษาพบว่าหากต้องการทำให้คอยล์ของนิกเกิลหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสหลังจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะต้องควบคุมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลกับแผ่นสแตนเลส โดยแรงยึดเหนี่ยวนี้เป็นฟังก์ชันของความขรุขระและพื้นที่ผิวส่วนที่เชื่อมสายไฟของคอยล์นิกเกิล จากผลการทดลองพบว่าผลคูณระหว่างค่าความขรุขระกับพื้นที่ผิวส่วนเชื่อมสายไฟควรมีค่าน้อยกว่า $3.95 \mu\text{m} \times \text{mm}^2$ เพื่อให้แรงยึดเหนี่ยวมีค่าน้อยและทำให้คอยล์นิกเกิลหลุดออกจนหมด

คำหลัก: เมมเบรน, ไมโครคอยล์, PDMS, ไมโครแอคชูเอเตอร์, แม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

The fabrication process of micro coil embedded membrane is developed. This membrane is the main component in micro electromagnetic membrane actuator. In this study, Polydimethylsiloxane (PDMS) and Nickel are used as membrane and metal coil materials, respectively. The fabrication process

consists of 3 main processes, namely photolithography, electroplating and membrane development. In the photolithography process, the stainless steel substrate is prepared by polishing, then coated with photoresist, and finally photolithography is used to create a nickel coil pattern on the stainless steel substrate. In the electroplating process, the stainless steel substrate is dipped into potassium dichromate solution, and nickel is then electroplated onto the mold until the desired thickness is achieved. For this process, the current density should be no higher than 66.2 mA/cm^2 . In the membrane development process, the nickel coil is removed from the stainless steel substrate, placed onto one polymerized PDMS layer that is previously coated on a transparent sheet, then another layer of PDMS is poured over and polymerized in order to sandwich the coil between the two PDMS layers. Finally, the resulting micro coil embedded membrane is peeled off from the transparent sheet. After the electroplating process, we found the problem that the coil still adheres to the stainless steel substrate and is very difficult to peel off the substrate. We therefore postulated that an adhesion force between nickel and stainless steel substrate is a function of the roughness of the substrate and the area of the nickel coil, and designed an experiment to test this. Within the experimented range, the result shows that the product of the roughness of the substrate and the nickel coil area should be no more than $3.95 \text{ } \mu\text{m} \times \text{mm}^2$ in order to minimize the adhesion force such that nickel coil can be peeled off the stainless steel substrate.

Keywords: membrane, micro coil, PDMS, micro actuator, electromagnetic

1. บทนำ

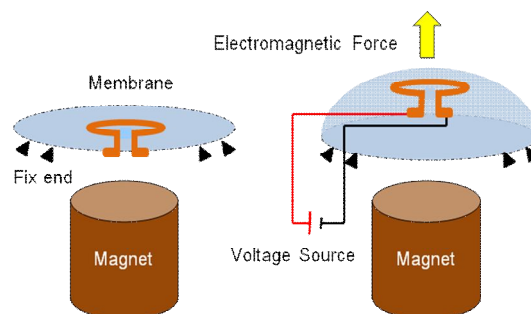
ไมโครแอกชูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมได้หลายประเภท เช่น การนำไปประยุกต์ใช้ในปั๊มขนาดเล็กเพื่อใช้ในการขับของเหลวจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง [1-4] หรือการนำมาใช้ในการสร้างซินเทติกส์เจ็ตซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยไดอะแฟรม (เมมเบรนแอกชูเอเตอร์) ติดตั้งในช่องปิด โดยด้านบนช่องปิดนี้มีรูออริฟิซขนาดเล็กเจาะอยู่ เมื่อไดอะแฟรมขยับขึ้นลงจะสามารถสร้างเจ็ตการไหลที่ปากรูออริฟิซได้ [5] เป็นต้น

หลักการหลายรูปแบบถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการขับไมโครแอกชูเอเตอร์ เช่น Piezoelectric [2, 6], Thermopneumatic [3], Shape memory alloy [4] และ Electrostatic [7] เป็นต้น

นอกจากหลักการเหล่านี้ ยังมีอีกหนึ่งหลักการที่ได้รับความนิยมมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง นั่นคือ หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) เนื่องจากสามารถใช้งานได้ทั้งที่ความถี่ค่อนข้างสูงและใช้ศักย์ไฟฟ้าต่ำ โดยในปัจจุบัน ไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการนี้มักถูก

สร้างในรูปแบบของไมโครเมมเบรนแอกชูเอเตอร์แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของไดอะแฟรมหรือเมมเบรนที่มีคอยล์โลหะฝังอยู่และแม่เหล็กถาวร โดยหลักการทำงานเริ่มจาก เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าสู่คอยล์โลหะที่ติดอยู่บนแผ่นไดอะแฟรม จะเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ทำให้ไดอะแฟรมขยับขึ้นลงได้ โดยทิศทางของการเคลื่อนที่จะขึ้นกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า

กระบวนการสร้างเมมเบรนแอกชูเอเตอร์ที่ใช้กัน



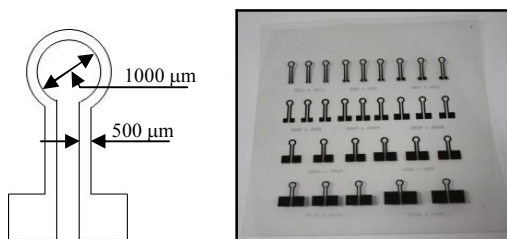
รูปที่ 1 ไดอะแฟรมแสดงหลักการของ Electromagnetic membrane actuator

อยู่ในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่จะมีลักษณะร่วมกันคือ การเทวสุที่ใช้เป็นเมมเบรนไวบนแผ่นซิลิกอน เมื่อสร้างโครงสร้างด้านบนเสร็จแล้วจึงกัดซิลิกอนจากด้านหลัง (Back etching) ด้วยสารเคมีจนหมดเหลือไว้เฉพาะส่วนโครงสร้างด้านบน [1, 9-11] ซึ่งวิธีการนี้จะต้องมีการลงทุนสูง อีกทั้งมีขั้นตอนการสร้างที่ละเอียดซับซ้อนเพราะต้องใช้เทคนิค Deep Reactive Ion Etching (DRIE) ในการสร้าง และการที่ตัวเมมเบรนถูกยึดติดอยู่กับฐานแผ่นซิลิกอน ที่มีความแข็งและแบนราบ ทำให้แอคชูเอเตอร์ไม่สามารถดัดโค้งได้ จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการใช้งานกับพื้นผิวโค้ง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการพัฒนากระบวนการสร้างไมโครเมมเบรนแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรายละเอียดขั้นตอนในการสร้างที่ไม่ซับซ้อน ใช้เครื่องมือที่หาได้ง่าย และมีโครงสร้างอ่อนนุ่ม สามารถดัดโค้งได้และสามารถนำเมมเบรนแอคชูเอเตอร์ไปประยุกต์ใช้ติดบนพื้นผิวที่มีความโค้งได้ง่าย

2. กระบวนการสร้าง

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เทคโนโลยีเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคหรือ MEMS (Micro Electromechanical Systems) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างส่วนของแผ่นเมมเบรนของแอคชูเอเตอร์ที่มีคอยล์ฝังอยู่ด้านใน ซึ่งลักษณะของคอยล์โลหะถือเป็นส่วนที่สำคัญของแอคชูเอเตอร์ที่ใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ในงานนี้เลือกใช้ลักษณะของคอยล์รูปวงกลมที่เรียบง่าย กว้าง 0.5 มิลลิเมตร รัศมีวงใน 0.5 มิลลิเมตร และเปลี่ยนขนาดของพื้นที่บริเวณที่ใช้เชื่อมสายไฟ ตั้งแต่ 0.5 ถึง 32 ตารางมิลลิเมตร เพื่อดูว่าขนาดของพื้นที่มีผลต่อกระบวนการสร้างที่นำเสนออย่างไร รูปที่ 2 แสดงรูปร่างและขนาดของคอยล์โลหะที่ออกแบบ



รูปที่ 2 รูปร่างของคอยล์โลหะและ mask ที่มีพื้นที่ต่าง ๆ

กระบวนการสร้างแผ่นเมมเบรนแอคชูเอเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3k ขั้นตอนแรกได้แก่ Photolithography เป็นการใช้เทคนิคการฉายแสงผ่าน mask (แสดงในรูปที่ 2) ลงบนแผ่นสแตนเลสที่มีโฟโตรีซิส (photoresist) เคลือบอยู่ เพื่อสร้างลายของคอยล์โลหะบนแผ่นสแตนเลส

ในขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electroplating) เป็นการปลูกชั้นโลหะขึ้นภายในลายของคอยล์โลหะบนแผ่นสแตนเลสเพื่อใช้เป็นคอยล์ของแอคชูเอเตอร์ หลังจากนั้นจึงทำให้คอยล์หลุดจากแผ่นสแตนเลส แล้วนำคอยล์ที่ได้มาไว้ในขั้นตอนสุดท้ายคือ Membrane development เป็นขั้นตอนการสร้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้ Polydimethylsiloxane (PDMS) เป็นวัสดุ โดยการเท PDMS ลงบนคอยล์โลหะ แล้วลอกทั้งสองวัสดุออกมาพร้อมกันได้เป็นแผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ฝังอยู่ภายใน

ในส่วนถัดไปจะอธิบายกระบวนการในแต่ละขั้นตอนโดยละเอียด

2.1 Photolithography

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการสร้างลายของคอยล์ลงบนแผ่นสแตนเลส โดยเริ่มจากการเคลือบแผ่นสแตนเลสด้วยฟิล์มโฟโตรีซิส (ชนิด negative) ที่อุณหภูมิ 90 °C นำ mask ที่มีลายคอยล์ของโลหะมาทาบลงบนชิ้นงาน แล้วฉายแสงเป็นเวลา 20 วินาที หลังจากนั้นจึงล้างโฟโตรีซิสในส่วนที่ไม่ถูกแสงออกด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเกิดเป็นลายของคอยล์ขึ้น สุดท้ายนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เพื่อระเหยน้ำออก รูปที่ 3ข แสดงภาพถ่ายลายของคอยล์นิกเกิลเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอน Photolithography

2.2 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี เป็นขั้นตอนการปลูกโลหะตามลายที่เกิดขึ้นหลังขั้นตอน Photolithography ให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ นิกเกิล (Ni) ขั้นตอนนี้เริ่มจากนำแผ่นสแตนเลสที่มีลายของคอยล์นิกเกิลจากขั้นตอนที่ผ่านมา มาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำกระบวนการ

ไฟฟ้าเคมีให้ได้ความหนาในระดับหนึ่ง โดยใช้สารละลายนิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) สกัดท้ายคือล้างโพโตรีซิสออกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายหลังขั้นตอนนี้ คอยล์โลหะจะต้องหลุดออกจากแผ่นสแตนเลส รูปที่ 3ค แสดงภาพถ่ายของคอยล์นิกเกิลหลังจากหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลส

2.3 Membrane development

ในขั้นตอนนี้จะใช้ Polydimethylsiloxane (PDMS) เป็นวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวเมมเบรน ขั้นตอนนี้เริ่มจากผสมโมโนเมอร์กับแคตตาลิสของ PDMS ในอัตราส่วน 10:1 โดยปริมาตร แล้วจึงเท PDMS ลงบนแผ่นใสแล้วทำการหมุนเหวี่ยงให้ได้ความหนาประมาณ 50-100 ไมโครเมตร อบให้ PDMS แข็งตัวที่ 70°C หลังจากนั้นจึงนำคอยล์ของนิกเกิลมาวางไว้บน PDMS แล้วเท PDMS ทับอีกครั้งแล้วนำไปอบ สุดท้ายจึงลอก PDMS ที่มีนิกเกิลฝังอยู่ภายในออกจากแผ่นใสกลายเป็นเมมเบรนเพื่อนำไปประกอบเป็นแอคซิวเอเตอร์ต่อไป รูปที่ 3ง แสดงภาพถ่ายของแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์นิกเกิลฝังอยู่ภายใน

ในการสร้างแผ่นเมมเบรนฝังไมโครคอยล์ตามกระบวนการสร้างที่นำเสนอ นั้น พบว่าในบางขั้นตอนจะไม่สามารถสร้างได้ตามที่ต้องการ เช่น ในขั้นตอนหลังจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี คอยล์นิกเกิลนั้นไม่หลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสหากพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างไม่เหมาะสม จึงต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญต่อกระบวนการสร้างที่นำเสนอ

3. ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของ Current density ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใส่ให้กับชิ้นงานต่อพื้นที่ของลายของคอยล์โลหะ (ไม่รวมพื้นที่ของ Photoresist) ในขั้นตอนกระบวนการไฟฟ้าเคมี และผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลกับแผ่นสแตนเลส ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลของ Current density ต่ออัตราการปลูกคอยล์นิกเกิล (Deposition rate)

การทดลองเริ่มจากการเปลี่ยน Current density ที่ค่าต่าง ๆ กัน แล้วนำคอยล์ที่ได้ภายหลังขั้นตอนกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาวัดความหนา เพื่อหาอัตราการปลูกคอยล์ (Deposition rate) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่ม current density มากขึ้นอัตราการปลูกคอยล์นิกเกิลก็มากขึ้นตามเช่นกันดังรูปที่ 4 โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$D = 0.61I \quad (1)$$

โดยที่ D คือ deposition rate ($\mu\text{m/hr}$)

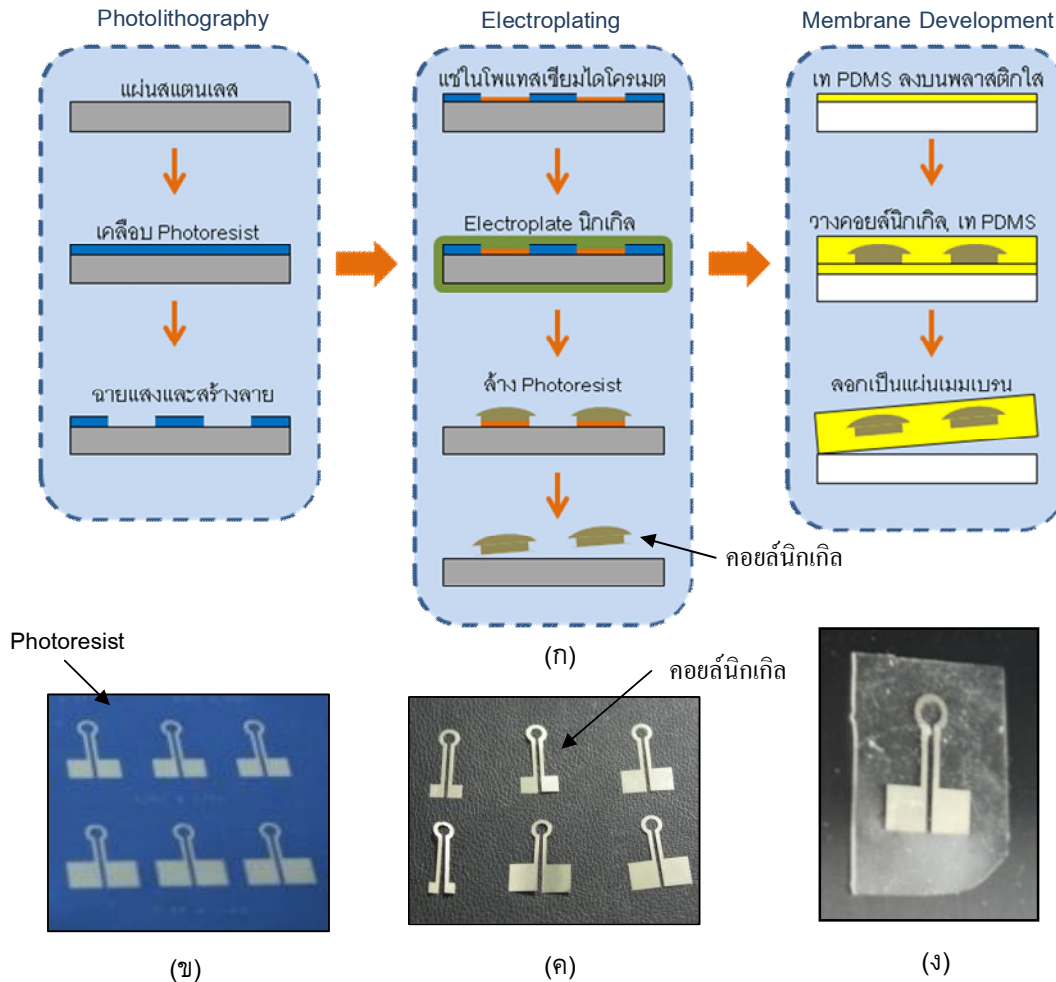
I คือ current density (mA/cm^2)

ในการทดลองนี้ยังพบว่า หาก current density มีค่าสูงกว่า 66.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (0.9 แอมแปร์สำหรับพื้นที่ของชิ้นงานที่ทำการทดลอง) ลักษณะของคอยล์ที่เกิดขึ้นหลังทำการกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะโค้งงอเสียรูปไป

3.2 การลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลกับแผ่นสแตนเลส

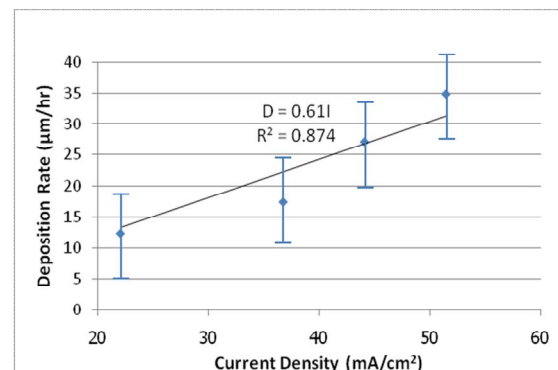
ส่วนสำคัญในงานวิจัยนี้อยู่ที่ขั้นตอนภายหลังจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยเมื่อทำการกระบวนการไฟฟ้าเคมีเรียบร้อยแล้ว คอยล์นิกเกิลจะยังคงติดอยู่บนผิวของแผ่นสแตนเลส แต่ด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ จำเป็นที่จะต้องทำให้คอยล์ของนิกเกิลที่หลุดออกมาอิสระจากแผ่นสแตนเลสเสียก่อนที่จะนำไปเท PDMS ต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคนิคเฉพาะขึ้นมา เพื่อช่วยให้คอยล์นิกเกิลหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสได้โดยง่าย

โดยในเบื้องต้นมีแนวคิดที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลกับแผ่นสแตนเลสเป็นพารามิเตอร์หลักที่มีความสำคัญที่ยึดเหนี่ยวโลหะทั้งสองไว้ ดังนั้นการหาวิธีการเพื่อลดแรงนี้จึงน่าจะทำให้กระบวนการสร้างที่คอยล์จะหลุดออกมาจากแผ่นสแตนเลสประสบความสำเร็จได้ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิค 2 เทคนิคในการลดแรงยึดเหนี่ยว ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ไดอะแกรมของกระบวนการสร้างและรูปถ่ายชิ้นงานหลังจากแต่ละขั้นตอน, (ก) ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างทั้ง 3 ขั้นตอนหลัก, (ข) ภาพถ่ายลายของคอยล์หลังขั้นตอน Photolithography, (ค) ภาพถ่ายคอยล์นิกเกิลหลังกระบวนการไฟฟ้าเคมี, (ง) ภาพถ่ายแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์นิกเกิลฝังอยู่

เทคนิคแรกคือการแช่ชิ้นงานลงในโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ก่อนการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยโพแทสเซียมไดโครเมตจะไปสร้างฟิล์มออกไซด์บางๆ ระหว่างชั้นของสแตนเลสกับนิกเกิล เป็นการช่วยลดพื้นที่การยึดเกาะระหว่างผิวสแตนเลสกับคอยล์นิกเกิลให้ลดน้อยลง จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวต่อหน่วยพื้นที่ลดลงเช่นกัน ซึ่งพบว่าหากแช่ชิ้นงานลงในโพแทสเซียมไดโครเมตน้อยกว่า 1 นาที จะทำให้คอยล์ของนิกเกิลยังคงติดแน่นกับแผ่นสแตนเลส แต่เมื่อแช่ชิ้นงานทั้งที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที พบว่าจะ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง current density กับอัตราการปลูกคอยล์นิกเกิล

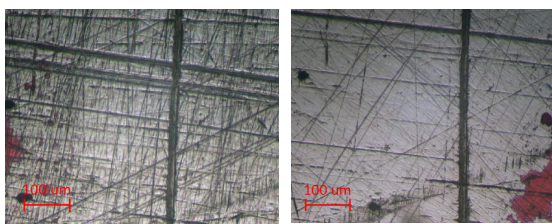
ช่วยให้คอลลีนิกเกิดหลุดออกจากผิวของแผ่นสแตนเลสได้ง่าย

เทคนิคถัดไปคือการขัดพื้นผิวสแตนเลสก่อนเข้าสู่ขั้นตอน Photolithography การขัดผิวสแตนเลสให้เรียบมากขึ้นเป็นการทำให้ความขรุขระลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างนิกเกิลกับสแตนเลสลดลง ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างวัสดุทั้งสองก็น่าจะลดลงด้วยเช่นกัน รูปที่ 5 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นสแตนเลสก่อนและหลังขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 โดยความขรุขระลดลงจาก 0.178 ไมโครเมตรเป็น 0.070 ไมโครเมตร

ในการทดลองนี้ใช้กระดาษทรายเบอร์ที่แตกต่างกันขัดผิวของสแตนเลส แล้วทำการวัดค่าความขรุขระซึ่งนิยามเป็นค่า rms ของความสูงต่ำบนพื้นผิว

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเบอร์ของกระดาษทรายที่ใช้ขัด (ขัด 100 ครั้งในทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกันบนระนาบ) กับค่าความขรุขระที่เกิดขึ้นซึ่งพบว่าความขรุขระจะลดลงเมื่อใช้กระดาษทรายเบอร์ 0 จนถึงเบอร์ 800 และหากใช้เบอร์ที่ละเอียดมากขึ้นความขรุขระของแผ่นสแตนเลสจะไม่เปลี่ยนแปลงนัก

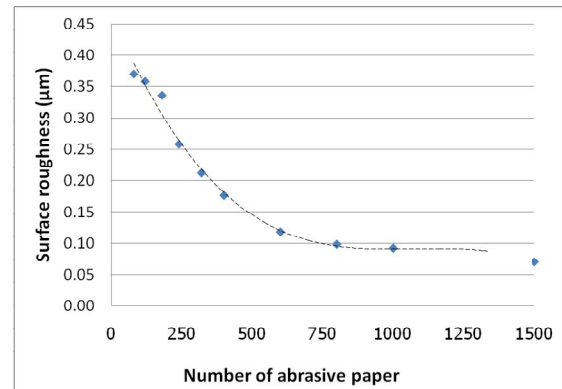
หลังจากนั้น จึงนำแผ่นสแตนเลสที่มีความขรุขระ 0.118, 0.164, 0.212 และ 0.336 ไมโครเมตร ไปทำ Photolithography และการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะ current density เดียวกันเท่ากับ 18.38 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 9 ชั่วโมง (ความหนาของคอลลีนิกเกิด ≈ 110 ไมโครเมตร) และทำการทดลองสำหรับขนาดพื้นที่บริเวณส่วนที่ใช้เชื่อมสายไฟต่างๆ จากค่า 0.5-32 ตร.ม.ม.



(ก)

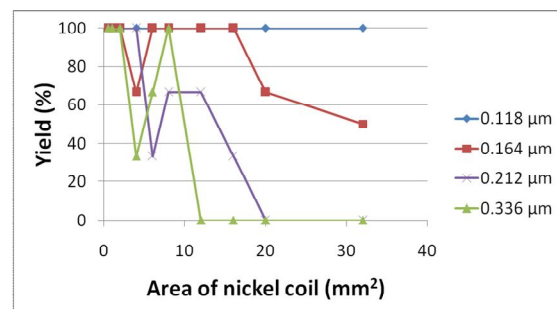
(ข)

รูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นสแตนเลส, (ก) ก่อนขัด, (ข) หลังขัดด้วยกระดาษทราย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระดาษทรายเบอร์ต่างๆ กับค่าความขรุขระ

ผลการทดสอบพบว่า แผ่นสแตนเลสที่มีความขรุขระ 0.118 ไมโครเมตร คอลลีนิกเกิดทุกขนาดพื้นที่จะหลุดออกจากผิวของสแตนเลสจนหมดดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่ผิวบริเวณที่เชื่อมสายไฟกับเปอร์เซ็นต์ของการหลุดออกของคอลลีนิกที่ค่าความขรุขระทั้ง 4 ค่า โดยเปอร์เซ็นต์ของการหลุดออกของคอลลีนิกถูกนิยามว่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนระหว่างจำนวนคอลลีนิกเกิดที่หลุดออกจากผิวสแตนเลสต่อจำนวนของคอลลีนิกเกิดที่ทดสอบทั้งหมดสำหรับพื้นที่ส่วนเชื่อมสายไฟนั้น (มีคอลลีนิก 3 คอลลีนิกต่อขนาดพื้นที่หนึ่ง) จากกราฟจะเห็นว่าที่ความขรุขระลดลงเปอร์เซ็นต์ของการหลุดออกของคอลลีนิกจะมีมากขึ้น ในขณะที่ค่าความขรุขระของผิวเท่ากัน คอลลีนิกเกิดที่มีพื้นที่ส่วนเชื่อมสายไฟขนาดเล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะหลุดจากผิวของแผ่นสแตนเลสได้ง่ายกว่า



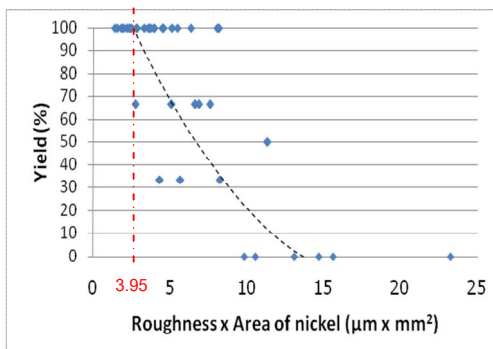
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง พื้นที่บริเวณเชื่อมสายไฟกับเปอร์เซ็นต์การหลุดของคอลลีนิกที่ความขรุขระต่างๆ ของผิวสแตนเลส

จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าทั้งความขรุขระและขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะทั้งสองนั้น มีผลต่อการหลุดออกของคอยล์นิกเกิล ดังนั้นในการศึกษานี้จึงนิยามตัวแปรใหม่เพื่อใช้อ้างอิงแทนผลของแรงยึดเหนี่ยววัลฟ์ คือ ผลคูณระหว่างค่าความขรุขระของผิวสแตนเลสกับขนาดพื้นที่ของส่วนที่เชื่อมสายไฟของคอยล์นิกเกิล

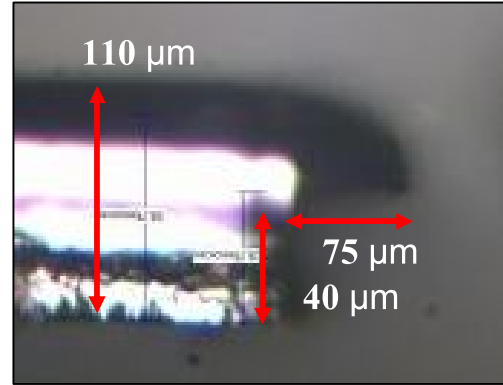
กราฟรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการหลุดออกของคอยล์นิกเกิลกับพารามิเตอร์ใหม่ดังกล่าว พบว่า เมื่อผลคูณของความขรุขระกับพื้นที่ส่วนเชื่อมสายไฟมีค่าน้อย เปอร์เซ็นต์ของการหลุดออกของคอยล์นิกเกิลจะเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองนี้ชี้แนะว่า หากต้องการทำให้คอยล์นิกเกิลขนาดใดๆ หลุดออกจากแผ่นสแตนเลสหลังจากกระบวนการดังกล่าวแล้ว ผลคูณระหว่างค่าความขรุขระกับขนาดพื้นที่ควรมีค่าไม่เกิน $3.95 \mu\text{m} \times \text{mm}^2$

4. ไมโครคอยล์และแผ่นเมมเบรน

สำหรับไมโครคอยล์นิกเกิลที่ได้ภายหลังจากการทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีเรียบร้อยแล้ว พบว่า รูปร่างของคอยล์จะมีลักษณะคล้ายเห็ดดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งน่าจะเกิดจากเมื่อนิกเกิลถูกทำกระบวนการไฟฟ้าเคมีจนมีความสูงมากกว่าความหนาของโพโตรีซิส (ประมาณ 40 ไมโครเมตร) จะมีส่วนของนิกเกิลยื่นออกไปด้านข้างเหนือชั้นโพโตรีซิสด้วย โดยพบว่าส่วนที่ยื่นนี้มีขนาดประมาณ 75 ไมโครเมตรสำหรับความหนาของคอยล์ 110 ไมโครเมตร



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลคูณค่าความขรุขระและขนาดพื้นที่ของคอยล์กับเปอร์เซ็นต์การหลุดออกของคอยล์นิกเกิล



รูปที่ 9 ภาพถ่ายด้านข้างของคอยล์นิกเกิลที่มีลักษณะคล้ายเห็ด

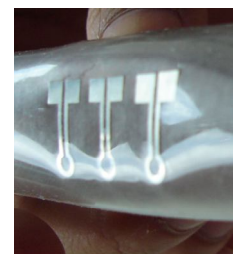
เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างทั้งหมดจะได้แผ่นเมมเบรนที่มีไมโครคอยล์ของนิกเกิลฝังอยู่ภายใน ในรูปที่ 10ก จะเห็นได้ว่าแผ่นเมมเบรนสามารถบิดให้โค้งงอได้ อย่างไรก็ตาม ค่า Stiffness และความหนาของคอยล์ก็จะเป็นตัวกำหนดไม่ให้อาจสามารถงอแผ่นเมมเบรนได้มากนัก ดังรูปที่ 10ข

5. สรุป

งานวิจัยนำเสนอกระบวนการแบบใหม่สำหรับสร้างแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์นิกเกิลฝังอยู่ภายใน โดยเริ่มจากการนำแผ่นสแตนเลสมาขัดผิวแล้วเคลือบด้วยโพโตรีซิส หลังจากนั้นทำ Photolithography เพื่อสร้างลวดลายของคอยล์นิกเกิล แล้วจึงนำชิ้นงานไปผ่านขั้นตอนกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อปลูกคอยล์นิกเกิลให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ พารามิเตอร์ที่ควรคำนึงถึงในขั้นตอนนี้คือ current density ซึ่งไม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 แผ่นเมมเบรนที่คอยล์ของนิกเกิลฝังอยู่ภายใน, (ก) รัศมีความโค้งมาก, (ข) รัศมีความโค้งน้อย

ควรมีค่าเกิน 66.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และแรงยึดเหนี่ยวต่อพื้นที่ระหว่างผิวสแตนเลสกับ คอยล์นิกเกิล การลดแรงยึดเหนี่ยวนี้เพื่อให้คอยล์ นิกเกิลหลุดออกจากแผ่นสแตนเลส ในการศึกษาครั้งนี้ทำ โดยการจุ่มชิ้นงานในสารละลายโพแทสเซียมไดโคร เมต อย่างน้อย 1 นาที และขัดผิวสแตนเลสเพื่อลด ความขรุขระของผิวลง จากผลการศึกษาพบว่าผลคูณ ระหว่างค่าความขรุขระกับพื้นที่ของคอยล์ควรน้อยกว่า $3.95 \mu\text{m} \times \text{mm}^2$ เพื่อจะทำให้คอยล์นิกเกิลหลุด ออกจากแผ่นสแตนเลส ในขั้นตอนสุดท้ายคือ Membrane development ซึ่งเริ่มจากวางคอยล์ลงบน PDMS ที่ผ่านการโพลีเมอร์ไลเซชันแล้ว เท PDMS ทับอีกชั้นแล้วทำโพลีเมอร์ไลเซชันอีกครั้ง ในตอน สุดท้ายจึงลอกออกมาจากฐานที่เป็นแผ่นพลาสติกใส ได้เป็นแผ่นเมมเบรนที่มีคอยล์นิกเกิลฝังอยู่ภายในได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนจาก สกว. และ สกอ. ภายใต้ทุนวิจัยเลขที่ MRG5080238 และขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกล ไฟฟ้าจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Yin, H.L., Huang, Y.C., Fang, W., and Hsieh, J., (2007), A novel electromagnetic elastomer membrane actuator with a semi-embedded coil, *Sens. Actuator A*, Vol. 139, pp. 194-202.

[2] Zhang, T., and Wang, Q.M., (2006), Performance Evaluation of a valveless micropump driven by a ring-type piezoelectric actuator, *IEEE Transactions Ultrasonics*, Vol. 53, No. 2.

[3] Jeong, O.C., and Yang S.S., (2000), Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragm, *Sens. Actuator A*, Vol. 83, pp. 249-255.

[4] Makino, E., Mitsuya, T., and Shibata T., (2001), Fabrication of TiNi shape memory

micropump, *Sens. Actuator A*, Vol. 88, pp. 256-262.

[5] Liu, Y., Ciuryla, M., Amitay M., Kwan, C., Myatt, J.H., Zhang, X., Ren, Z., and Casey, J.P., (2006), Integrated flight control and flow control using synthetic jet arrays, AFRL-VA-WP-TP-2006-344.

[6] Leea, C.C., Guoa, Q., Caob, G.Z., and Shena, I.Y., Effect of electrode size and silicon residue on piezoelectric thin-film membrane actuators, *Sens. Actuator A*, Vol. 147, pp. 279-285.

[7] Wang, P.K.C., Gutierrez, R.C., and Bartman, R.K., (1996), A method for designing electrostatic-actuator electrode pattern in micromachined deformable mirrors, *Sens. Actuator A*, Vol. 55, pp. 211-217.

[8] Filhol, F., Defay, E., Divoux, C., Zinck, C., and Delaye, M., (2005), Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning, *Sens. Actuator A*, Vol. 123-124, pp. 483-489.

[9] Jeong, H.K., Jeong, O.C., and Yang, S.S., (2000), Fabrication of an electromagnetic actuator with the planar coil, in: *Proceeding of the Digest of SPIE Seventh International Symposium on Smart Structures and Materials*, Vol. 3990, pp. 272-280.

[10] Kim, K.H., Yoon, H.J., Jeong, O.C., and Yang, S.S., (2005), Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator, *Sens. Actuator A*, Vol. 117, pp. 8-16.

[11] Kim, K.H., Yoon, H.J., Jeong, O.C., and Yang, S.S., (2005), Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator, *Sens. Actuator A*, Vol. 117, pp. 8-16.