

การออกแบบและสร้างไมโครวาล์วเพื่อควบคุมการไหลของแก๊สด้วยเทคโนโลยี
ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

นายรุ่งเรือง พัฒนากุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-533-589-4

**DESIGN AND FABRICATION OF MICROVALVE FOR
GAS FLOW CONTROL USING MEMS TECHNOLOGY**

Rungrueang Phatthanakun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

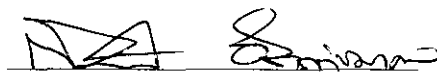
Academic Year 2006

ISBN 974-533-589-4

การออกแบบและสร้างไมโครวาล์วเพื่อควบคุมการไหลของแก๊สด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม

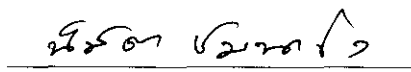
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



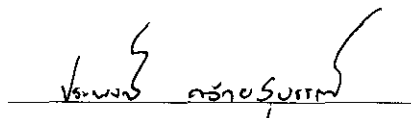
(ผศ. ดร.กิติ อัดถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



(ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.ประพจน์ คล้ายสุบรรณ)

กรรมการ



(รศ. ดร.เสาวณี รัตนพานี)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



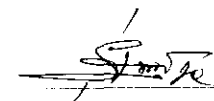
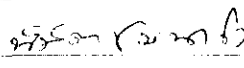
(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รุ่งเรือง พัฒนากุล : การออกแบบและสร้างไมโครวาล์วเพื่อควบคุมการไหลของแก๊สด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (DESIGN AND FABRICATION OF MICROVALVE FOR GAS FLOW CONTROL USING MEMS TECHNOLOGY) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร. นิमित ชมนาวัง, 171 หน้า. ISBN 974-533-589-4

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคหรือ MEMS ได้เข้ามามีบทบาทในการควบคุมการไหลของแก๊สและของเหลว ในรูปของไมโครวาล์ว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิด-ปิดให้แก๊สหรือสารละลายไหลไปตามช่องทางเดินจุลภาคได้โดยการควบคุมทางไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ มุ่งหมายที่จะออกแบบ และสร้างไมโครวาล์วสำหรับใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส ที่ทำงานด้วยแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างฐานรองที่มีช่องทางเดินจุลภาคและ โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นเนื่องจากความเค้นภายในและการขยายตัวตามอุณหภูมิของชั้นวัสดุ การพัฒนากระบวนการสร้างช่องทางเดินจุลภาคพร้อมกับฐานรองนิกเกิลด้วยวิธีการสร้างแม่พิมพ์ชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อสร้างเข้าขั้นรูปก่อนนำเข้าสู่กระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ทำให้ได้ช่องทางเดินจุลภาคขนาดประมาณ $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ ส่วนแผ่นคานปลายอิสระสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นสารไวแสงโฟโตรีซิสซชนิดลบ SU-8 ด้วยกระบวนการสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง ซึ่งภายหลังการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้งจะมีระยะปลายแผ่นคานที่โค้งตัวขึ้นจากฐานรองประมาณ $273 \mu\text{m}$ ซึ่งจะได้รัศมีส่วนโค้งเท่ากับ 1.93 มิลลิเมตรที่ค่าความเค้นภายในชั้นวัสดุ SU-8 เท่ากับ 4.55 MPa สำหรับแรงดันไฟฟ้าแบบคิกที่สามารถดึงแผ่นคานลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สในสภาวะปกติได้เท่ากับ 200 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 204 โวลต์ การยกตัวของแผ่นคานจะเริ่มขึ้นเมื่อมีแรงดันแก๊ส 69 kPa เข้าสู่ไมโครวาล์ว ซึ่งจะให้อัตราการไหลของมวลสูงสุดในการไหลแบบ ความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงเท่ากับ $24.653 \mu\text{g}/\text{sec}$ และเท่ากับ $15.289 \mu\text{g}/\text{sec}$ สำหรับการไหลแบบความเร็วต่ำกว่าความเร็วเสียง โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถดึงแผ่นคานให้เคลื่อนที่ลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สเท่ากับ 150 โวลต์ ก่อนการลัดวงจรระหว่างขั้วต่อชิ้นงาน ซึ่งระดับแรงดันแก๊สดังกล่าวสูงกว่าแรงดันแก๊สที่ใช้ในระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ที่ 27.6 kPa แสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำโครงสร้างดังกล่าวไปควบคุมการไหลของแก๊สในระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ในการพัฒนาโครงสร้างการทำงานต่อไป

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

RUNGRUEANG PHATTHANAKUN: DESIGN AND FABRICATION OF
MICROVALVE FOR GAS FLOW CONTROL USING MEMS

TECHNOLOGY. THESIS ADVISOR: NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 171

PP. ISBN 974-533-589-4

MEMS/ELECTROSTATIC MICROVALVE/GAS FLOW CONTROL

Micro-Electro Mechanical System (MEMS) has played a significant role in flow control of gas and liquid. One form of MEMS devices used to control flow of fluids through microchannels is microvalve. In this thesis electrostatic actuation is used to enable or disable fluid flow in microscale. Novel microstructures and materials of a curl-up type electrostatic microvalve have been proposed in order to reduce fabrication cost and activation voltage. The microvalve is designed to have two major parts, a conductive substrate with a UV LIGA fabricated gas inlet orifice, and a polymer-based curl-up closure plate. Fabrication of the conductive substrate was done by UV lithography of an SU-8 photoresist column on copper or graphite sacrificial materials followed by electroforming of nickel thick layer. After removal of SU-8 column, a $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ gas inlet hole was obtained. The gas inlet hole was filled with AZ P4620 photoresist baked and planarized. Subsequently, a $1,040\ \mu\text{m} \times 720\ \mu\text{m}$ sacrificial aluminum layer was deposited above the planarized gas inlet hold. Polymeric closure plate was then fabricated by spin coating of $2.5\ \mu\text{m}$ -thick SU-8 photoresist and patterning with UV lithography so that a $940\ \mu\text{m} \times 620\ \mu\text{m}$ area of SU-8 film was on top of the sacrificial aluminum layer while another large area anchored on nickel substrate. Conductive composite layers of thin chromium/copper/nickel were then deposited on top of SU-8 closure plate. After removal of all sacrificial materials, the SU-8 closure plate was forced to curl away


removal of all sacrificial materials, the SU-8 closure plate was forced to curl away from the substrate due to different thermal expansion between SU-8 and composite metal layers. At room temperature the free standing tip of the released closure plate was raised up from the nickel substrate for 273 μm .

The completed microvalve was tested by applying a positive DC voltage to the composite metal layer on the closure plate and a ground to the nickel substrate. In absence of gas flow through the orifice, a voltage of 200 V was needed to pull down the closure plate. This pull-in voltage was in agreement with calculations based-on finite difference method. This voltage was less than the one required by a microvalve with silicon substrate and silicon dioxide closure plate for the same size. The test with presence of gas flow was done by feeding gas pressure of 69 kPa through the inlet hole and applying a voltage to the microvalve. The applied voltage between 100 V to 180 V could pull the closure plate down to a certain distance but not fully. Applying a voltage greater than 180 V caused a severe short circuit and destroyed the device. Nevertheless, a microvalve of novel structure and materials with lower pull-in voltage and fabrication cost has been successfully demonstrated. Better controls of fabrication processes and testing apparatus are needed in order realized a fully functioning microvalve in presence of gas flow.

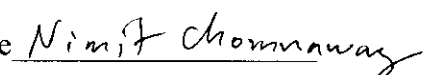
School of Electrical Engineering

Academic Year 2006

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่างๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรารุณี สุจิตจร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี อ. ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ อ. กองพัน อารีรักษ์ และ อ. สุดารัตน์ ขวัญอ่อน คณาจารย์ประจำสำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.อดิสร เตือนตรานนท์ อาจารย์ ดร.อนุรัตน์ วิศิษฐ์สรอรรถ คุณณอม โลมาส และ คุณดอน คล้ายทับทิม นักวิจัย และผู้ช่วยวิจัยประจำห้องปฏิบัติการนาโนอิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องกลจุลภาค ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ อาจารย์ ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ นักวิจัยประจำศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ

กระบวนการสร้างและพัฒนา ได้รับความอนุเคราะห์จาก คุณนรินทร์ อดิวงศ์แสงทอง และ คุณรังสรรค์ เมืองเหลือ นักวิจัยศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง (ERC) ผู้แนะนำและให้ความรู้ด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด คุณอัญชุลี รักด่านกลาง คุณภัทราวรรณ สิทธิกวินกุล และ บุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ให้ความรู้ ชี้แนะปัญหาต่างๆ ในการดำเนินงานของข้าพเจ้า

คุณวิไลลักษณ์ คัดสร้าง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด คุณชมพู่ ทรัพย์ประทุมสิน คุณพรทิพย์ เชื้อมชัยตระกูล คุณชิตพงษ์ เกตุณอม คุณสาทิพย์ ศรีมุงคุณ คุณทนางศักดิ์ เสงี่ยมรัตน์ คุณอัสวิน แซ่ตั้ง คุณศิลา สอนสุจิตรา คุณวิริยะ แผนสุวรรณ และคุณอังกัญญ์ เหมือนแก้วจินดา เพื่อนร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ศซ.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ทุนสนับสนุนเครื่องมือวิจัยและสถานที่ทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่างๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมชาย คุณแม่ฮั่ว พี่หมิง พี่หน่อง ครอบครัวพัฒนากุล อาอีตุ้ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่างๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา และตลอดไป

รุ่งเรือง พัฒนากุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	7
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น.....	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	8
2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 ระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม.....	10
2.2 การควบคุมการไหลระดับอุตสาหกรรมและกลไกการทำงานของไมโครวาล์ว.....	11
2.3 ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต.....	19
2.4 การประยุกต์ใช้ไมโครวาล์วกับระบบแสดงอักษรผลเบรลล์.....	24
2.5 ไมโครวาล์วไมโครวาล์วที่จับเร็วด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ.....	27
3 การออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	30
3.1 การออกแบบช่องทางเดินแก๊สและฐานรองนิกเกิล.....	31
3.2 แผ่นปิดช่องทางเดินแก๊สชนิดแผ่นคานปลายอิสระ.....	32
3.3 แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน.....	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การออกแบบช่องทางเดินแก๊ส	49
4 กระบวนการพัฒนาโครงสร้างไมโครวาล์ว	61
4.1 การสร้างโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจก	61
4.2 การสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาค	66
4.3 กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สจุลภาคให้เรียบ	74
4.4 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส	77
4.5 สรุป	80
5 การวัดและทดสอบการทำงานของไมโครวาล์ว	82
5.1 แผ่นคานโค้งปลายอิสระภายหลังการปลดปล่อยโครงสร้าง	82
5.2 การเคลื่อนที่ของแผ่นคานปลายอิสระเมื่อมีแรงดันแก๊สกระทำใต้แผ่นปิด	89
5.3 การควบคุมการไหลของแก๊ส	94
5.4 สรุป	96
6 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	98
6.1 สรุปงานวิจัย	98
6.2 ข้อเสนอแนะ	99
รายการอ้างอิง	102
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจก	114
ภาคผนวก ข. กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานโลหะทองแดง	117
ภาคผนวก ค. กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานกราฟต์	120
ภาคผนวก ง. กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สจุลภาคให้เรียบ	123
ภาคผนวก จ. กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส	125
ภาคผนวก ฉ. โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	128
ภาคผนวก ช. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระที่โค้งขึ้น เนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ	143
ภาคผนวก ซ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระ ที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นภายใน	147

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่น ตัวนำคู่ขนาน	153
ภาคผนวก ฉ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณอัตราการใช้ ของมวลผ่านท่อสอบเข้า.....	161
ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	169
ประวัติผู้เขียน.....	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของชั้นวัสดุและพารามิเตอร์การออกแบบทางโครงสร้างของแผ่นคาน ปลายอิสระ.....	33
3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณแบบจำลองอัตราการผลิตของมวลแก๊ส.....	58
4.1 สารละลายที่ใช้ในกระบวนการสกัดชั้นโลหะและกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า.....	66
5.1 คุณลักษณะไมโครวาล์ว.....	83
5.2 ผลการวิเคราะห์การไหลของแก๊สในโตรเจนผ่านช่องทางเดินแก๊สขนาด 70 μ m \times 70 μ m.....	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	การทำงานของระบบแสดงอักษรเบรลล์โดยใช้ไมโครวาล์วเป็นตัวควบคุมการไหลของแก๊สไฟฟ้า.....2
1.2	การทำงานและโครงสร้างของไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต.....4
1.3	โครงสร้างของไมโครวาล์วแบบแผ่นคานปลายอิสระ.....6
1.4	ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเกียรติด้วยการสร้างแบบขึ้นหนา.....6
2.1	การทำงานของวาล์วแบบแผ่นคาน.....13
2.2	โครงสร้างของวาล์วแบบแผ่นไดอะแฟรม.....13
2.3	โครงสร้างการทำงานของวาล์วแบบสองกลีบ.....14
2.4	โครงสร้างการทำงานของวาล์วแบบสอดเข้า-บานออก.....14
2.5	กลไกการขับเร้าทางอุณหภูมิให้กับแถบขับเร้าคู่ควบ.....15
2.6	กลไกการขับเร้าโดยให้ความร้อนกับแก๊สที่ถูกขังอยู่ในปริมาตรปิดขยายหรือหดตัว.....15
2.7	กลไกการขับเร้าโดยการขยายหรือหดตัวของวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก.....16
2.8	กลไกการขับเร้าโดยการใช้แรงดันแก๊สจากแหล่งจ่ายภายนอก.....16
2.9	กลไกการขับเร้าโดยใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....17
2.10	กลไกการขับเร้าโดยใช้โลหะผสมที่จัดจํารูปร่าง.....17
2.11	กลไกการขับเร้าโดยใช้หลักการของโซลินอยด์.....18
2.12	กลไกการขับเร้าโดยใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต.....18
2.13	การทำงานและโครงสร้างของไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต.....20
2.14	ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตใช้หลักการสมดุลแรงดัน.....21
2.15	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นคาน.....21
2.16	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแผ่นฟิล์มตัวนำไฟฟ้าจากนิกเกิลให้วางตัวเป็นรูปตัว S.....22
2.17	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นไดอะแฟรม.....22
2.18	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นไดอะแฟรม Yobas, et al. (2001).....23
2.19	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นปิดและคานยึด.....23
2.20	ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นปิดและล้อเกวียน Yobas, et al. (2003).....24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ลักษณะคานยึดในการจำลองการทำงานทั้ง 3 แบบ	
(ก) คานยึดแบบตรง.....	26
(ข) คานยึดแบบขด.....	26
(ค) คานยึดแบบขาปู.....	26
2.22 ไมโครวาล์วที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ.....	28
2.23 โครงสร้างไมโครวาล์วแผ่นคานโค้งปลายอิสระที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้.....	29
3.1 ส่วนประกอบหลักของไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ.....	30
3.2 เบ้าขึ้นรูปฐานรองนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเลต.....	32
3.3 มิติโครงสร้างของแผ่นคานปลายอิสระ	
(ก) รูปภาคตัดขวาง.....	33
(ข) รูปด้านบน.....	33
3.4 แผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติ.....	34
3.5 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ	
(ก) ผลเฉลยที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน.....	37
(ข) ผลเฉลยจากโครงสร้างที่ออกแบบในกระบวนการสร้าง.....	37
3.6 โครงสร้างและแรงกระทำกับชั้นวัสดุของแผ่นคาน	
(ก) โครงสร้างของแผ่นคานด้านข้าง.....	38
(ข) ภาคตัดขวางด้านหน้า.....	38
(ค) การกระจายความเค้นภายใน.....	38
(ง) แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับชั้นวัสดุ.....	38
3.7 รูปแบบทางเรขาคณิตที่ใช้แสดงพฤติกรรมของแผ่นคานโค้ง.....	39
3.8 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระจากความเค้นภายในและการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ	
(ก) ผลเฉลยที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน.....	42
(ข) ผลเฉลยจากโครงสร้างที่ออกแบบในกระบวนการสร้าง.....	42
3.9 ผลจากการเปลี่ยนความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล	
(ก) ระดับความโค้งของแผ่นคานที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) การเปลี่ยนแปลงรัศมีส่วนโค้งเมื่อความหนาของชั้นโลหะ निकเกิดเพิ่มขึ้น.....	43
3.10 แบบจำลอง 1 มิติของแผ่นคานปลายอิสระ	
(ก) โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระในระนาบปกติ.....	44
(ข) โครงสร้างแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนาน.....	44
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อไม่พิจารณาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก โดยทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน.....	47
3.12 การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน เมื่อความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกเปลี่ยนไปโดยการทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน.....	48
3.13 การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนของแผ่นคานขนาดที่ออกแบบในกระบวนการสร้างเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงแรงดันแนบติด.....	50
3.14 ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระของ Haji-Babaei.....	50
3.15 ผลเฉลยแบบจำลองคู่ควบกล-ไฟฟ้า เมื่อกำหนดสถานะโค้งเริ่มต้นให้กับแผ่นคาน	
(ก) การเคลื่อนที่ของแผ่นคานโค้งปลายอิสระเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันแนบติด.....	51
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระยะเคลื่อนที่ของปลายแผ่นคานโค้ง.....	51
3.16 ช่องทางเดินแก๊สของไมโครวาล์ว.....	52
3.17 การไหลของของไหลแบบอัดตัวได้ผ่านท่อที่สอบเข้า.....	53
3.18 การแปรผันตรงของสัมประสิทธิ์การสูญเสียและอัตราการไหลของมวลแก๊ส.....	54
3.19 พารามิเตอร์ทางโครงสร้างของไมโครวาล์วเมื่อสมมติให้แผ่นปิดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และขนาด	
(ก) รูปภาคตัดขวาง.....	56
(ข) รูปด้านบน.....	56
3.20 อัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อความสูงของแผ่นปิดเปลี่ยนแปลงที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียระดับต่างๆ เมื่อกำหนดขนาดช่องทางเดินแก๊สเท่ากับ $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$	57
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายกับอัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อพิจารณาพื้นที่ทางออกของแก๊สที่ขนาดต่างๆ.....	57
3.22 การไหลของแก๊สผ่านที่ได้จากการทดลองและการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ก) ข้อมูลการไหลของแก๊สจากการทดลอง.....	59
(ข) ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้ว.....	59
3.23 ผลเฉลยของแบบจำลองการไหลที่ได้รับการปรับปรุงและไม่ได้รับการปรับปรุง.....	60
4.1 โครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระ.....	61
4.2 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานกระจก	
(ก) ชั้นโลหะอลูมิเนียมบนฐานรอง.....	63
(ข) ชั้นสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8 บนชั้นอลูมิเนียม.....	63
(ค) การสกัดชั้นทองแดงออกด้วยมาส์กสารไวแสง AZ.....	63
(ง) สกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้งเพื่อปลดปล่อยแผ่นคานให้โค้งตัวขึ้น.....	63
4.3 การม้วนตัวของแผ่นคานในเมทิล-แอลกอฮอล์ เมื่อยังไม่มีชั้นนิกเกิลบนชั้นทองแดง.....	64
4.4 การม้วนตัวของแผ่นคานในเมทิล-แอลกอฮอล์ เมื่อเพิ่มชั้นนิกเกิลบนชั้นทองแดง.....	64
4.5 ปัญหาการเนบยัคติดกันของแผ่นปิดกับฐานกระจก.....	65
4.6 การกินของแผ่นคานเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง.....	65
4.7 ช่องทางเดินแก๊สที่ทะลุผ่านฐานรองนิกเกิลที่สร้างจากฐานทองแดง	
(ก) ฐานรองนิกเกิลที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	67
(ข) เบ้าขึ้นรูปฐานรองนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์หนา ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต.....	67
4.8 พื้นผิวทองแดงก่อนเข้าสู่กระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า	
(ก) ผิวทองแดงก่อนการยิงเม็ดทราย.....	68
(ข) ผิวทองแดงภายหลังถูกยิงเม็ดทราย.....	68
4.9 ผลการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า	
(ก) ชั้นนิกเกิลแยกตัวออกจากผิวทองแดงที่เรียบ.....	69
(ข) มวลนิกเกิลที่มีความสูง 500 μm เมื่อฐานทองแดงถูกยิงด้วยเม็ดทราย.....	69
4.10 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนฐานทองแดง	
(ก) โครงสร้าง SU-8 ที่สร้างโดยกระบวนการสร้างลวดลายแม่พิมพ์หนา ด้วยแสงอัลตราไวโอเลต.....	70
(ข) ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนล้นเบ้าขึ้นรูป เพื่อสร้างช่องทางออกของแก๊สด้านล่าง.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) ชัดผิว निकเกิดให้มีระนาบเดียวกับมวล SU-8 ด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์.....	70
(ง) สร้างแท่งมวลของสาร ไวแสงชั้นที่2 บนมวลSU-8ด้านล่าง (ภาพด้านข้าง).....	70
4.11 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยการชุบ निकเกิดด้วยไฟฟ้าบนฐานทองแดง (ต่อ)	
(ก) ชุบ निकเกิดด้วยไฟฟ้าจนล้นเข้าขึ้นรูปเพื่อสร้างช่องทางออกแก๊สด้านบน (ภาพด้านบน).....	71
(ข) สกัดชั้นทองแดงออกเพื่อปล่อยแผ่น निकเกิดออกจากฐานทองแดง (ภาพล่างฐานรอง).....	71
(ค) สลายพันธะ SU-8 ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (มองจากด้านล่างฐานรอง).....	71
(ง) นำชิ้นงานไปขัดเรียบและขัดเงา (ภาพด้านบน).....	71
4.12 ช่องทางเดินแก๊สที่ทะลุผ่านฐานของไมโครวาล์วที่สร้างจากฐานกราไฟต์	
(ก) ฐานรอง निकเกิดที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	72
(ข) เข้าขึ้นรูปฐานรอง निकเกิดที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนา ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	72
4.13 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยกระบวนการชุบ निकเกิดด้วยไฟฟ้าบนฐานกราไฟต์	
(ก) สร้างเข้าขึ้นรูปด้วยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ชั้นหนา ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต(มุมมองด้านข้าง).....	73
(ข) ชุบ निकเกิดด้วยไฟฟ้าจนกระทั่งเสมอกับเข้าขึ้นรูป.....	73
(ค) เผาสลายสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8.....	73
(ง) ช่องทางเดินแก๊สและผิวหน้า निकเกิดที่ถูกขัดจนเรียบและเป็นเงา.....	73
4.14 แผ่นทดสอบที่สร้างจากแผ่นลายวงจร	
(ก) แผ่นทดสอบที่ทำหน้าที่ยึดฐาน निकเกิดซึ่งชั้นทองแดงยังไม่ได้ชุบ निकเกิดด้วยไฟฟ้า.....	75
(ข) แผ่น निकเกิดที่ติดตั้งบนแผ่นทดสอบโดยเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน.....	75
4.15 กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ	
(ก) แผ่นทดสอบประกบกับฐานรอง निकเกิดคว่ำหน้าลง.....	76
(ข) หยอดสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ P4620.....	76
(ค) ฉูดสารไวแสงให้ไหลออกมาที่ผิว निकเกิด.....	76
(ง) เช็ดสารไวแสงทางด้านแผ่นทดสอบออก.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(จ) ขัดผิวหน้าชิ้นงานให้ช่องทางเดินแก๊สเรียบ.....	76
4.16 การทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบด้วยสารไวแสงโฟโตริซิส AZ P4620	
(ก) สารไวแสงถูกดูดให้ไหลออกมาปิดช่องทางเดินแก๊ส.....	76
(ข) ช่องทางเดินแก๊สภายหลังการขัดให้ได้ระนาบเดียวกับนิกเกิล	76
4.17 สารไวแสงไหลออกมาจากการประกบติดของแผ่นนิกเกิลกับฐานที่ไม่สนิท.....	77
4.18 โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นเหนือช่องทางเดินแก๊ส.....	78
4.19 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สจุลภาค.....	79
4.20 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สจุลภาค (ต่อ).....	79
4.21 ช่องทางเดินแก๊สผ่านการกัดสารไวแสงAZ ด้วยพลาสมาของออกซิเจน (ภาพด้านหลัง).....	80
4.22 ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระ (มองจากด้านบน).....	81
5.1 แผ่นคานปลายอิสระโค้งตัวขึ้นภายหลังสกัดชิ้นวัสดุชั่วคราว.....	83
5.2 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระที่นำข้อมูลจากการวัดมาคำนวณใน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	85
5.3 ผลจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นคาน โค้งปลายอิสระด้วยสมการทางคณิตศาสตร์	
(ก) พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแผ่นคานเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า.....	86
(ข) ระดับความสูงของปลายแผ่นคานจากฐานรองเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น.....	86
5.4 การเชื่อมต่อลวดเงินนำไฟฟ้าเข้าชิ้นงานก่อนการทดสอบ (มุมมองด้านบน).....	87
5.5 วงจรทดสอบการทำงานของไมโครวาล์ว.....	87
5.6 การเคลื่อนที่ของแผ่นคานปลายอิสระเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ	
(ก) แรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์.....	88
(ข) แรงดันไฟฟ้า 150 โวลต์.....	88
(ค) แรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์.....	88
5.7 การเตรียมไมโครวาล์วเพื่อการทดสอบ.....	89
5.8 การติดตั้งชุดทดสอบไมโครวาล์ว.....	90
5.9 การยกตัวขึ้นของแผ่นคานเมื่อมีแรงดันแก๊สกระทำได้แผ่น	
(ก) แผ่นคานในสภาวะปกติ.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ข) ป้อนแรงดันแก๊ส 69 kPa	92
(ค) ป้อนแรงดันแก๊ส 138 kPa.....	92
5.10 อัตราการไหลของมวลแก๊สในโตรเจนเมื่อไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น	
(ก) การไหลความเร็วเท่ากับเสียง.....	93
(ข) การไหลความเร็วต่ำกว่าเสียง	93
5.11 การขั้วการทำงานของไมโครวาล์วเมื่อมีแรงดันแก๊ส 69 kPa	
(ก) สภาวะปกติ.....	95
(ข) ป้อนแรงดันแก๊ส	95
(ค) ขั้วด้วยแรงดันไฟฟ้า 150 โวลต์.....	95
5.12 การลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง	
(ก) บริเวณจุดต่อไฟฟ้าที่แผ่นคาน.....	96
(ข) บริเวณจุดต่อไฟฟ้าที่ฐานรองนิกเกิล	96
5.13 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าแบบคิตของไมโครวาล์วที่ได้จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่มีชั้นวัสดุต่างกันด้วยการกำหนดระยะยกตัวของแผ่นปิดของ ไมโครวาล์วเหนือผิวของฐานรองเช่นเดียวกันกับข้อมูลจากการทดลอง.....	97
6.1 แนวทางการพัฒนาชุดอุปกรณ์ทดสอบไมโครวาล์วที่ดีขึ้น.....	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่ขนานกัน
A_{eff}	คือ พื้นที่ทางออกของแก๊สสำหรับแบบจำลองการไหลของแก๊สที่ถูกปรับปรุง
A_o	คือ พื้นที่ทางออกของแก๊ส
c	คือ ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานที่เปลี่ยนไปจากสถานะเดิมตามความยาวคาน
C	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
C_i	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
C_1	คือ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นอากาศ
C_2	คือ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นไดอิเล็กทริก
CTE	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิ
CTE_{nickel}	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของนิกเกิล
CTE_{su-8}	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของสารไวแสงชนิดลบ SU-8
d	คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก
dF	คือ แรงสุทธิบนอิเล็กเมนต์ของแผ่นคานในพื้นที่ขนาด $w_{beam} \cdot dy_{beam}$
dM	คือ โมเมนต์รอบแกนผ่านกึ่งกลางระนาบของแผ่นคาน
D_h	คือ The hydraulic diameter
D_{inlet}	คือ ความกว้างช่องทางออกของแก๊ส
E	คือ สนามไฟฟ้า
$(EI)_{equiv}$	คือ ความต้านแรงสมมูลของแผ่นคานที่เกิดจากการซ้อนทับชั้นวัสดุ 2 ชนิด
E_1	คือ โมดูลัสของยังในชั้นวัสดุ 1
E_2	คือ โมดูลัสของยังในชั้นวัสดุ 2
F_e	คือ แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า
F_{net}	คือ แรงสุทธิที่กระทำต่อแผ่นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่
F_s	คือ แรงทางกลของโครงสร้าง
g	คือ ระยะช่องอากาศระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า
g_0	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในสถานะเริ่มต้น
I_1	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในชั้นวัสดุ 1
I_2	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในชั้นวัสดุ 2

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k	คือ ค่าความแข็งดึงของ โครงสร้าง
L_{beam}	คือ ความยาวของแผ่นคานในสถานะที่ไม่โค้งตัว
L_{metal}	คือ ความยาวของแผ่นคานปลายปล่อยที่เป็นชั้นโลหะ
L_{su-8}	คือ ความยาวของแผ่นคานปลายปล่อยที่สร้างจากสารไวแสงชนิดลบ SU-8
\dot{m}	คือ อัตราการไหลของมวลแก๊สผ่านช่องทางเดินแก๊ส
\dot{m}_{sonic}	คือ อัตราการไหลของมวลแก๊สที่ปากครุมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงเสียง
$\dot{m}_{subsonic}$	คือ อัตราการไหลของมวลแก๊สที่ปากครุมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วเสียง
M	คือ โมเมนต์สมมูลที่เกิดจากผิวสัมผัสของชั้นวัสดุทั้ง 2
M_{net}	คือ โมเมนต์สุทธิบนแผ่นคาน
M_1	คือ โมเมนต์ที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 1
M_2	คือ โมเมนต์ที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 2
P_e	คือ แรงดันสัมบูรณ์ที่ทางออกช่องทางเดินแก๊ส
P_s	คือ แรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายก่อนเข้าช่องทางเดินแก๊ส
P	คือ แรงลัพท์สมมูลที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ
P_{axis}	คือ แรงตามแกนของแผ่นคาน
P_1	คือ แรงที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 1
P_2	คือ แรงที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 2
Q	คือ ประจุระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ
r	คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงแผ่นปิดและ Hydraulic diameter
r_o	คือ อัตราส่วนเริ่มเปลี่ยนจากช่วง Seat-controlled เข้าสู่ช่วง Transition
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊สสัมพัทธ์ต่อน้ำหนักโมเลกุล
<i>Stress</i>	คือ ความเค้นเชิงเส้นที่เกิดขึ้นในแผ่นคาน
t_{beam}	คือ ความหนาของแผ่นคาน
t_g	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นคานปลายปล่อยกับฐาน
t_{metal}	คือ ความหนาของแผ่นคานปลายปล่อยที่เป็นชั้นโลหะ
t_{su-8}	คือ ความหนาของแผ่นคานปลายปล่อยที่สร้างจากสารไวแสงชนิดลบ SU-8
t_1	คือ ความหนาของชั้นวัสดุ 1
t_2	คือ ความหนาของชั้นวัสดุ 2
T	คือ อุณหภูมิห้อง (K)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

V	คือ ความต่างศักย์ระหว่างตัวเก็บประจุ
V_{pi}	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฉับพลัน
\dot{V}	คือ ความเร็วการไหลของของไหล
x	คือ ตำแหน่งตามระยะความยาวของแผ่นคาน
w_{beam}	คือ ความกว้างของแผ่นคาน
w_{metal}	คือ ความกว้างของแผ่นคานปลายปล่อยที่เป็นชั้นโลหะ
w_{su-8}	คือ ความกว้างของแผ่นคานปลายปล่อยที่สร้างจากสารไวแสงชนิดลบ SU-8
W	คือ เส้นรอบนอกของช่องทางออกแก๊ส
x_{beam}	คือ ระยะตามความยาวของแผ่นคาน
y_{beam}	คือ ระยะตามความหนาของแผ่นคาน
z	คือ ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานตามทิศของสนามไฟฟ้า
z_{beam}	คือ ความสูงของแผ่นคานเมื่อเทียบกับจุดปลายที่ถูกยึดที่ $x_{beam} = 0$
α_1	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนในชั้นวัสดุ 1
α_2	คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนในชั้นวัสดุ 2
δ	คือ ระยะยกตัวที่ปลายแผ่นคานในสถานะโค้งตัว
ε	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
ε_r	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กทริก
ε_0	คือ ค่าสภาพยอมสัมบูรณ์ เท่ากับ $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
γ	คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
η	คือ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันเลขชี้กำลัง
ρ	คือ รัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานในสถานะโค้งตัว
ρ_0	คือ รัศมีส่วนโค้งเริ่มต้นเมื่อระนาบของแผ่นคานไม่อยู่ในระนาบปกติ
σ_1	คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 1
σ_2	คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 2
$\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2}$	คือ ความเค้นปกติตามระนาบความยาวของแผ่นคาน
$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{t_{beam}} y_{beam}$	คือ ความเค้นที่ทำให้แผ่นคานโค้งตัวออกจากระนาบ
ΔT	คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

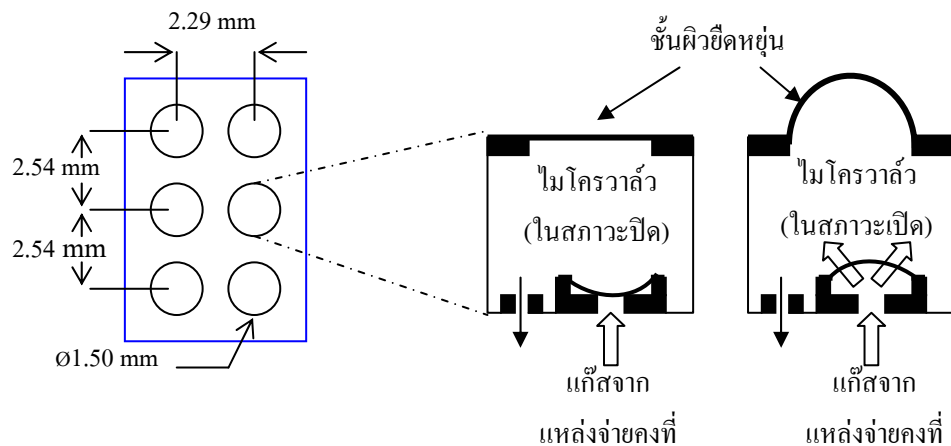
ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS) คืออุปกรณ์ หรือระบบที่มีโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตร สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีที่พัฒนามาจากเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ประกอบด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อน และส่วนกลไกซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกเทคนิคการสร้างแบบนี้ว่า กระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (microfabrication) เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก สมรรถนะสูงและราคาถูกลง ส่งผลให้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้รับความสนใจ เพื่อนำไปใช้งานในเครื่องมือวัด และควบคุมในทางอุตสาหกรรม ในระบบอัจฉริยะ (intelligent system) รวมทั้งระบบฝังตัว (embedded system) ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้รับการพัฒนาก้าวหน้าไปมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS) คืออุปกรณ์ หรือระบบที่มีโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตร สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีที่พัฒนามาจากเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ประกอบด้วยส่วนไฟฟ้าขับเคลื่อน และส่วนกลไกซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกเทคนิคการสร้างแบบนี้ว่า กระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (microfabrication) เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก สมรรถนะสูงและราคาถูกลง ส่งผลให้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้รับความสนใจ เพื่อนำไปใช้งานในเครื่องมือวัด และควบคุมในทางอุตสาหกรรม ในระบบอัจฉริยะ (intelligent system) รวมทั้งระบบฝังตัว (embedded system) ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้รับการพัฒนาก้าวหน้าไปมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค มีการนำไปประยุกต์ใช้ในตัวตรวจวัด (sensor) ชนิดต่างๆ เช่น ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ความดัน ความเร่ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณทางกายภาพอื่นๆ ประยุกต์ใช้ในตัวขับเคลื่อน (actuator) หลายชนิด เช่น ไมโครมอเตอร์ (micromotor) ไมโครสวิตช์ (microswitch) ไมโครปั๊ม (micropump) ไมโครวาล์ว (microvalve) และอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่ชนิดอื่นๆ สำหรับอุตสาหกรรมที่มีการนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นส่วนประกอบในการผลิตได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมชีวภาพและการแพทย์ อุตสาหกรรมสื่อสารและโทรคมนาคม อุตสาหกรรมทางทหาร ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิตหลาย

ประเภท โดยมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมาก

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้เข้ามามีบทบาทในการควบคุมการไหลของแก๊ส และของเหลว ในรูปของไมโครวาล์ว ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปิด-ปิดให้แก๊สหรือสารละลายไหลไปตามช่องทางเดินจุลภาค (microchannel) ได้โดยการป้อนอินพุตให้กลไกการทำงานเพื่อควบคุมขนาดการเปิดของช่องทางเดินแก๊สหรือของเหลวซึ่งมีใช้ในระบบที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ควบคุมปริมาณสารเคมีในการให้ยา ควบคุมการไหลของแก๊สในช่องสุญญากาศ และควบคุมการไหลของแก๊สในระบบแสดงอักษรเบรลล์ เป็นต้น สำหรับระบบแสดงอักษรเบรลล์ซึ่งเป็นวิธีการช่วยให้ผู้พิการทางสายตารับรู้ข้อมูลได้ด้วยการใช้มือสัมผัสปุ่มนูนที่สร้างขึ้น ได้นำไมโครวาล์วมาควบคุมการปล่อยแรงดันแก๊สให้ไหลเข้าไปในช่องปริมาตรซึ่งปู้บด้วยวัสดุยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยที่ด้านซ้ายแสดงเซลล์ของอักษรเบรลล์ที่ประกอบด้วยจุดปุ่มนูน 6 จุด ซึ่งสามารถเข้ารหัสให้เป็นตัวอักษรเบรลล์ได้โดยการเปิด-ปิดแรงดันแก๊สผ่านไมโครวาล์วในแต่ละจุด ส่งผลให้เกิดปุ่มนูนขึ้นดังภาพทางขวา โดยทั่วไปแรงดันแก๊สที่ต้องใช้ในการดันให้ชั้นผิวยืดหยุ่นนูนขึ้นมาจะต้องมีความดันมากกว่าแรงดันภายนอกประมาณ 27.6 kPa (Yobas, et al., 2001)



รูปที่ 1.1 การทำงานของระบบแสดงอักษรเบรลล์โดยใช้ไมโครวาล์วเป็นตัวควบคุมการไหลของแก๊ส

โครงสร้างของไมโครวาล์วส่วนมากจะสร้างบนฐานที่เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือวัสดุชนิดอื่นที่สามารถสร้างด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้ โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบพาสซีฟ (passive microvalve) ซึ่งไม่มีการป้อนอินพุตเพื่อให้เกิดการขับเคลื่อน โครงสร้างของไมโครวาล์ว โครงสร้างแบบนี้ได้รับการออกแบบให้มีอัตราการการไหลสูงในทิศทางเดียวและมีอัตราการไหลต่ำในทิศทางย้อนกลับ หรือเป็นไมโครวาล์วทิศทางเดียว (passive one-way valves) และไมโครวาล์ว

แบบที่สองคือแบบแอคทีฟ (active microvalve) ซึ่งต้องการอินพุตจากภายนอกป้อนเข้าสู่กลไกการทำงาน โครงสร้างแบบนี้เหมาะสำหรับระบบที่ต้องควบคุมการไหลของแก๊สในระดับที่แม่นยำและยังสามารถตอบสนองต่อแรงดันและปริมาณการไหลได้ดีกว่าไมโครวาล์วแบบพาสซีฟ เนื่องจากสามารถควบคุมจังหวะการทำงานหรือขนาดการเปิดของช่องทางเดินจุลภาค เพื่อให้แก๊สไหลผ่านในปริมาณที่ละเอียดมากๆ ได้ อัตราการไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับ การขับเคลื่อนให้กลไกเปิด-ปิดช่องทางเดินจุลภาคทำงานในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้าง วัสดุ และการนำไปใช้งาน ได้แก่

Piezoelectric ซึ่งใช้การขยายหรือหดตัวของวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ในการเปิด-ปิดทางเดินของแก๊ส เมื่อวัสดุนั้นได้รับแรงดันไฟฟ้าบวกหรือลบ ตามลำดับ

Bimetallic ซึ่งใช้คู่ของโลหะสองชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่างกัน ยึดติดกัน ทำให้การขยายตัวของโลหะมีค่าไม่เท่ากันและเกิดการโค้งงอขึ้น เพื่อทำการเปิด-ปิดช่องทางเดินของแก๊ส

Pneumatic ซึ่งใช้แรงดันแก๊สจากแหล่งจ่ายภายนอก คั้นผนังช่องทางเดินแก๊สให้เปิด-ปิด

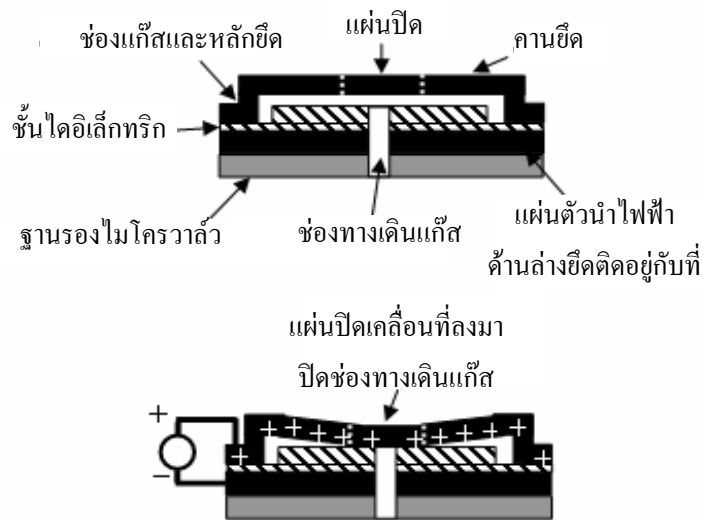
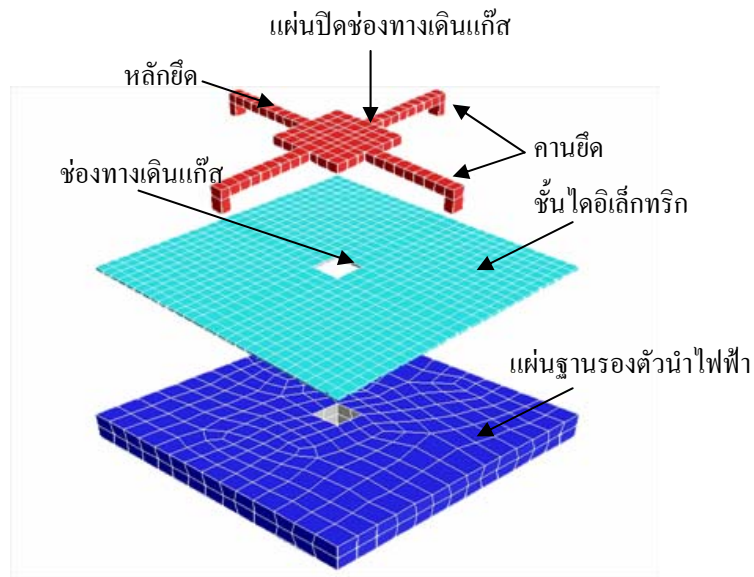
Thermopneumatic ซึ่งใช้ความร้อนในการทำให้แก๊สที่ถูกขังอยู่ในปริมาตรปิดขยายหรือหดตัวเพื่อคั้นผนังของช่องทางเดินแก๊สให้เปิด-ปิด

Magnetic ซึ่งใช้หลักการของโซลินอยด์ (solenoid) ควบคุมแกนเหล็กให้เคลื่อนที่ไปคั้นผนังของช่องทางเดินแก๊สให้เปิด-ปิด

Electrostatic เป็นการใช้แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างแผ่นตัวนำที่มีประจุตรงข้ามกันดึงให้แผ่นตัวนำเคลื่อนที่มาเปิด-ปิดการไหลของแก๊ส

การควบคุมการไหลของแก๊สด้วยหลักการทางไฟฟ้าสถิต มีการประยุกต์กับกลไกการขับเคลื่อนของไมโครวาล์วหลายรูปแบบ โดยมีโครงสร้างพื้นฐานดังรูปที่ 1.2 ประกอบด้วย แผ่นตัวนำไฟฟ้า 2 แผ่นวางขนานกัน โดยมีชั้นไดอิเล็กทริก วางทับเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง แผ่นตัวนำด้านล่างถูกยึดติดกับฐานรอง (substrate) ส่วนแผ่นตัวนำด้านบนแขวนลอยอยู่เหนือฐานรองด้วยหลักยึด (anchor) ซึ่งมีช่องทางเดินแก๊สทะลุผ่านด้านล่างถึงด้านบน ในสภาวะปกติแก๊สสามารถไหลผ่านช่องทางเดินจากด้านล่างออกสู่ด้านบนได้ แต่ขณะที่แผ่นตัวนำด้านบนถูกไบแอสด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จะทำให้แผ่นตัวนำด้านบนถูกดึงดูดให้เคลื่อนตัวลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ทำให้แก๊สไม่สามารถไหลผ่านช่องทางเดินได้

ปัญหาสำคัญสำหรับโครงสร้างดังกล่าว คือ เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สสูงจะทำให้มีระยะห่างระหว่างแผ่นปิด ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านบนกับฐานรองที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านล่าง มีค่ามากทำให้ไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากพอ ที่จะขับเคลื่อนการทำงานได้ สำหรับปัญหาในกระบวนการสร้างคือ ระหว่างการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราว (sacrificial layer) ที่นำไปซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย เพื่อให้โครงสร้างที่เราสร้างขึ้นนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากช่องว่างที่



รูปที่ 1.2 การทำงานและ โครงสร้างของไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต

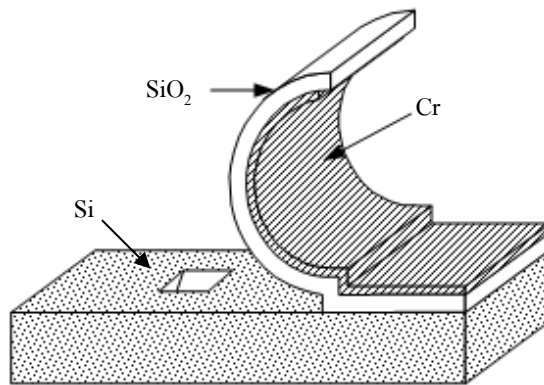
เกิดขึ้นจากการสร้างระหว่างชั้นแคบมากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นชั้น จึงมีโอกาที่ของเหลวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างทำการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวและแรงตึงผิวของของเหลวนั้นๆจะทำให้โครงสร้างที่ลอยอยู่ถูกดูดติดกับฐานรองให้แนบโดยถาวรได้ ซึ่งเรียกว่าการแนบติดยึด (stiction) แนวทางแก้ไขปัญหาทั้งสองคือ การลดระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองด้านล่างในสภาวะที่มีแก๊สไหลผ่านเพื่อลดพลังงานในการขับเร้าและเพิ่มระยะห่างในสภาวะปกติเพื่อลดการแทรกตัวของเหลว โดยโครงสร้างที่ถูกนำมาศึกษาคือรูปแบบคานยึดแผ่นปิดไมโครวาล์ว (tether) ที่เป็นตัวกำหนดแรงทางกลในการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแผ่นปิด จากงานวิจัยของ รุ่งเรือง พัฒนากุล และคณะ (2548) พบว่าคานยึดแบบขาปู (crab-leg tether) ที่ใช้โลหะนิกเกิลแทนวัสดุพอลิซิลิคอนมี

ความเหมาะสมที่สุดภายใต้การจำลองสภาวะการทำงานในระบบแสดงอักษรเบรลล์ ช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าขั้วเร้าในสภาวะที่มีแรงดันแก๊สกระทำใฝ่นปิดและสามารถเพิ่มระยะห่างในสภาวะปกติ รวมทั้งลดต้นทุนทางการผลิต แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างไมโครวาล์วดังรูปที่ 1.2 ก็ยังคงมีระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองแคบมากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นชั้น ส่งผลให้ปัญหาแบบติดยึดยังคงปรากฏเสมอระหว่างกระบวนการสร้าง

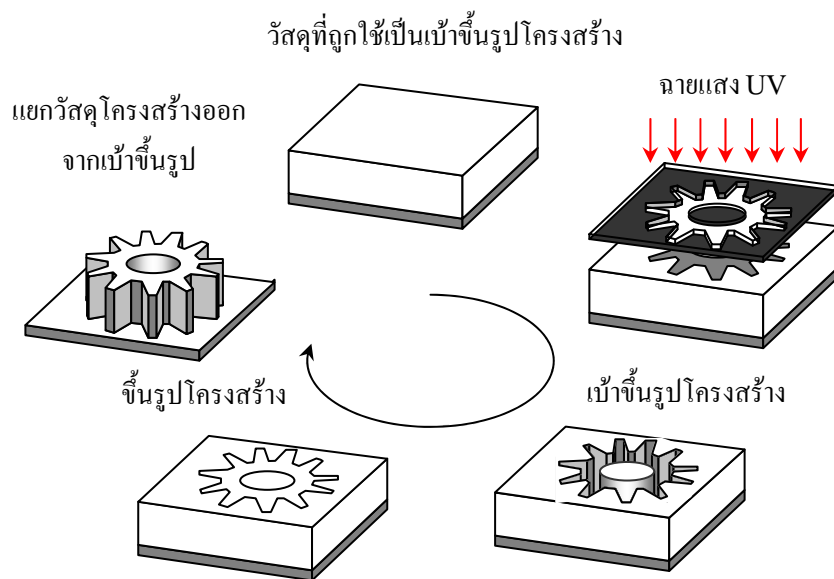
โครงสร้างกลไกการเปิด-ปิดช่องทางเดินแก๊สที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาในข้างต้นได้อีกรูปแบบหนึ่งคือโครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระบนฐานรองซิลิคอน (Haji-Babaei, et al., 1997) สร้างด้วยการเคลือบโครเมียมบนซิลิคอนไดออกไซด์ และเกิดเป็นโครงสร้างแผ่นคาน Cr/SiO_2 ที่โค้งตัวขึ้นจากความเค้นแรงอัดตกค้าง (residual compressive stress) ภายในชั้น SiO_2 และความเค้นแรงดึงตกค้าง (residual tensile stress) ภายในชั้นโครเมียมระหว่างกระบวนการสร้างโดยชั้นโครเมียมซึ่งวางอยู่ชั้นบน เมื่อมีความเค้นแรงดึงจะเกิดการหดตัวสั้นกว่าปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั่วคราวเพื่อปล่อยโครงสร้าง ในขณะที่ชั้น SiO_2 ซึ่งเป็นส่วนประกอบล่างของแผ่นคานจะมีความเค้นแรงอัด ทำให้แผ่นคานยาวกว่าปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั้น ส่งผลให้แผ่นคานโค้งงอขึ้นและทำให้เกิดสภาวะปกติเปิดกับไมโครวาล์ว โดยขนาดความโค้งงอของแผ่นคานจะขึ้นกับความหนาของชั้นวัสดุและอุณหภูมิในกระบวนการสร้าง ดังรูปที่ 1.3 เนื่องจากโครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระจะมีระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำน้อยมากในบริเวณที่ใกล้กับหลักยึดของแผ่นคาน จึงสามารถสร้างแรงไฟฟ้าสถิตขนาดมากได้แม้ว่าแผ่นปิดจะเคลื่อนที่ขึ้นสูงด้วยแรงดันแก๊ส นอกจากนั้นพลังงานเนื่องจากความเครียดภายในตัววัสดุจะทำให้แผ่นคานอยู่ในสภาวะปกติเปิดภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั่วคราว ลดปัญหาการแนบติดยึดของแผ่นคานกับฐานรองอย่างถาวรเนื่องจากของเหลวเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างกระบวนการสร้าง อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างไมโครวาล์วแบบแผ่นคานปลายอิสระบนฐานซิลิคอนจำเป็นต้องสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในเตาเผาอุณหภูมิสูงและใช้สารเคมีอันตรายคือกรดไฮโดรฟลูออริกในการสกัดทิ้ง อีกทั้งฐานรองซิลิคอนมีความนำไฟฟ้าได้ต่ำกว่าโลหะ ส่งผลให้ใช้พลังงานขั้วเร้าสูงขึ้น ทำให้กระบวนการสร้างมีต้นทุนสูงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

การพัฒนากระบวนการสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างไมโครวาล์วแผ่นคานปลายอิสระได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาที่กล่าวในข้างต้นด้วยกระบวนการพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ (Pattanakul, et al., 2006) โดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกแทนที่ด้วยสารไวแสงชนิดลบซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเคลือบสารไวแสงเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริก ชั้นโลหะโครเมียมบนแผ่นคานจะเปลี่ยนเป็นชั้นโลหะซ็อนทับกัน 3 ชั้น ได้แก่ โครเมียม/ทองแดง ที่สร้างด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (sputtering) และนิกเกิล โดยควบคุมขนาดความโค้งงอของแผ่นคานด้วยความหนาของชั้นนิกเกิลผ่านกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า (electroplating) สำหรับช่องทางเดินแก๊สแบบเดิมที่ต้องผ่าน

กระบวนการกัดซิลิคอนแบบเปียกซึ่งจะทำให้ช่องด้านล่างมีขนาดกว้างไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ ดังนั้นช่องทางเดินแก๊สในงานวิจัยนี้จะถูกพัฒนาขึ้นพร้อมกับฐานรองนิกเกิลเพื่อลดพื้นที่ช่องทางเดินแก๊สผ่านฐานรอง เพิ่มความนำไฟฟ้าด้วยโลหะนิกเกิลและลดพลังงานขับเคลื่อน กระบวนการสร้างฐานรองนิกเกิลคือกระบวนการสร้างแบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet Lithographie Galvanoformung Abformung: UV LIGA) ซึ่งเป็นการสร้างโครงสร้างที่มีความสูงหรือหนามากเมื่อเทียบกับขนาดของวัสดุ โดยใช้เทคนิคการหล่อขึ้นรูปสารไวแสง (moulding) และการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า เพื่อสร้างชั้นโลหะให้เต็มเบ้าหรือแบบ หลังจากนั้นจึงกำจัดแบบทิ้ง เหลือไว้แต่โครงสร้างของโลหะ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของไมโครวาล์วแบบแผ่นคานปลายอิสระ



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเกี่ยวด้วยการสร้างแบบชั้นหนา

ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบ และสร้าง ไมโครวาล์วแบบแอกทิฟ ที่มีกลไกขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic microvalve) เพื่อควบคุมการไหลของแก๊ส โดยใช้โครงสร้างกลไกการเปิด-ปิดช่องทางเดินแก๊สแบบแผ่นคานโค้งปลายอิสระ มีชั้นไดอิเล็กทริกเป็นสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 2002 โดยใช้โครงสร้างโลหะนิเกิลเป็นตัวนำไฟฟ้าหลักของแผ่นคานปลายอิสระและมีโลหะนิเกิลเป็นฐานรองที่พัฒนาขึ้นพร้อมกับช่องทางเดินแก๊ส รวมทั้งตรวจสอบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พัฒนาเทคนิคและกระบวนการการสร้างโครงสร้างจุลภาคในห้องปฏิบัติการให้สามารถลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ออกแบบและสร้างไมโครวาล์วเพื่อการควบคุมการเปิด-ปิดการไหลของแก๊ส
2. สาทิศการทำงานของไมโครวาล์วในการเปิด-ปิดการไหลของแก๊สที่ความดัน 27.6 kPa ขึ้นไป

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. สาทิศการเปิด-ปิดการไหลของแก๊สด้วยไมโครวาล์ว ทดสอบการไหลของแก๊สด้วยตัวตรวจรู้แรงดันหรือลูกโป่ง
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมของไมโครวาล์วอย่างคร่าวๆเป็นแบบจำลอง 1 มิติ ซึ่งจะคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการออกแบบโครงสร้างรูปร่างสองมิติ
2. หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการทำงานของไมโครวาล์ว
3. สร้างไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระสำหรับควบคุมการไหลของแก๊ส

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ไมโครวาล์วต้นแบบสามารถควบคุมการทำงานในการเปิด-ปิดการไหลผ่านของแก๊สได้
2. ได้อุปกรณ์ที่ลดปัญหาและต้นทุนการสร้าง เพื่อสามารถต่อยอดการพัฒนาในขั้นการประยุกต์ใช้กับระบบแสดงอักษรเบรลล์ในอนาคตได้
3. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของไมโครวาล์วที่สร้างขึ้น

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บทได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่นำมาใช้ในการควบคุมของไหลของแก๊สในระดับจุลภาค รูปแบบกลไกการทำงานของไมโครวาล์วแบบต่างๆ โครงสร้างของไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตและประยุกต์ใช้กับระบบแสดงอักษรเบรลล์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของแผ่นคานและช่องทางเดินแก๊สของไมโครวาล์วแบบแผ่นคานปลายอิสระและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองพฤติกรรม การโค้งตัวเนื่องจากความเค้นภายในและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเคลื่อนที่ของแผ่นปิดช่องทางเดินแก๊สซึ่งเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำ การคำนวณแรงดันไฟฟ้าแนบติด (pull-in voltage) และอัตราการไหลของแก๊สผ่านช่องทางเดินจุลภาค

บทที่ 4 กล่าวถึงกระบวนการพัฒนาโครงสร้างของไมโครวาล์ว แบบแผ่นคานปลายอิสระ โดยแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการ คือ การสร้างโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานกระจกที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้าด้านล่าง การสร้างช่องทางเดินจุลภาคด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ (planarized) และการสร้างโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินจุลภาคที่ได้รับการทำให้เรียบ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบไมโครวาล์วและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับทางทฤษฎี

บทที่ 6 เป็นบทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

นอกจากนี้ยังมีภาคผนวกซึ่งรวบรวมข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องในรายละเอียด ได้แก่

ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานกระจก

ภาคผนวก ข. กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานโลหะทองแดง

ภาคผนวก ค. กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานกราไฟต์

ภาคผนวก ง. กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สจุลภาคให้เรียบ

ภาคผนวก จ. กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส

ภาคผนวก ฉ. โปรแกรม MATLAB แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาคผนวก ช. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นปลายอิสระที่โค้งขึ้นเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ

ภาคผนวก ซ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นภายใน

ภาคผนวก ฉ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน
ภาคผนวก ช. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การคำนวณอัตราการไหลของมวลผ่านท่อสอบ

เข้า

ภาคผนวก ฎ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

ในปี 1959 Feynman ได้ปาฐกถาในหัวข้อ “There’s Plenty of Room at The Bottom” ซึ่งจุดประกายแนวความคิดที่ต้องการให้นักวิทยาศาสตร์สนใจการสร้างวัสดุหรือสิ่งประดิษฐ์ในระดับโมเลกุลหรืออะตอม และเห็นความสำคัญของการพัฒนาเพื่อสร้างเครื่องมือในการตรวจสอบวัสดุเหล่านี้ ในการปาฐกถานั้นมีส่วนสำคัญผลักดันการพัฒนาระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems) หรือ MEMS ซึ่งเป็นสาขาใหม่ในทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับการย่อส่วนระบบอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องกล เคมี ชีววิทยา และทัศนศาสตร์ ให้มีขนาดเล็กและสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยสร้างเป็นอุปกรณ์ หรือระบบที่มีโครงสร้างเล็กระดับไมโครเมตรด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนามาจาก เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit : IC) ประกอบด้วยส่วนไฟฟ้า ขั้วเคลื่อนและส่วนกลไก ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกเทคนิคการสร้างแบบนี้ว่า กระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค (microfabrication)

การผลิตชิ้นส่วนหรือโครงสร้างขนาดใหญ่ จะใช้เทคนิคต่างๆ เช่น การหล่อ การฉีด การอัดขึ้นรูป การกลึง การไส เป็นต้น วิธีการเหล่านี้สามารถใช้ในการผลิตโครงสร้างแบบ 3 มิติได้ดี แต่จะยากขึ้นเมื่อ โครงสร้างหรือชิ้นงานมีขนาดเล็กลง ดังนั้นการผลิตโครงสร้างที่เล็กมากในระดับไมโครเมตรจึงต้องอาศัยเทคนิคการสร้างแบบ 2 มิติและซ้อนทับวัสดุกันเป็นชั้นๆแทน ซึ่งอาจจะสูงได้ถึง 5 ชั้น โดยใช้กระบวนการกำหนดลวดลายโครงสร้าง ลงบนแผ่นผิวหน้าของแผ่นฐานรองด้วยการฉายแสง (photolithography) หลังจากนั้นจึงสร้างชิ้นส่วนหรือโครงสร้างด้วยเทคนิคการผลิตโครงสร้างจุลภาคซึ่งแบ่งออกเป็น 4 เทคนิคหลักๆ ได้แก่ การสร้างแบบสลักหรือกัด (bulk micromachining) การสร้างแบบแผ่นผิว (surface micromachining) การเชื่อมต่อชั้นวัสดุ (bonding) และการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (high-aspect-ratio micromachining)

สำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้น เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก สมรรถนะสูง และราคาถูก ส่งผลให้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้รับความสนใจไม่เพียงแต่การทดลองวิจัยเท่านั้น แต่ยังถูกนำไปใช้ในการผลิตอุปกรณ์เชิงพาณิชย์อีกหลายประเภทเพื่อนำไปใช้งานในเครื่องมือวัด และควบคุมทางอุตสาหกรรม ในระบบอัจฉริยะ รวมทั้งระบบฝังตัว ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ได้รับการพัฒนาก้าวล้ำไปมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดตามพัฒนาการของสิ่งประดิษฐ์ซึ่งซับซ้อนขึ้นเรื่อยๆ โดยมีจุดเด่น คือ เป็น

อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถสร้างได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกัน (batch fabricated) เช่นเดียวกับเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม ทำให้มีราคาถูกมาก สามารถใช้แล้วทิ้งได้ในงานบางอย่างที่ไม่ต้องการใช้ซ้ำ เช่น การตรวจทางชีวภาพหรือทางการแพทย์ นอกจากนี้ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคยังสามารถนำเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่างๆ มารวมกันไว้บนชิปตัวเดียวกันได้ เช่น ส่วนตรวจวัดปริมาณ ส่วนประมวลผล และส่วนสื่อสารข้อมูล เป็นต้น และเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีความไวมากและใช้พลังงานน้อย สามารถติดตั้งหรือฝังตัวเข้ากับอุปกรณ์อื่นๆ เพราะมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ส่วนมากนำไปสร้างอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทางฟิสิกส์และเคมี ไม่ว่าจะเป็นความร้อน แรงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นส่วนที่รับรู้การเปลี่ยนแปลง มีส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ประมวลผล และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ โดยแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น ตัวตรวจวัดรู้อุณหภูมิ ความดัน ความเร่ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณทางกายภาพอื่นๆ นอกจากตัวตรวจรู้แล้ว ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคยังนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อน คือทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นการกระทำด้วย เช่น แรงแม่เหล็กหรือความร้อน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ประเภทไมโครมอเตอร์ (micromotor) ไมโครสวิตช์ (microswitch) ไมโครปั๊ม (micropump) ไมโครวาล์ว (microvalve) และอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่อื่นๆ อุตสาหกรรมที่มีการนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นส่วนประกอบในการผลิตได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมชีวภาพและการแพทย์ อุตสาหกรรมการสื่อสารและโทรคมนาคม อุตสาหกรรมทางทหาร ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ

2.2 การควบคุมการไหลระดับจุลภาคและกลไกการทำงานของไมโครวาล์ว

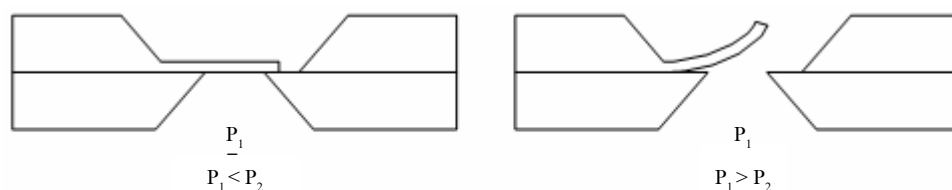
งานวิจัยแรก ที่สร้างปรากฏการณ์ในการรวมแนวความคิด และสร้างอุปกรณ์ควบคุมการไหลในระดับจุลภาค เกิดขึ้นที่มหาวิทยาลัยแอสตันฟอร์ดโดย Terry, (1975) ได้นำเสนออุปกรณ์วิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแก๊ส (Gas Chromatography, GC) สร้างขึ้นบนฐานรองซิลิคอนขนาด 2 นิ้ว ตัวอุปกรณ์ประกอบไปด้วยวาล์วฉีดแก๊ส (injection valve) และท่อวิเคราะห์ที่เกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนให้เป็นขดกันหอยจนมีความยาวประมาณ 1.5 เมตร โครงสร้างนี้สามารถใช้แยกแยะองค์ประกอบของสารประกอบสองชนิดได้ อีกหนึ่งงานวิจัยจากการนำเสนอของ Bassous, Aub, and Kuhn (1977) เป็นการสร้างหัวฉีดหมึกที่ใช้วิธีการพ่นหยดหมึกขนาดจุลภาคซึ่งแห้งเร็ว (ink-jet) ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์ของบริษัท IBM โดยเริ่มต้นด้วยหลักการขยายตัวของหมึกเมื่อได้รับความร้อน ภายในตัวของหัวพิมพ์ประกอบด้วยแถวของตัวทำความร้อน ซึ่งควบคุมการกำเนิดความร้อนด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ภายในเวลาอันรวดเร็วมาก เมื่อหมึกไหลผ่านตัวทำความร้อนจะเกิดฟองอากาศ ซึ่งจะขยายตัว และดันให้หมึกพิมพ์พุ่งออกจากหัวฉีดขนาดเล็กมากๆ และฉีดลงบน

กระดาศ โดยหมึกจะแห้งในทันที เมื่อฟองอากาศขยายตัวจนแตกก็จะเกิดสุญญากาศขึ้นภายในและดูดเอาหมึกจากส่วนเก็บน้ำหมึกเข้าสู่หัวพิมพ์อีกครั้ง

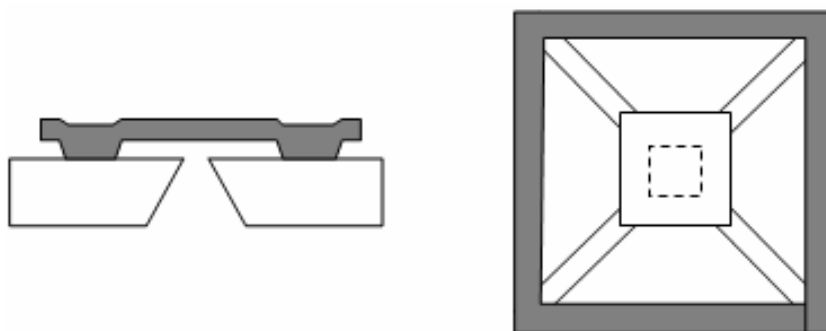
อุปกรณ์ทั้งสองชนิดดังกล่าวเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคในการย่อส่วนห้องปฏิบัติการชีวเคมีลงบนชิพ (lab-on-a-chip) โดยระบบนี้ประกอบไปด้วยส่วนลำเลียงสารเคมี ได้แก่ ช่องทางเดินจุลภาค และช่องเปิด (microchannels and orifices) ไมโครคอมเพรสเซอร์ ไมโครปั๊ม และไมโครวาล์ว เป็นต้น ส่วนวิเคราะห์สารเคมี ได้แก่ ไมโครเซนเซอร์ (microsensor) หรือตัวตรวจรู้ทางชีวเคมี (biosensor) ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ การไหล แรงดัน ความหนืด และความหนาแน่นของของไหล (Henning, 1998) เพื่อช่วยย่นระยะเวลาของการทดลอง และลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย แต่ในเวลานั้นมีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีและประสบการณ์ในการรวมระบบเข้าด้วยกัน งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นในการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของระบบให้มีขนาดเล็กลง ได้แก่ ไมโครปั๊ม ไมโครวาล์ว ตัวตรวจรู้อัตราการไหล (flow sensors) ตัวผสมของไหล (fluidic mixers) รวมทั้งเซนเซอร์ทางชีวเคมีอื่นๆ แทนการสร้างระบบทั้งหมดลงบนชิพตัวเดียวกัน (Reyes, Iossifidis, Auroux, and Manz, 2002)

จากการมุ่งวิจัยส่วนประกอบของห้องปฏิบัติการชีวเคมีลงบนชิพในขณะนั้น ทำให้เกิดการพัฒนาไมโครวาล์ว ซึ่งเป็นส่วนลำเลียงสารเคมีให้มีโครงสร้างและหลักการควบคุมการไหลที่หลากหลาย เพื่อนำไปใช้ในระบบควบคุมการไหลในช่องทางเดินจุลภาคที่ต้องการความละเอียดและแม่นยำสูง ให้ไหลไปตามช่องทางเดินจุลภาคและใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่น โครงสร้างของไมโครวาล์วส่วนมากจะสร้างบนฐานที่เป็นสารกึ่งตัวนำ หรือวัสดุชนิดอื่นที่สามารถสร้างด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคได้ โดยแบ่งไมโครวาล์วเป็น 2 แบบ คือ ไมโครวาล์วแบบพาสซีฟ (passive microvalve) และไมโครวาล์วแบบแอคทีฟ (active microvalve)

ไมโครวาล์วแบบพาสซีฟ เป็นแบบที่ไม่มีการป้อนอินพุตเพื่อให้เกิดการขับเคลื่อนโครงสร้างของไมโครวาล์ว ออกแบบให้มีอัตราการไหลสูงในทิศทางเดียวและอัตราการไหลต่ำในทิศทางย้อนกลับ หรือเป็นไมโครวาล์วทิศทางเดียว (passive one-way valves) ไมโครวาล์วแบบนี้สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้กับไมโครปั๊ม ที่ต้องการให้การไหลของของไหลเป็นไปในทิศทางเดียว ตัวอย่างของไมโครวาล์วแบบพาสซีฟ ได้แก่ วาล์วชนิดแผ่นคาน (cantilever valves) ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นโครงสร้างบางวางอยู่เหนือรูทางออก โดยที่ปลายด้านหนึ่งถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกด้านปล่อยเป็นอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อแรงดัน P_1 มากกว่าแรงดัน P_2 แผ่นคานจะโค้งตัวให้อยู่ในสถานะเปิดและให้ของไหลผ่านได้ หากแรงดัน P_2 มากกว่าแรงดัน P_1 แผ่นคานจะถูกกดลงมาเพื่อปิดรู (Zengerle, Richter, Sandmaier, 1992) วาล์วอีกชนิดหนึ่งคือ วาล์วชนิดแผ่นไดอะแฟรม (diaphragm valves) ประกอบด้วยแผ่นปิดที่ถูกแขวนให้ลอยอยู่เหนือรูด้วยคานยึด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งการทำงานพื้นฐาน จะเหมือนกับวาล์วชนิดแผ่นคาน (Esashi, Shoji, and Nakano, 1989) วาล์วชนิดสอง

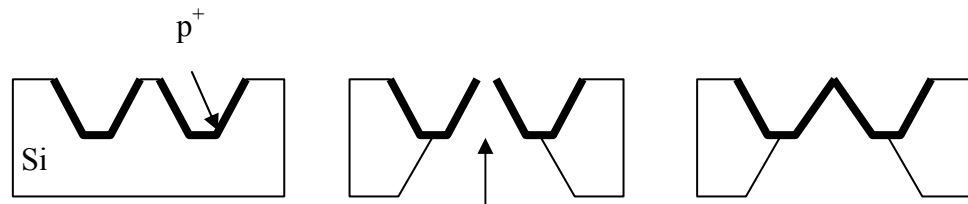


รูปที่ 2.1 การทำงานของวาล์วแบบแผ่นคาน

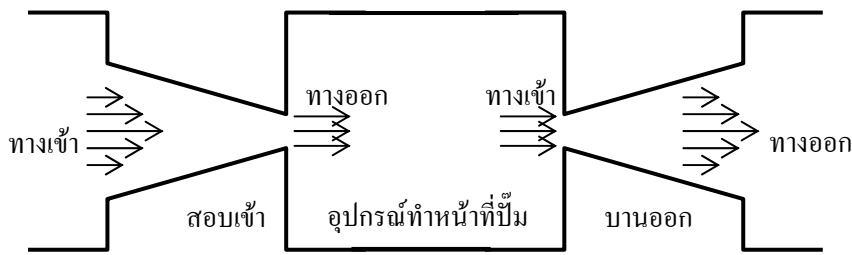


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของวาล์วแบบแผ่นไดอะแฟรม

กิลิป (bivalvular valve) ประกอบด้วยแผ่นซีลคอนบางที่ถูกเจือด้วย $p+$ เพื่อทำให้การกัดซีลคอนหยุดที่ผนังรูปตัว V กระบวนการสร้างจะใช้การกัดฐานซีลคอนด้านบนลงไปก่อนแล้วเจือสารลงไป ที่ผนังพีระมิดของช่อง หลังจากนั้นจึงกัดทางด้านล่างขึ้นมาจนหยุดที่ชั้นซีลคอนที่ถูกเจือสาร ซึ่งจะได้อแผ่นซีลคอนเป็นกิลิปสองอันดังแสดงในรูปที่ 2.3 การทำงานพื้นฐานจะเหมือนกับวาล์วชนิดแผ่นคาน (Yang, Han, Yang, 1996) วาล์วแบบสุดท้ายของวาล์วแบบพาสซีฟ คือ วาล์วชนิดท่อสอบเข้า-บานออก (diffuser/nozzle valve) เป็นแบบที่ต่างจากแบบอื่นๆ คือ ไม่มีแผ่นที่จะมาปิดการไหลที่รู โครงสร้างของวาล์วแบบนี้จะประกอบด้วยท่อหดที่เป็นทางเข้าและท่อขยายอยู่ทางออก อุปกรณ์ที่อยู่ตรงกลางจะทำหน้าที่เป็นปั๊มดึงของเหลวให้เข้ามา ปั๊มจะทำงานที่ 2 จังหวะคือ จังหวะดูด ที่จะดูดของเหลวจากท่อหดเข้ามาไว้ที่ตัวปั๊ม หลังจากนั้นจึงเข้าจังหวะปั๊มซึ่งจะดันของเหลวที่อยู่ภายในปั๊มออกมา ของเหลวจะกระจายออกทั้ง 2 ด้าน แต่เนื่องจากทางด้านท่อขยายมีแรงดันด้านกลับเข้ามาภายในตัวปั๊มน้อยกว่าทางด้านท่อหด (ซึ่งมีแรงดันจากของเหลวที่กำลังไหลเข้ามาในจังหวะดูดค้างอยู่) ทำให้ของไหลถูกดันออกทางท่อขยาย และเมื่อกลับมาจังหวะดูดอีกครั้ง แรงดันไหลเข้าทางสอบเข้ามากกว่าทางบานออก (ซึ่งมีแรงดันจากของเหลวกำลังไหลออก) ส่งผลให้ของเหลวเข้ามาในตัวปั๊มจากทางท่อหดมากกว่า และจะกลับไปสู่จังหวะปั๊ม วนเวียนเป็นวัฏจักรที่ใช้ในไมโครปั๊ม แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.4 (Nguyen, and Huang, 2001)



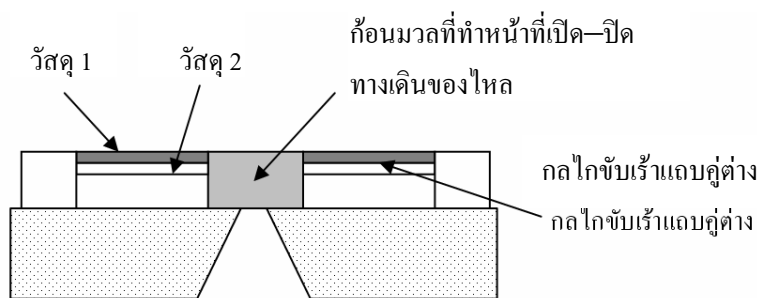
รูปที่ 2.3 โครงสร้างการทำงานของวาล์วแบบสองกิลิป



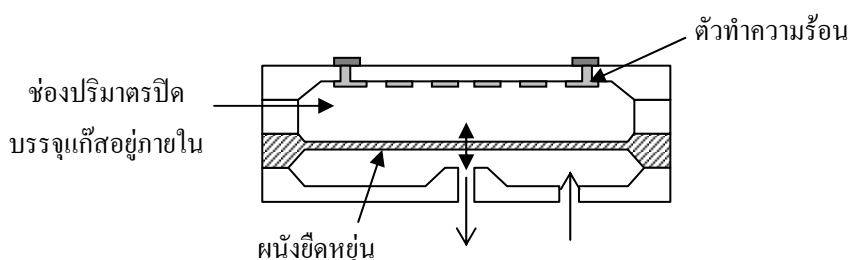
รูปที่ 2.4 โครงสร้างการทำงานของวาล์วแบบสอบเข้า-บานออก

ไมโครวาล์วแบบแอคทีฟ เป็นแบบที่ต้องการอินพุตจากภายนอกป้อนเข้าสู่กลไกการทำงาน ในการควบคุมการไหลซึ่งมีอยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของโครงสร้าง วัสดุและการนำไปใช้งาน แม้ว่าความซับซ้อนจะมากขึ้นและกลไกในการขับเคลื่อนจะแตกต่างกัน แต่หลักการพื้นฐานในการควบคุมการไหลยังคงเหมือนกัน เช่น ไมโครวาล์วชนิดแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งถูกใช้งานในไมโครวาล์วแบบพาสซีฟ เมื่อนำมาใช้งานเป็นไมโครวาล์วแบบแอคทีฟ ก็สามารถใช้กลไกการขับเคลื่อนทางอุณหภูมิจนให้กับแถบขับเคลื่อนคู่ควบได้ (bimetallic element) ซึ่งจะใช้ได้กับโครงสร้างที่เป็นคาน สะพาน หรือแผ่น ที่ประกอบไปด้วยวัสดุสองชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่างกัน แนบยึดติดกัน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้การขยายตัวของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าไม่เท่ากัน จึงเกิดการโค้งงอขึ้น เพื่อทำการเปิด-ปิดช่องทางเดินของของไหล (Jeran, 1991) แสดงในรูปที่ 2.5

การขับเคลื่อนแบบที่สองคือ การให้ความร้อนกับแก๊สที่ถูกขังอยู่ในปริมาตรปิดขยายหรือหดตัว (thermopneumatic actuation) โดยที่ผนังด้านหนึ่งของปริมาตรปิดจะเป็นแผ่นยึดหยุ่นซึ่งเป็นช่องทางเดินจุลภาค เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สจะเกิดการขยายตัวและดันผนังแผ่นยึดหยุ่นให้โป่งตัวออกมาปิดรูหรือช่องทางเดินจุลภาค (Henning, et al., 1997) แสดงในรูปที่ 2.6 หรือให้โครงสร้างมียางซิลิโคนเคลือบบนแผ่นยึดหยุ่นเพื่อลดการรั่วไหลเมื่ออยู่ในสภาวะปิด (Grosjean, Yang, and Tai, 1999) หรือการให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในปริมาตรปิด แก๊สที่เกิดจากระเหยด้วยความร้อนจะสร้างแรงดันแก๊ส ดันผนังชั้นยึดหยุ่นให้ปิดทางเดินของไหล (Rich, and Wise, 2003)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างการขับเคลื่อนทางอุณหภูมิจากกับแถบขับเคลื่อนคู่ต่าง



รูปที่ 2.6 กลไกการขับเคลื่อนโดยให้ความร้อนกับแก๊สที่ถูกขังอยู่ในปริมาตรปิดขยายหรือหดตัว

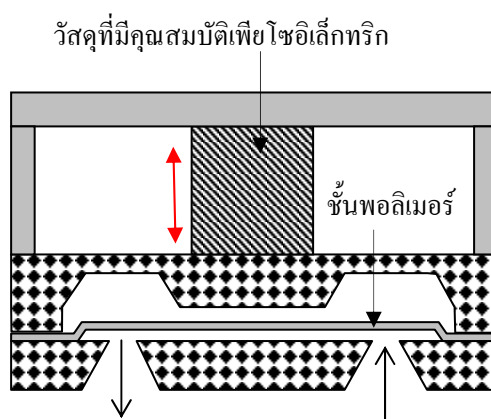
การขับเคลื่อนแบบที่สามคือ การขยายหรือหดตัวของวัสดุที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric actuation) ซึ่งจะขยายตัว-หดตัว เมื่อได้รับความต่างศักย์บวกหรือลบ ตามลำดับ โดยวัสดุชนิดนี้จะเป็นตัวขับเคลื่อนให้แผ่นปิด ที่เชื่อมต่ออยู่กับปลายด้านหนึ่งเคลื่อนที่ปิด-เปิดช่องทางเดินของไหล (Shoji, Der Schoot, De Rooij, and Esashi, 1991) แสดงในรูปที่ 2.7 รวมทั้งการใช้วัสดุที่ขยายตัวตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยใช้พาราฟิน (paraffin) เคลือบด้วยชั้นยืดหยุ่น ช่องทางเดินของไหลอยู่ด้านบนและมีตัวทำความร้อนอยู่ด้านล่าง ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พาราฟินขยายตัวเพื่อปิดช่องทางเดินของไหล และสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ด้วยการควบคุมอุณหภูมิ (Carlen, and Mastrangelo, 2000)

การขับเคลื่อนแบบที่สี่ ใช้แรงดันแก๊สจากแหล่งจ่ายภายนอกเพื่อควบคุมการไหล (pneumatic actuation) ประกอบด้วยฐานซิลิคอนที่กัดจนได้ชั้นบางและมีแผ่นปิดอยู่ตรงกลางคล้ายกับโครงสร้างที่ใช้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริก และใช้แรงดันแก๊สจากภายนอกมาดันให้เคลื่อนที่ไปปิดช่องทางไหลของแก๊ส (Rich, and Wise, 1999) แสดงในรูปที่ 2.8

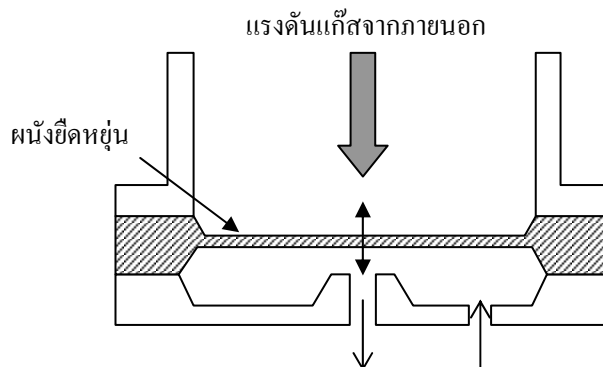
การขับเคลื่อนแบบที่ห้าคือ ใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า (electrochemical actuation) ที่อยู่ในปริมาตรปิดซึ่งจะให้แก๊สออกซิเจนออกมา เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปแรงดันจากแก๊ส ออกซิเจนที่เกิดขึ้นจะไปดันผนังของช่องทางเดินจุลภาคให้เปิด-ปิดการไหลของของไหล (Neagu, Gardeniers,

Elwenspoek, and Kelly, 1997) แสดงในรูปที่ 2.9

การขับเคลื่อนแบบที่หก ใช้โลหะผสมที่จดจำรูปร่าง (shape memory alloys, SMA) เพื่อควบคุมการไหล โดยการใส่โลหะผสมนิกเกิล-ไททาเนียม (Ni-Ti) วางทับบนชั้นพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่น ซึ่งมีช่องทางเดินของไหลอยู่ด้านล่าง เมื่อป้อนความต่างศักย์เข้าไป SMA ก็จะกลับคืนสู่สภาวะปิด ซึ่งเป็นรูปร่างที่จดจำไว้ก่อนการนำมาทับบนชั้นพอลิเมอร์ เพื่อให้ไมโครวาล์วใช้ในสภาวะแรงดันสูงได้ (Kohl, Skrobaneck, and Miyazaki, 1999; Kohl, Dittmann, Quandt, Winzek, Miyazaki, and Allen, 1999) ดังรูปที่ 2.11



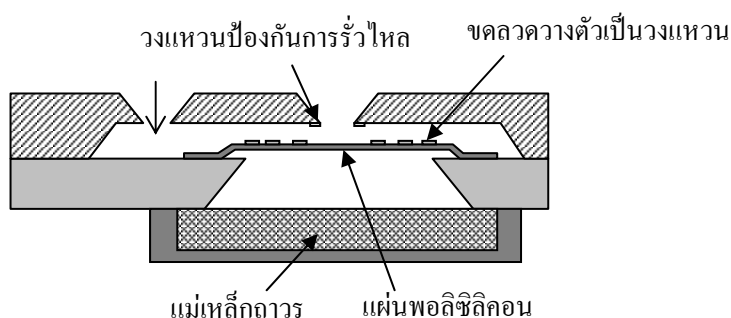
รูปที่ 2.7 กลไกการขับเคลื่อนโดยการขยายหรือหดตัวของวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ โขอิเล็กทริก



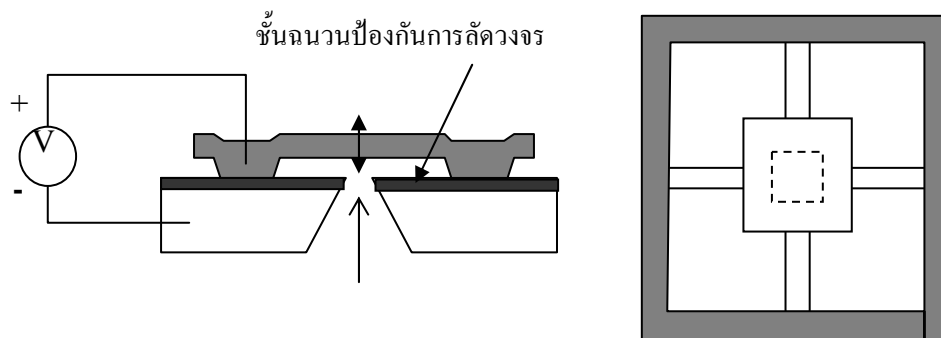
รูปที่ 2.8 กลไกการขับเคลื่อนโดยใช้แรงดันแก๊สจากแหล่งจ่ายภายนอก

การขับเคลื่อนแบบที่เจ็ด ใช้หลักการของโซลินอยด์ (solenoid actuation) สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมแกนเหล็กหรือขดลวด (electromagnetic) ให้เคลื่อนที่ไปดันผนังของช่องทางเดินจุลภาคให้เปิด-ปิดการไหลของของไหล เช่น การใช้พอลิซิลิคอนเป็นแผ่นปิดช่องทางเดินของไหล

ทางเดินของไหล โดยแผ่นปิดจะมีรูปทรงกรวยเพื่อลดการรั่วไหลของแก๊ส (Hirono, Yanagisawa, Kuwano, and Nakano, 1997) การใช้ประโยชน์จากการโค้งตัวของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้างระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์กับโครเมียมที่เคลือบอยู่ด้านบน ทำให้แผ่นปิดอยู่ในสภาวะปกติเปิด การปิดการไหลทำได้ด้วยการป้อนความต่างศักย์ให้กับฐานซิลิคอนและโครเมียม (Haji-Babaei, Kwok, and Huang, 1997) การสร้างไมโครวาล์วเป็นพิกเซลล์หลายๆตัว เพื่อควบคุมการไหลอย่างละเอียด โดยใช้พอลิซิลิคอนเป็นแผ่นปิดลอยเหนือช่องทางเดิน (Vandelli, Wroblewski, Velonis, and Bifano, 1998) ดังแสดงโครงสร้างพื้นฐานในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 กลไกการจับร้าวโดยใช้หลักการของโซลินอยด์



รูปที่ 2.12 กลไกการจับร้าวโดยใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต

นอกจากนี้ ยังมีกลไกการทำงานรูปแบบอื่นๆ เช่น กลไกการควบคุมด้วยฟองอากาศ เพื่อใช้ช่องปริมาตรปิด (dead volume) ที่เกิดจากฟองอากาศมาอุดทางเดินของไหล ซึ่งสามารถทนต่อแรงดันของเหลวภายในได้ระดับหนึ่ง ก่อนที่ฟองอากาศจะไหลไปตามของไหลทำให้ไมโครวาล์วอยู่ในสภาวะเปิด และถ้าต้องการปิดช่องทางเดินก็ใช้ฟองอากาศปิดอีกครั้ง (Leung, Khaouf, Van Lintel, Haller, and Renaud, 2000) เป็นต้น

การประยุกต์ใช้ไมโครวาล์วในงานควบคุมการไหลระดับจุลภาคนั้นมีหลายประเภท โดยมุ่งเน้นให้ไมโครวาล์วที่ถูกสร้างขึ้น ทำหน้าที่ควบคุมการไหลผ่านในทิศทางเดียวซึ่งมี 2 แบบขึ้นกับกลไกการควบคุม การไหลผ่านแบบแรก คือ การไหลผ่านที่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ โดยการควบคุมขนาดอินพุตที่ป้อนให้กลไกการทำงาน ทำให้สามารถควบคุมขนาดการเปิดของช่องทางเดินได้ เพื่อนำไปใช้ในระบบที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น ควบคุมปริมาณสารเคมีในการให้ยา (Wagner, Quenzer, Hoerschelmann, Lisec, and Juerss, 1996; Koide, Sasaki, Yoshimaru, Miyake, and Terayama, 2000) ควบคุมแรงดันเลือดภายในสมอง (Walter, Leonhardt, Schubert, and Aschoff, 1996) ควบคุมปริมาณสารละลายในการวิเคราะห์เลือด (Ohori, Shoji, Miura, and Yotumato, 1997) และควบคุมการไหลของสารเคมีในไมโครโรบอตที่ใช้ตรวจสอบระบบทางเดินอาหาร (Reynaerts, Peirs, and Brussel, 1999) เป็นต้น

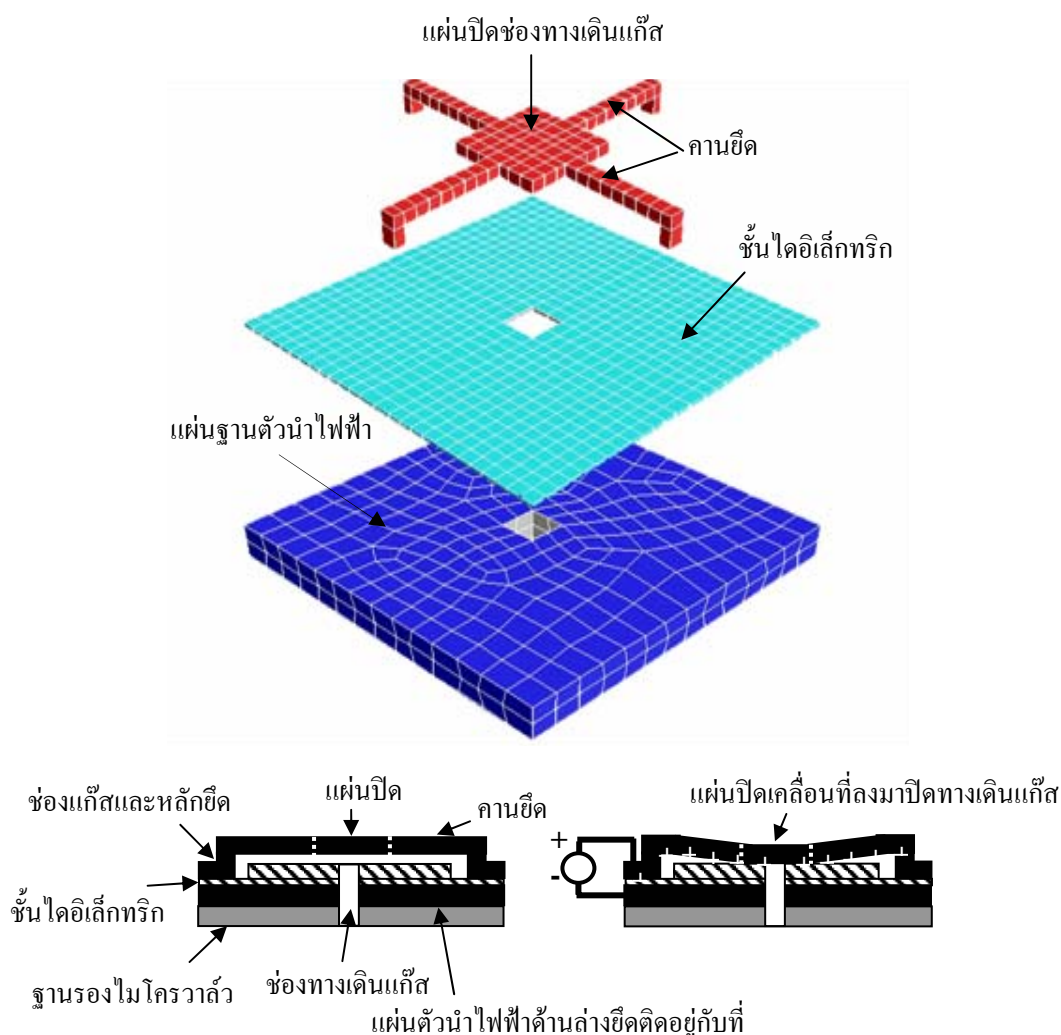
การไหลผ่านแบบที่สอง คือ การไหลผ่านที่ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ จะขึ้นอยู่กับขนาดของช่องทางเดินและแรงดันของของไหลก่อนผ่านรูไมโครวาล์ว เพื่อนำไปใช้ในระบบที่ต้องการผลตอบสนองที่รวดเร็วและอัตราการไหลสูง เช่น ควบคุมการไหลของแก๊สในช่องสุญญากาศ (Sim, Kurabayashi, and Esashi, 1995) ควบคุมการไหลของแก๊สในระบบภาวะเย็นยวดยิ่ง (Burger, et al., 1999) ควบคุมการไหลของแก๊สในตัวฉีดจุลภาค (microinjector) ที่ใช้กับระบบวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของแก๊ส (Wiranto, Soegandi, Muljono, Widodo, and Hermida, 2000) รวมทั้งควบคุมการไหลของแก๊สในระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ (Yobas, Huff, Lisy, and Durand, 2001; Yobas, Durand, Skebe, Lisy, and Huff, 2003)

2.3 ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต

ไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต มีโครงสร้างเบื้องต้นดังรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้า 2 แผ่นวางขนานกัน โดยมีชั้นไดอิเล็กทริกวางคั่นเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างแผ่นตัวนำ แผ่นตัวนำด้านล่างถูกยึดติดกับฐานรอง (substrate) ส่วนแผ่นตัวนำด้านบนแขวนลอยอยู่เหนือฐานรอง ที่ฐานรองมีช่องทางเดินแก๊สทะลุผ่านด้านล่างถึงด้านบน ในสภาวะปกติแก๊สสามารถไหลผ่านช่องทางเดินจากด้านล่างออกสู่ด้านบนได้ แต่ขณะที่แผ่นตัวนำด้านบนถูกไบแอสด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง จะทำให้แผ่นตัวนำด้านบนถูกดึงดูดให้เคลื่อนตัวลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ทำให้แก๊สไม่สามารถไหลผ่านช่องทางเดินแก๊สได้

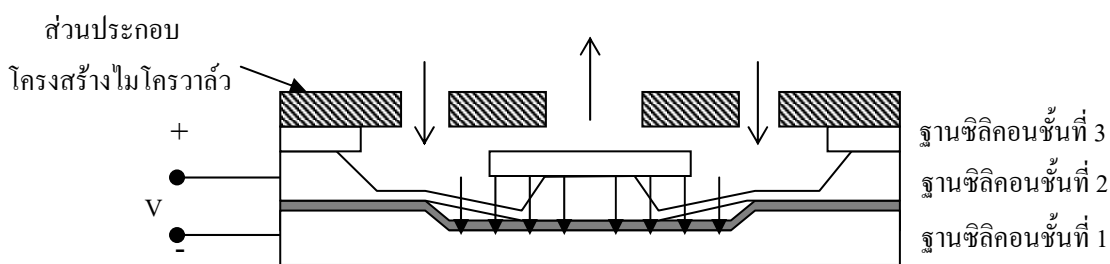
งานวิจัยของไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตที่ผ่านมาจะมีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับที่นำเสนอข้างต้น แต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะโครงสร้างแผ่นตัวนำ วัสดุที่ใช้ในการสร้าง การวางตัวของช่องทางเดิน และการประยุกต์ใช้งาน โดยมีการพัฒนาเพื่อมุ่งเน้นให้มีขนาดเล็ก ประหยัดพลังงานและราคาถูก ในช่วงแรกไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต จะใช้แผ่นวัสดุฐาน

ซิลิคอนเป็นโครงสร้างหลัก ด้วยกระบวนการกัดซิลิคอนให้เป็นช่องลึกลง ไปจนเป็นชั้นแผ่นบาง ทำให้มีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนที่ตามแนวคิ่งเพื่อใช้เป็นส่วนยึดเหนี่ยวส่วนของฝาปิดที่อยู่ตรงกลาง การสร้างไมโครวาล์วด้วยฐานซิลิคอนอาจจะซ้อนกันหลายชั้นได้ Huff, Mettner, Lober, and Schmidt (1990) ใช้ฐานซิลิคอน 3 ชั้นวางซ้อนกันสร้างเป็นไมโครวาล์วควบคุมการไหลของแก๊ส โดยให้ชั้นล่างสุดเป็นฐาน ชั้นที่สองเป็นชั้นที่ถูกกัดจนเป็นแผ่นบางและชั้นบนสุดเป็นฝาปิด โดยมีช่องทางเดินอยู่ด้านบน ทำงานในสภาวะปกติปิดด้วยสมดุลของแรงดันภายใน และเปิดเมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นตัวนำ หลักการสมดุลแรงดันนี้ยังถูกนำมาใช้สร้างไมโครวาล์วในการควบคุมการไหลของของเหลวที่แรงดันสูง โดยให้แรงดันของเหลวที่เข้ามาดันฝาปิดให้ปิดช่องทางเดิน (Van Der Wijngaart, Enoksson, and Stemme, 2002) การเปิดทำได้ด้วยการไบแอสด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง เพื่อดึงฝาปิดขึ้น แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.14

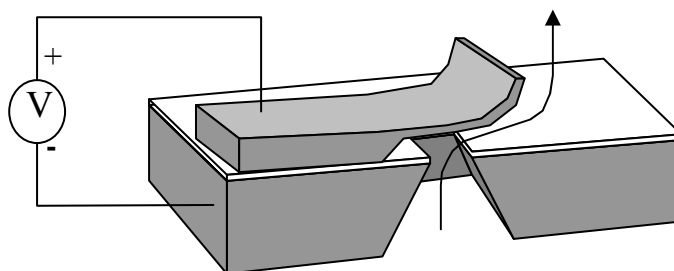


รูปที่ 2.13 การทำงานและโครงสร้างของไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต

Ohstein, Fukiura, Ridley, and Bonne (1990) นำเสนอไมโครวาล์วที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าควบคุมการไหลของแก๊ส โดยมุ่งเน้นที่การประหยัดพลังงาน ไมโครวาล์วดังกล่าวใช้ค่าความต่างศักย์ 30 V และทนแรงดันแก๊สได้ 114 mmHg ให้อัตราการไหล 150 sccm และทนแรงดันย้อนกลับได้ 760 mmHg โครงสร้างใช้การฝังแผ่นตัวนำในชั้นฉนวน เพื่อทำหน้าที่เป็นแผ่นปิดช่องทางเดินที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นคานที่ยึดปลายด้านหนึ่ง และปล่อยให้ปลายอีกด้านเป็นอิสระ ต่อมาโครงสร้างได้ถูกพัฒนาขึ้น สำหรับระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สสูง โดย Haji-Babaei, et al. (1997) นำเสนอไมโครวาล์วที่สร้างด้วยการเคลือบโครเมียมบนซิลิคอนไดออกไซด์ เกิดเป็น โครงสร้างแผ่นคาน Cr/SiO₂ ที่โค้งตัวขึ้นซึ่งจะลดแรงต้านทานการไหล การโค้งตัวขึ้นเกิดจากการขยายตัวตามแนวขวางของวัสดุทั้งสองที่ไม่เท่ากันในระหว่างกระบวนการสร้าง ถ้ามีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างโครเมียมและแผ่นตัวนำด้านล่าง แผ่นคานจะเคลื่อนลงมาปิดช่องทางเดิน แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตใช้ฐานซิลิคอน 3 ชั้น วางซ้อนกัน

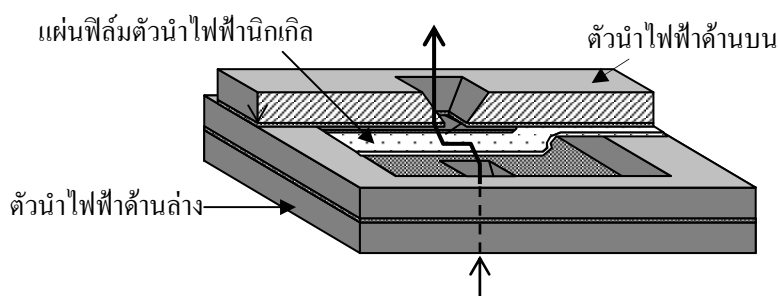


รูปที่ 2.15 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นคาน

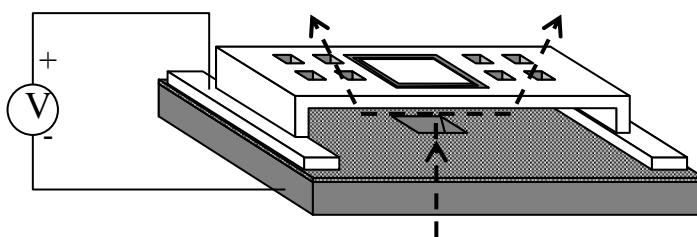
Sato, and Shikida (1992) นำเสนอไมโครวาล์ว 2 ทิศทาง ด้วยการสร้างแผ่นฟิล์มตัวนำไฟฟ้าจากนิกเกิลให้วางตัวเป็นรูปตัว S เพื่อเลือกช่องทางการไหลออกของแก๊สที่สร้างจากฐานตัวนำซิลิคอนที่กัดเป็นรู โดยการป้อนความต่างศักย์สลับกันระหว่างตัวนำไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง เพื่อดึงแผ่นฟิล์มเคลื่อนที่ปิด-เปิดช่องทางเดิน ข้อดีของแผ่นฟิล์มแบบนี้จะเพิ่มระยะเปิดของแผ่นปิดทำ

ให้มีกรไหลที่ดีขึ้น และโครงสร้างเดียวกันนี้ Shikida, et al. (1995) ได้นำมาพัฒนาให้เป็นการไหลในทิศทางเดียว สร้างด้วยซิลิคอนซ้อนกัน 3 ชั้น โดยจัดเรียงเป็นอะเรย์ของไมโครวาล์วหลายตัว เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมการไหลได้แม่นยำมากขึ้น แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.16

รูปแบบโครงสร้างไมโครวาล์วแบบแผ่นไดอะแฟรม โดยให้มีแผ่นปิดเหนือช่องทางเดินได้แก่ งานวิจัยของ Vandelli, Wroblewski, Velonis, and Bifano (1998) แผ่นปิดที่สร้างด้วยพอลิซิลิคอนทั้งสองด้านจะยึดกับขอบด้านข้าง และมีวงแหวนกันการรั่วไหลอยู่รอบปากรู ไมโครวาล์วจะทำงานในสภาวะปกติเปิด และวางตัวเป็นเซลล์ เพื่อเพิ่มความละเอียดในการควบคุมการไหล โครงสร้างนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนอง Collier, Wroblewski, and Bifano (2004) ได้เจาะช่องบนแผ่นเพื่อลดแรงต้านทานจากแก๊สและค่าคงที่สปริงของแผ่นปิดเมื่อเกิดการเคลื่อนที่และทำการจัดเรียงไมโครวาล์วเป็นอะเรย์ แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแผ่นฟิล์มตัวนำไฟฟ้าจากนิกเกิลให้วางตัวเป็นรูปตัว S

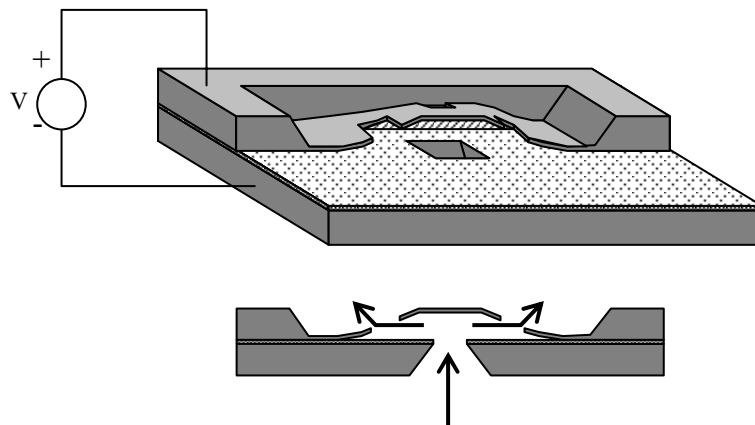


รูปที่ 2.17 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นไดอะแฟรม

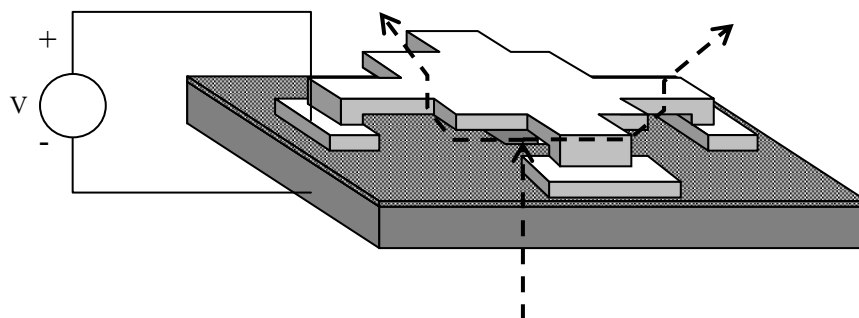
งานวิจัยของ Yobas, et al. (2001) ใช้แผ่นซิลิคอนที่กัดจนเป็นชั้นบางยึดหยุ่นที่ถูกเชื่อมด้วยโบรอนมาวางบนฐานซิลิคอนอีกอันที่เจาะรูเอาไว้ ขอบด้านข้างทั้ง 4 ด้าน จะถูกยึดไว้ให้แผ่นปิดอยู่ในสภาวะปิดตลอดเวลา ซิลิคอนที่ถูกกัดจนบาง จะเคลื่อนที่ขึ้นเมื่อมีแก๊สไหลผ่านขึ้นมา โดยที่แผ่นปิดจะเปิดช่องสี่เหลี่ยมให้แก๊สไหลออกไปได้ เมื่อป้อนความต่างศักย์จะดึงให้แผ่นปิดเคลื่อนไปหยุด

การไหลของแก๊ส ดังรูปที่ 2.18

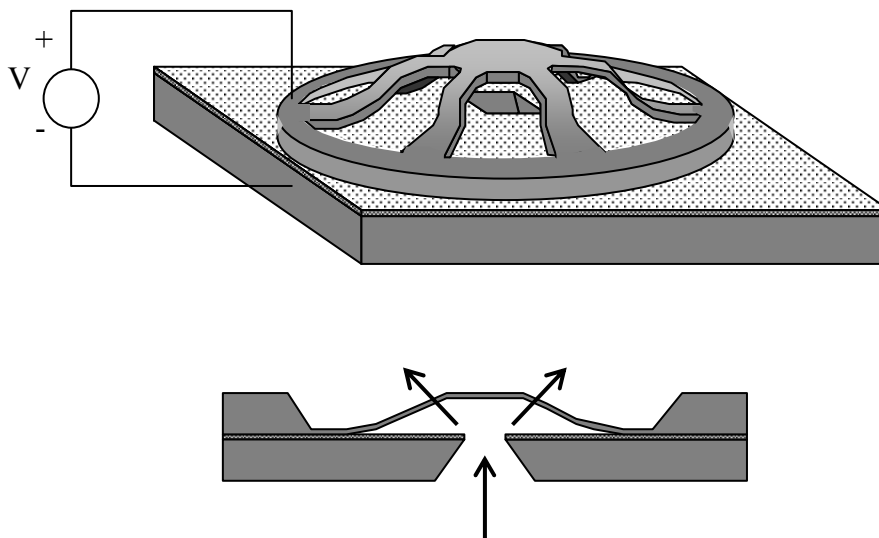
โครงสร้างไมโครวาล์วอีกรูปแบบหนึ่ง จะใช้คานยึดแขวนให้แผ่นปิดอยู่เหนือช่องทางเดิน โดยสิ่งที่แตกต่างกันคือวัสดุที่ใช้สร้างและลักษณะของคานยึด Hirono, et al. (1997) ใช้วัสดุโครงสร้างที่เป็นโลหะผสมที่มีนิกเกิลอยู่ระหว่าง 30-90% (permalloy) หรือ NiFe โดยมีแผ่นปิดที่ถูกแขวนลอยด้วยคานยึด 4 อันวางตัวเป็นมุม 90° เพื่อเพิ่มความยาวคานยึดโดยคงขนาดของไมโครวาล์วให้เล็ก ดังรูปที่ 2.19 แผ่นปิดอยู่เหนือช่องทางเดินของไหล มีรูปทรงกรวยเพื่อลดการรั่วไหลของแก๊ส Dubois, Guldemann, Grétilat, and De Rooij (2001) ใช้วัสดุ TaSiN สร้างเป็นแผ่นปิด โดยให้มีโครงสร้างเป็นรูตัว T ถูกยึดด้วยคานยึดแบบตรงเพียง 2 ด้านส่วนคานตรงกลางจะเป็นปลายอิสระ เพื่อช่วยลดค่าความต่างศักย์ในการดึงแผ่นปิดลงมา Yobas, et al. (2003) ใช้พอลิซิลิคอนสร้างแผ่นปิดเป็นวงกลมและใช้คานยึดแบบตรงวางตัวคล้ายล้อเกวียน รั้งให้แผ่นปิดอยู่เหนือช่องทางเดิน แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นไดอะแฟรม Yobas, et al. (2001)



รูปที่ 2.19 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นปิดและคานยึด



รูปที่ 2.20 ไมโครวาล์วที่มีโครงสร้างแบบแผ่นปิดและล้อเกวียน Yobas, et al. (2003)

2.4 การประยุกต์ใช้ไมโครวาล์วกับระบบแสดงอักษรผลเบรลล์

จากแนวความคิดในการแสดงจุดอักษรเบรลล์โดยใช้แรงดันแก๊สดังได้กล่าวในบทนำ Yobas, et al. (2001) ได้สร้างไมโครวาล์วแบบแผ่นไดอะแฟรมด้วยการกัดฐานซิลิคอนจนได้ชั้นบางเพื่อเป็นส่วนเหนียวรับการเคลื่อนตัวของแผ่นปิด และนำไปประกบกับฐานซิลิคอนที่กัดเป็นช่องทางเดินแก๊สขึ้นมาทางด้านล่าง และให้แผ่นไดอะแฟรมอยู่ติดกับฐาน ดังรูปที่ 2.18 เนื่องจากการวางตัวของแผ่นตัวนำด้านบนที่ไม่สร้างระยะห่างเริ่มต้นระหว่างตัวนำทั้งสอง ส่งผลให้ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำเมื่อทำงานที่แรงดันแก๊สสูง และสามารถทำงานได้ดีที่ความต่างของแรงดันแก๊สภายในและภายนอก 27.6 kPa ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ ด้วยขนาดของไมโครวาล์วคือ 2 มิลลิเมตร \times 2 มิลลิเมตร โดยมีช่องระบายแก๊สที่แผ่นไดอะแฟรมขนาด 100 ไมโครเมตร \times 100 ไมโครเมตร และช่องทางเดินแก๊สขนาด 200 ไมโครเมตร \times 200 ไมโครเมตร เนื่องจากขนาดของไมโครวาล์วที่ใหญ่และช่องทางเดินแก๊สที่มีขนาดกว้าง ส่งผลให้ไมโครวาล์วรูปแบบนี้ไม่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นเซลล์อักษรเบรลล์ 6 จุด เพราะขนาดของจุดอักษรเบรลล์โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และขนาดของช่องทางเดินแก๊สที่กว้าง ทำให้ต้องเปิดช่องกว้างเพื่อใช้ในการกัดฐานทางด้านล่างของซิลิคอนขึ้นมาเป็นมุม 54.7° ซึ่งจะแปรค่าตามความหนาของแผ่นซิลิคอน

เพื่อแก้ไขปัญหาดังที่กล่าวในข้างต้น Yobas, et al. (2003) จึงได้นำเสนอไมโครวาล์วอีกรูปแบบหนึ่ง ใช้พอลิซิลิคอนสร้างแผ่นปิดเป็นวงกลมและใช้คานยึดแบบตรงวางตัวคล้ายล้อเกวียน รั้งให้แผ่นปิดอยู่เหนือช่องทางเดิน ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งสามารถทำงานได้ ที่ความต่างของแรงดันแก๊ส

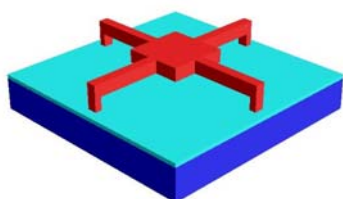
ภายใน และภายนอก 82.7 kPa ด้วยความต่างศักย์ 68 V ความยาวคานยึด 665 μm ขนาดช่องทางเดินแก๊สคือ 70 $\mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ ขนาดของไมโครวาล์วประมาณ 2 เท่า ของความยาวคานยึด และค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการดึงแผ่นปิดลงมาที่ฐาน จะแปรค่าตามความยาวของคานยึดและความระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐาน คานยึดที่ยาวมากขึ้นจะลดค่าคงที่สปริงทำให้ใช้พลังงานน้อยในสภาวะปกติ แต่จะทำให้ไมโครวาล์วมีขนาดใหญ่ขึ้น และระยะยกตัวของแผ่นปิดเมื่อได้รับแรงดันแก๊สจะสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกิดระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานมากขึ้น ต้องใช้พลังงานมากในการดึงแผ่นปิดลงมา แม้ว่าการเพิ่มจำนวนคานยึดให้มากขึ้น จะสามารถลดระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐาน เมื่อได้รับแรงดันแก๊สได้ก็ตาม แต่ค่าคงที่สปริงที่มากขึ้น ก็จะส่งผลให้ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงมากขึ้นตามไปด้วย

การศึกษาถึงรูปแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดของไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตในการประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์นั้น รุ่งเรือง พัฒนากุล และคณะ (2547) ได้ศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าและพื้นที่ที่ใช้ในการสร้างไมโครวาล์วซึ่งมีคานยึดแบบตรง โดยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CoventorWare™ ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบกลไฟฟ้า จุลภาคที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้โครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลต่อต้นทุนการสร้าง เพราะต้องใช้พื้นที่ในการสร้างมากขึ้นตามขนาดความยาวของคานยึด นั่นคือการใช้ต้นทุนที่สูงและสิ้นเปลืองพลังงานเมื่อนำไปใช้กับแรงดันแก๊สมากๆ

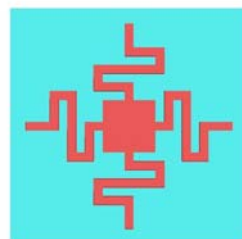
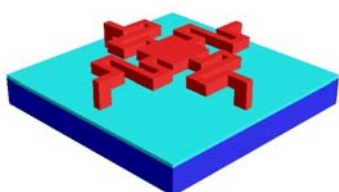
การลดพื้นที่ของไมโครวาล์ว สามารถทำได้ด้วยการออกแบบลักษณะของคานยึดในรูปแบบอื่นนอกเหนือจากรูปแบบตรง (straight) เช่น แบบขด (serpentine) แบบขาปู (crab-leg) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีข้อดี-ข้อเสียต่างกัน ดังรูปที่ 2.21 แสดงรูปแบบคานยึดที่ใช้กับไมโครวาล์ว ทั้ง 3 แบบ นอกจากนี้ รุ่งเรือง พัฒนากุล และคณะ (2548) ได้ทำการจำลองแบบเพื่อหารูปแบบคานยึดของไมโครวาล์ว ชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตที่เหมาะสมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ พบว่าคานยึดแบบขาปูมีความเหมาะสมที่สุด เพราะสามารถลดระยะห่างระหว่างฐานรองกับแผ่นปิดในสภาวะที่มีแรงดันแก๊สกระทำช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าขั้วรับ และสามารถเพิ่มระยะห่างในสภาวะปกติ เพื่อลดการแทรกตัวของของเหลวระหว่างกระบวนการสร้าง ลดผลการเนบดัดยึดระหว่างฐานรองกับแผ่นปิดได้

สำหรับการนำไปใช้กับระบบแสดงอักษรเบรลล์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาใน 2 สภาวะคือ สภาวะปกติที่ไม่มีแรงดันแก๊สเข้ามา กับสภาวะที่ต้องรับความต่างแรงดันแก๊สขนาด 27.6 kPa ซึ่งเป็นขนาดแรงดัน ที่สามารถทำให้ผู้พิการทางสายตาสามารถรับรู้ความรู้สึก และแปลความหมายจากการสัมผัสจุดเบรลล์ที่เกิดขึ้นได้ ตัวแปรที่จะนำมาพิจารณา ได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงแผ่นปิดลงมาที่ฐานหรือแรงดันไฟฟ้าเนบดัดของทั้งสองสภาวะ และระยะยกตัวของแผ่นปิดเมื่อได้รับแรงดันแก๊สเข้าทางด้านล่าง ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในสภาวะที่รับแรงดันแก๊สไม่มากนักก็จะช่วย

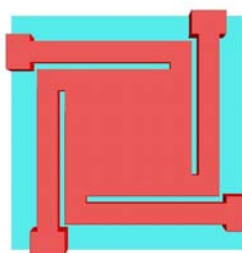
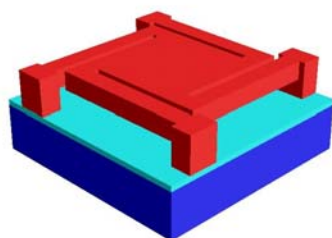
ประหยัดพลังงานที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับระยะยกตัวของแผ่นปิดด้วยว่าสูงเพียงใด และจะส่งผลถึงรูปแบบคานยึดที่นำมาใช้หรือไม่ นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในสภาวะปกติ ก็จะสัมพันธ์กับค่าคงที่สปริงที่เกิดจากคานยึดว่ามากเพียงใด และจะส่งผลต่อการแก้ปัญหาการติดของแผ่นปิดเนื่องจากประจุดก้างได้ เพราะแรงดึงกลับของคานยึดที่มากพอจะช่วยลดผลดังกล่าวได้มากขึ้น



(ก) คานยึดแบบตรง



(ข) คานยึดแบบขด



(ค) คานยึดแบบขานปู

รูปที่ 2.21 ลักษณะคานยึดในการจำลองการทำงานทั้ง 3 แบบ (ก) คานยึดแบบตรง (ข) คานยึดแบบขด (ค) คานยึดแบบขานปู

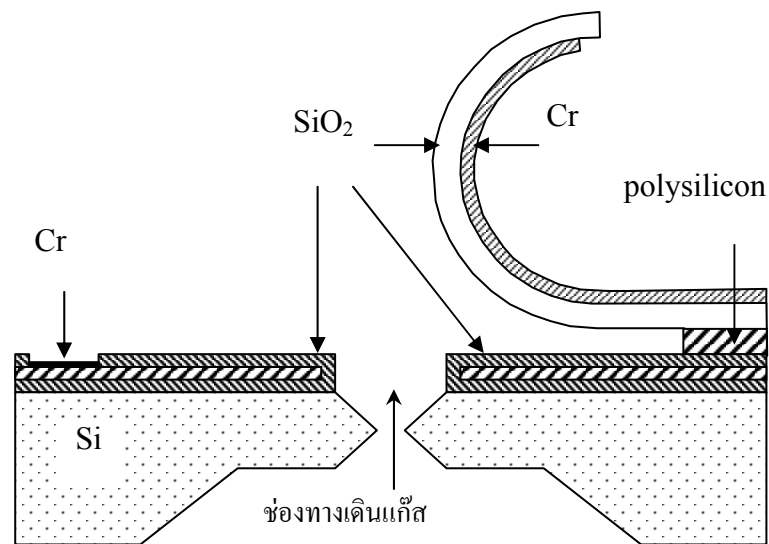
2.5 ไมโครวาล์วที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ

ปัญหาสำคัญสำหรับโครงสร้างไมโครวาล์วที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิต คือ แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากเมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้ามีค่าน้อยๆ เท่านั้น และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลของแก๊สมาก จะทำให้มีระยะห่างระหว่างแผ่นปิดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านบนกับฐานรองที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านล่างมีค่ามาก ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จะขับเคลื่อนการทำงานไม่เพียงพอ สำหรับปัญหาในกระบวนการสร้างคือ ระหว่างการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้งไป ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้โครงสร้างที่เราสร้างขึ้นนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการสร้างระหว่างชั้นเคลือบมากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นชั้น จึงมีโอกาที่ของเหลวจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างทำการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวและแรงตึงผิวของของเหลวนั้นๆจะทำให้โครงสร้างที่ลอยอยู่ถูกดูดติดกับฐานรองให้แนบติดยึดโดยถาวรได้

โครงสร้างกลไกการเปิด-ปิดช่องทางเดินแก๊สที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้นอกเหนือจากการใช้คานยึดแบบขานปู คือ โครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระ (Haji-Babaei, et al., 1997) สามารถทำการสร้างได้ ด้วยการเคลือบชั้นโลหะโครเมียมหนา 80 อังสโตมบนซิลิคอนไดออกไซด์หนา 3.5 ไมโครเมตร และเกิดเป็นโครงสร้างแผ่นคาน Cr/SiO_2 ที่โค้งตัวขึ้นจากความเค้นอัดตกค้าง (residual compressive stress) ภายในชั้น SiO_2 และความเค้นดึงตกค้าง (residual tensile stress) ภายในชั้นโครเมียมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้าง โดยชั้นโลหะโครเมียมซึ่งวางอยู่บนบน จะเกิดการหดตัวสั้นกว่าปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั่วคราวเพื่อปลดปล่อยโครงสร้างเนื่องจากมีความเค้นดึง ในขณะที่ชั้น SiO_2 ซึ่งเป็นส่วนประกอบล่างของแผ่นคานจะมีความเค้นอัด ทำให้แผ่นคานยาวกว่าปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้งไป ส่งผลให้แผ่นคาน โค้งงอขึ้นและทำให้เกิดสถานะปกติเปิดกับไมโครวาล์ว ดังรูปที่ 2.22 โดยขนาดความโค้งงอของแผ่นคานจะขึ้นกับความหนาของชั้นวัสดุแต่ละชั้นและอุณหภูมิในกระบวนการสร้าง สำหรับข้อดีของไมโครวาล์วแบบนี้คือ อนุญาตให้แก๊สมีอัตราการไหลสูงโดยไม่มีส่วนของโครงสร้างไปปิดกั้นช่องทางเดินและใช้แรงดันไฟฟ้าเพียง 30 V ในการดึงแผ่นคานโค้งลงมาแนบสนิทกับฐานในสถานะที่ไม่มีแรงดันแก๊สมากกระทำทำให้แผ่นปิด

ผลจากการโค้งงอขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระ ทำให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อควบคุมการไหลของแก๊สได้ โดยในสถานะที่แก๊สไหลผ่าน จะไม่มีแรงต้านทานทางกลของแผ่นปิดมาขวางช่องทางเดินแก๊สไว้ ส่งผลให้อัตราการไหลสูง และในสถานะที่ต้องการหยุดการไหลของแก๊ส แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบริเวณหลักยึดจะมีค่ามาก เนื่องจากมีระยะห่างต่ำ สามารถดึงแผ่นปิดลงมาตามแนวความยาวคานได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างไมโครวาล์วแบบแผ่นคานปลายอิสระบนฐานซิลิคอน จำเป็นต้องสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในเตาเผาอุณหภูมิสูง และใช้สารเคมีอันตรายคือกรดไฮโดรฟลูอริกเข้มข้นในการสกัดทิ้ง กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการสร้าง

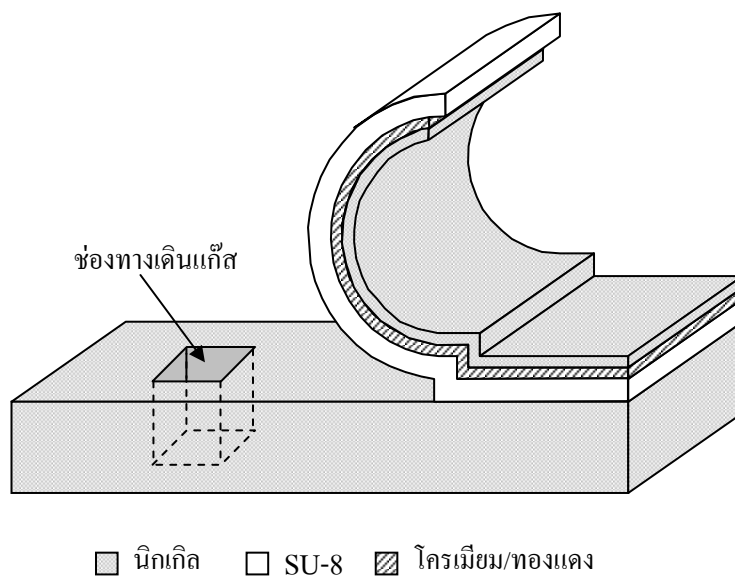
ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งไม่สามารถทำได้ภายในห้องปฏิบัติการทั่วไป อีกทั้งฐานรองวัสดุซิลิคอนมีความนำไฟฟ้าต่ำกว่าโลหะ ส่งผลให้ใช้พลังงานขั้วเร้าสูงขึ้น ทำให้กระบวนการสร้างมีต้นทุนสูงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ



รูปที่ 2.22 ไมโครวาล์วที่ขั้วเร้าด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ

สำหรับงานวิจัยนี้ จะดำเนินการพัฒนากระบวนการสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างไมโครวาล์วแผ่นคานปลายอิสระเพื่อลดปัญหาดังที่กล่าวในข้างต้นด้วยกระบวนการพื้นฐานภายในห้องปฏิบัติการ โดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกแทนที่ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการหมุนเคลือบสารไวแสงเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริก และชั้นโลหะโครเมียมบนแผ่นคานจะเปลี่ยนเป็นชั้นโลหะซ็อนทัทกัน 3 ชั้น ได้แก่ โครเมียม ทองแดงและนิกเกิล โดยควบคุมขนาดความโค้งของแผ่นคานด้วยความหนาของชั้นนิกเกิลผ่านกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า สำหรับช่องทางเดินแก๊สแบบเดิมที่ต้องผ่านกระบวนการกัดซิลิคอนแบบเปียก จะถูกแทนที่ด้วยฐานรองนิกเกิลที่ถูกสร้างขึ้นมาพร้อมกับช่องทางเดินแก๊ส เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าและลดพลังงานขั้วเร้าลง กระบวนการสร้างฐานรองนิกเกิลจะใช้กระบวนการกำหนดรูปร่างของวัสดุพอลิเมอร์แบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet Lithographie Galvanoformung Abformung: UV LIGA) ซึ่งเป็นการสร้างโครงสร้างที่มีความสูงหรือหนามากเมื่อเทียบกับขนาดของวัสดุ โดยใช้เทคนิคการหล่อขึ้นรูปสารไวแสง (moulding) และการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า เพื่อสร้างชั้นโลหะให้เต็มเบ้าหรือแบบ หลังจากนั้นจึงกำจัดแบบทิ้ง เหลือไว้แต่โครงสร้างของชั้นโลหะ หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดบวก

ก่อนจึงจะนำไปสร้างส่วนแผ่นคานปลายอิสระที่ทำหน้าที่ปิดช่องทางเดินแก๊สต่อไป พิจารณา โครงสร้างไมโครวาล์วที่พัฒนาขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.23

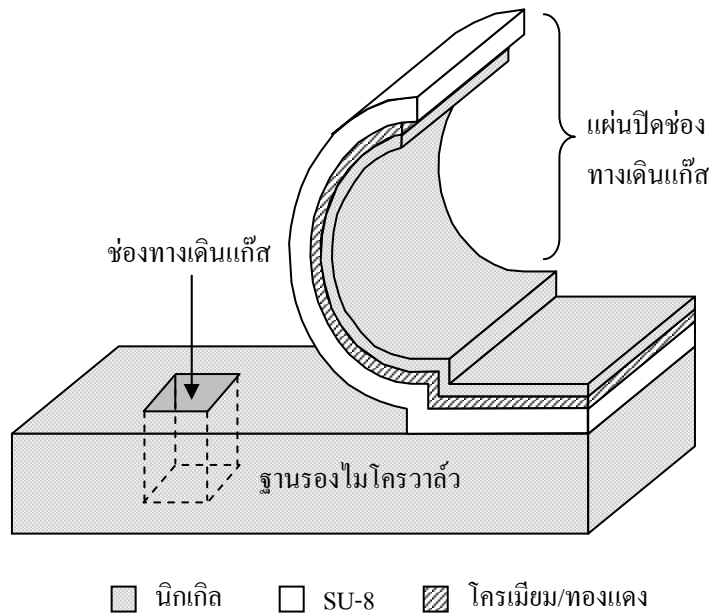


รูปที่ 2.23 โครงสร้างไมโครวาล์วแผ่นคานโค้งปลายอิสระที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

บทที่ 3

การออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ไมโครวาล์วแบบแอกทีฟที่ทำงานด้วยแรงไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานปลายอิสระจะถูกปรับปรุงจากโครงสร้างพื้นฐานของ Haji-Babaei, et al. (1997) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ด้วยการพัฒนากระบวนการสร้างภายในห้องปฏิบัติการ โดยขั้นตอนการพัฒนาจะเริ่มตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างจากฐานรองขึ้นมาจนกระทั่งถึงแผ่นคานและกำหนดชั้นวัสดุโครงสร้างของไมโครวาล์วให้สอดคล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ ไมโครวาล์วรูปแบบนี้ประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วนได้แก่ ฐานรองไมโครวาล์ว ช่องทางเดินแก๊สและแผ่นปิดช่องทางเดินแก๊ส ดังรูปที่ 3.1 โดยการออกแบบจะอ้างอิงตามกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิวหรือเทคนิคการสร้างแบบ 2 มิติ ซ้อนทับชั้นวัสดุเป็นชั้นๆ ด้วยการกำหนดลวดลายโครงสร้างด้วยการฉายแสง



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบหลักของไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานโค้งปลายอิสระ

สำหรับบทนี้ จะอธิบายถึง การออกแบบช่องทางเดินแก๊สร่วมกับฐานรองนิกเกิล และรูปแบบโครงสร้างของแผ่นคานปลายอิสระรวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลาย

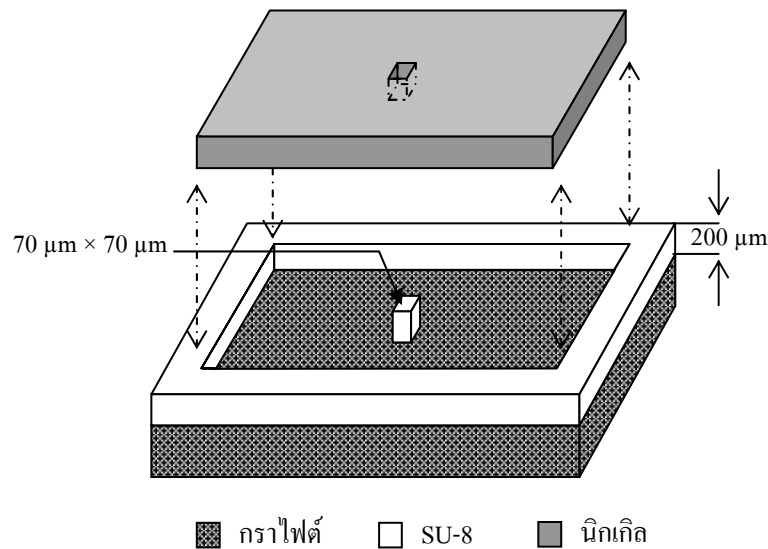
อิสระที่มีการโค้งตัว เนื่องจากการซ้อนทับกันของชั้นวัสดุ 2 ชนิด ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิ (Coefficient of Thermal Expansion: CTE) แตกต่างกันส่งผลให้เกิดการโค้งตัวขึ้นตามความเค้นภายในชั้นวัสดุและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองจะเกิดแรงไฟฟ้าสถิตดึงแผ่นปิดลงมาแนบติดกับฐานรอง โดยแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ตามหลักการของแผ่นตัวเก็บประจุแบบคู่ขนาน (parallel plate capacitor) ซึ่งจะหลักการพื้นฐานในการพิจารณาพฤติกรรมคู่ควาระหว่างแรงทางกลของแผ่นปิดที่โค้งตัวขึ้นและแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างตัวนำไฟฟ้าทั้งสอง เพื่อนำไปสู่การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิดลงมาตามขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป สำหรับสภาวะการไหลของแก๊สผ่านช่องทางเดินแบบสอบเข้า (converging nozzle) นั้นสามารถจำลองพฤติกรรมได้จากหลักการไหลชนิดคงตัวของของไหลแบบอัดตัวได้ (steady flow of compressible fluids) ซึ่งจะพิจารณาร่วมกับขนาดแรงดันแก๊สที่ป้อนเข้าและพุ่งออกมาเพื่อวิเคราะห์อัตราการไหลที่ช่องทางออกของแก๊สขนาดต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงของแผ่นปิด สำหรับกระบวนการสร้างโครงสร้างในแต่ละส่วนซึ่งประกอบไปด้วย กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สและเตรียมฐานรองโลหะนิกเกิล กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ (planarization) และกระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระ จะนำเสนอในบทที่ 4

3.1 การออกแบบช่องทางเดินแก๊สและฐานรองนิกเกิล

การออกแบบโครงสร้างไมโครวาล์วโดยปรับปรุงจากโครงสร้างพื้นฐานของ Haji-Babaei จะมุ่งเน้นการนำไมโครวาล์วไปประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลอักษรรเบรลล์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 การออกแบบโครงสร้างไมโครวาล์วจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ การสร้างช่องทางเดินแก๊สร่วมกับการเตรียมฐานรองโลหะนิกเกิล และการสร้างแผ่นคานปลายอิสระ ซึ่งในแต่ละส่วนจะออกแบบด้วยการใช้ชั้นวัสดุ อุปกรณ์การสร้างและทดสอบ ที่มีภายในห้องปฏิบัติการและหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่รุนแรงและกระบวนการสร้างอุณหภูมิสูง

การสร้างช่องทางเดินแก๊สจะออกแบบให้สร้างขึ้นมาพร้อมกับฐานรองโลหะนิกเกิลด้วย กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะนิกเกิลสร้างมาจากสารไวแสงโพโตริซิชันชนิดลบ SU-8 2100 ที่ผ่านกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเลตบนฐานวัสดุ กราไฟต์ และนำไปลอกสารไวแสงออกเพื่อให้ได้เข้าขึ้นรูปเป็นแท่งวัสดุ SU-8 ที่มีขนาด $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ สูงประมาณ $200 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 3.2 กระบวนการดังกล่าวจะให้โครงสร้างที่มีความหนาและแข็งแรงมากเหมาะกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าบนฐานแกรไฟต์ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะถูกขัดออกไปจนหมดเหลือเพียงชั้นนิกเกิลเท่านั้น จุดสำคัญของช่องทางเดินแก๊สแก๊สที่สร้างขึ้นพร้อมกับฐานรองนิกเกิลคือ ได้โครงสร้างที่เป็นแนวตั้ง สามารถกำหนดขนาดช่องทางออกได้แม่นยำและ

ไม่สิ้นเปลืองพื้นที่ด้านล่างของฐานรองเหมือนกับฐานรองซิลิคอนที่มีการกัดตามระนาบทำให้ช่องด้านล่างกว้างกว่าช่องทางออกด้านบนของแก๊ส ซึ่งเป็นการยากที่จะนำมาเรียงเป็นอะเรย์ของอักษรเบรลล์ นอกจากนี้ซิลิคอนยังมีความนำไฟฟ้าต่ำกว่าโลหะนิกเกิลมาก (ซิลิคอน = $0.012 \text{ (m}\Omega\text{-cm)}^{-1}$, นิกเกิล = $146.199 \text{ (m}\Omega\text{-cm)}^{-1}$) ทำให้ใช้พลังงานในการขับเคลื่อนที่ของแผ่นปิดสูงกว่า



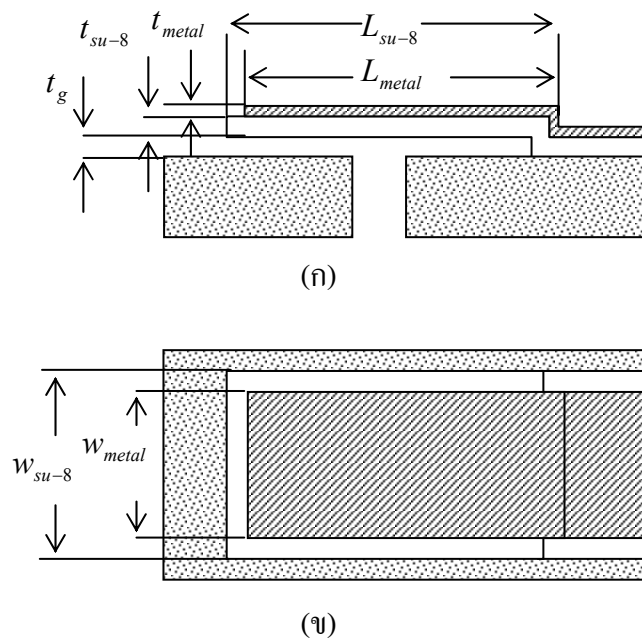
รูปที่ 3.2 เบ้าขึ้นรูปฐานรองนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

3.2 แผ่นปิดช่องทางเดินแก๊สชนิดแผ่นคานปลายอิสระ

โครงสร้างแผ่นปิดช่องทางเดินแก๊ส ถูกออกแบบให้อยู่ในสภาวะปกติเปิดโดยใช้คุณสมบัติการขยายตัวตามอุณหภูมิและความเค้นภายในของชั้นวัสดุที่วางตัวซ้อนกันระหว่างชั้นพอลิเมอร์ที่เป็นโครงสร้างหลักทางด้านล่างและชั้นโลหะนำไฟฟ้าด้านบน แผ่นปิดถูกออกแบบให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีปลายด้านหนึ่งลอยตัวเหนือฐานโดยใช้สารไวแสงโฟโตริซิชันชนิดลบ SU-8 กับโลหะซ้อนทับกัน และปลายอีกด้านเป็นหลักยึดติดกับฐานดังรูปที่ 3.3 จากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของชั้นวัสดุ ชั้นวัสดุ SU-8 จะขยายตัวได้มากกว่าชั้นโลหะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อสกดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้ง แผ่นปิดจะโค้งขึ้นไปทางด้านชั้นโลหะ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1

ชั้นโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านบนจะประกอบไปด้วยนิกเกิล ทองแดงและโครเมียมตามลำดับ ซึ่งโครเมียมและทองแดงจะเคลือบด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงและมีความบางมาก โครเมียมจะช่วยยึดเกาะกับผิวพอลิเมอร์และทองแดงจะเคลือบทับลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำ

ไฟฟ้าในกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า เนื่องจากนิเกิลไม่สามารถชุบด้วยไฟฟ้าลงบนผิวโครเมียมได้ โครงสร้างชั้นโลหะหลักคือนิเกิลที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นวัสดุได้ด้วยระยะเวลาที่ใช้และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (mA/cm^2) นอกจากนี้นิเกิลยังช่วยป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ผิวทองแดงได้ดี พารามิเตอร์การออกแบบทางโครงสร้างของแผ่นคานโค้งแสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 มิติโครงสร้างของแผ่นคานปลายอิสระ (ก) รูปภาคตัดขวาง (ข) รูปด้านบน

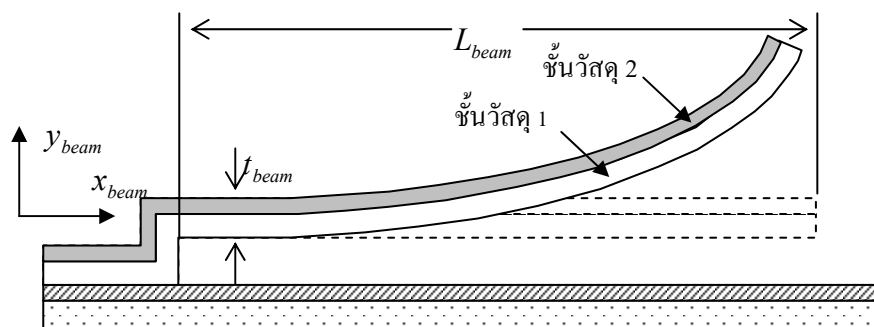
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นวัสดุและพารามิเตอร์การออกแบบทางโครงสร้างของแผ่นคานปลายอิสระ

L_{su-8}	940 μm
w_{su-8}	620 μm
t_{su-8}	2 μm
CTE_{su-8}	~ 50 ppm/K
L_{metal}	840 μm
w_{metal}	520 μm
t_{metal}	0.5 μm
CTE_{nickel}	~ 13.3 ppm/K
t_g	0.5 μm

สำหรับการโค้งตัวของแผ่นคานจากระนาบปกติภายหลังการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนคือ การโค้งตัวขึ้นเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้าง และการโค้งตัวขึ้นจากการแปรตามอุณหภูมิร่วมกับความเค้นภายในชั้นวัสดุ การวิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ เพื่อหาระดับการยกตัวจากระนาบปกติตามความยาวของแผ่นคานซึ่งจะนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าแรงดันแนบติดของแผ่นปิดต่อไป สำหรับการพิจารณาในส่วนแรกคือ แผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติด้วยความเค้นภายในชั้นวัสดุ สามารถจำลองพฤติกรรมการโค้งในสถานะเริ่มต้น (Musolf, and Khol, 2003) โดยแผ่นคานจะถูกตั้งสมมติฐานว่าถูกยึดที่ปลายด้านหนึ่งและปล่อยปลายอีกด้าน ดังรูปที่ 3.4 และให้ความโค้งของแผ่นคานสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น รวมทั้งเกิดความเค้นเชิงเส้นภายในแผ่น โดยที่ความเค้นสามารถแบ่งได้ 2 ส่วน ดังสมการ (3-1) คือ $(\sigma_1 - \sigma_2 / t_{beam}) y_{beam}$ ความเค้นที่ทำให้แผ่นคานโค้งตัวออกจากระนาบปกติและ $(\sigma_1 + \sigma_2 / 2)$ ความเค้นปกติตามระนาบความยาวของแผ่นคาน

$$Stress = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}} \right) \cdot y_{beam} \quad (3-1)$$

เมื่อ y_{beam} คือ ระยะตามความหนาของแผ่นคาน σ_1 คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 1 σ_2 คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 2 และ t_{beam} คือ ความหนาของแผ่นคาน



รูปที่ 3.4 แผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติ

ความสูงของแผ่นคานเมื่อเทียบกับจุดปลายที่ถูกยึดที่ $x_{beam} = 0$ ในสถานะเริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากการประยุกต์เงื่อนไขขอบ 2 แบบคือ ไม่มีการยกตัวของแผ่นคานที่จุดเริ่มต้น $z_{beam}(x_{beam} = 0) = 0$ และความชันที่จุดเริ่มต้นเป็นศูนย์ $dz_{beam}(x_{beam} = 0)/dx_{beam} = 0$ ทำให้ได้แบบจำลองการโค้งตัวของแผ่นคานปลายอิสระเนื่องจากความเค้นภายในวัสดุดังสมการที่ (3-2)

$$z_{beam}(x_{beam}) = \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{12} \right) \cdot \frac{t_{beam}^2 w_{beam}}{(EI)_{equiv}} \cdot \frac{x_{beam}^2}{2} \quad (3-2)$$

เมื่อ z_{beam} คือระยะยกตัวของแผ่นคานปลายอิสระตามแนวความยาวคาน x_{beam} คือตำแหน่งตามความยาวของแผ่นคาน w_{beam} คือความกว้างของแผ่นคาน และ $(EI)_{equiv}$ คือ ความต้านแรงสมมูลของแผ่นคานที่เกิดจากการซ้อนทับชั้นวัสดุ 2 ชนิด

การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระเนื่องจากความเค้นภายในโครงสร้างด้วยการทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (normalization) เมื่อเทียบกับจุดปลายที่ถูกยึดที่ $x_{beam} = 0$ แสดงรูปที่ 3.5 (ก) โดยที่ระยะความสูงตามความยาวของแผ่นคานจะมากขึ้นเมื่อระยะความยาวคานเพิ่มขึ้นและเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1 ที่ออกแบบในกระบวนการสร้างมาคำนวณจะได้ผลเฉลยดังรูปที่ 3.5 (ข) และได้ระดับการโค้งตัวจากฐานรองสูงสุด $126.25 \mu\text{m}$ ที่ปลายแผ่นคาน โดยที่ค่าความเค้นของนิกิลและ SU-8 จะถูกประมาณค่าให้สอดคล้องกับความโค้งจริงของแผ่นคานที่ได้จากกระบวนการสร้างเพราะค่าความเค้นที่เกิดขึ้นไม่สามารถคำนวณหาได้ในทางทฤษฎีแต่จะมาจากการทดสอบ ผลเฉลยที่ได้ในรูปที่ 3.5 (ข) มาจากการประมาณค่าความเค้นของชั้น SU-8 เท่ากับ 90 MPa และค่าความเค้นของชั้นนิกิลเท่ากับ 100 MPa โดยการประมาณค่าความเค้นดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามพฤติกรรมการโค้งตัวของแผ่นคานที่ได้จากการสร้างโดยไม่พิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานโค้งปลายอิสระที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นภายใน สามารถสร้างได้จากคุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิแตกต่างกันและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างออกจากระนาบปกติในทิศทางบวก (โค้งตัวขึ้น) หรือในทิศทางลบ (โค้งตัวลง) สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการโค้งตัวของโครงสร้างนำเสนอโดย Timoshenko, (1925) และ Judy, Cho, Howe, and Pisano, (1991) โดยกำหนดสถานะเริ่มต้นของแผ่นคานอยู่ในระนาบปกติและมีความยาวคานเท่ากับ L_{beam} ดังรูปที่ 3.6 (ก) แผ่นคานประกอบด้วยชั้นวัสดุ 2 ชนิดที่มีความหนาของชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 เท่ากับ t_1 และ t_2 ตามลำดับ และมีความกว้างของแผ่นคานเท่ากับ w_{beam} ดังรูปที่ 3.6 (ข) ความเค้นคงค้างและสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิตั้งชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 เท่ากับ σ_1, α_1 และ σ_2, α_2 ตามลำดับ โดยทิศทางความเค้นที่แสดงในรูปที่ 3.6 (ค) กำหนดทิศทางที่แสดงทั้งหมดเป็นทิศทางบวกของความเค้นแรงดึง และถ้าพิจารณาในทิศตรงข้ามจะเป็นความเค้นแรงอัดที่เกิดขึ้น และรูปที่ 3.6 (ง) แสดงถึงแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 1 และ 2 เนื่องจากความเค้นคงค้างภายในชั้นวัสดุเป็น P_1, M_1 และ P_2, M_2 ตามลำดับ

Timoshenko นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงพฤติกรรมของตัวควบคุมอุณหภูมิ (thermostats) ซึ่งประกอบด้วยชั้นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิต่างกัน ซ้อนทับกัน 2 ชั้น ทำให้เกิดความเค้นภายในขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ส่งผลให้เกิดการโค้งตัวของแผ่นคานออกจากระนาบปกติ ความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นวัสดุประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบ ส่วนแรกคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ส่วนที่สองคือ แรงตามแกนของแผ่นคาน (P_{axis}) และส่วนที่สามคือ รัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน (ρ) ผลรวมของส่วนประกอบทั้ง 3 ในชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 แสดงดังสมการที่ (3-3)

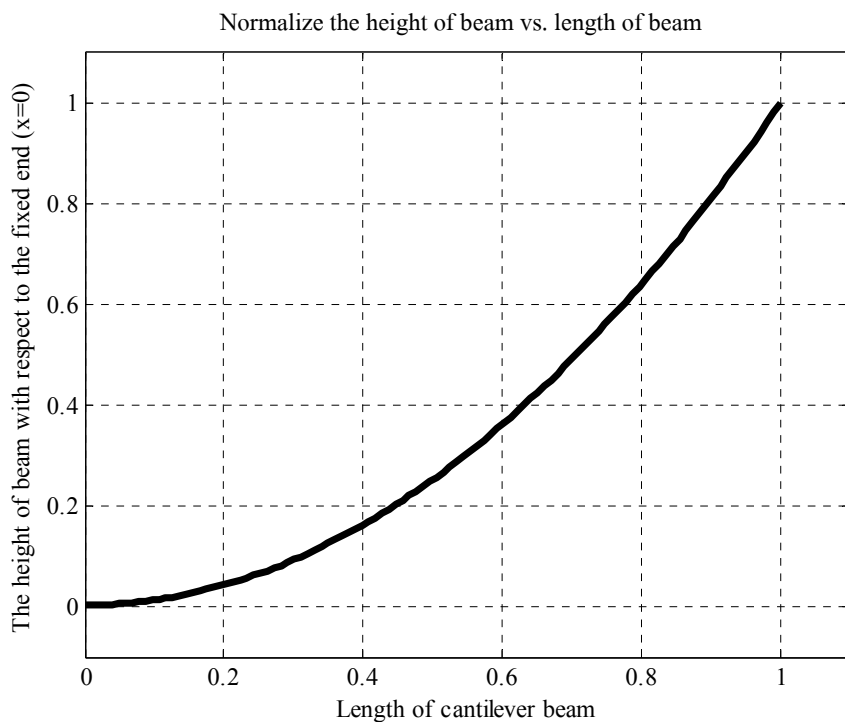
$$\alpha_1(\Delta T) + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w} + \frac{t_1}{2\rho} = \alpha_2(\Delta T) - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (3-3)$$

Judy นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานที่โค้งตัวออกจากระนาบปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุชั่วคราวเพื่อให้โครงสร้างเป็นอิสระ โดยมีเงื่อนไขว่าความชันระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุในสภาวะปกติเป็นศูนย์ โครงสร้างแผ่นคานประกอบด้วย การซ้อนทับกันของชั้นวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งความเค้นในแต่ละชั้นวัสดุประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบ ส่วนแรกคือ ความเค้นคงข้าง (σ_1 และ σ_2) ส่วนที่สองคือ แรงตามแกนของแผ่นคาน (P_{axis}) และส่วนที่สามคือ รัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน (ρ) ผลรวมของส่วนประกอบทั้ง 3 ในชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 แสดงดังสมการที่ (3-4) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแกนและรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานแสดงดังสมการที่ (3-5) และต่อมา Edmonds, *et al.*, (2004) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานโค้ง โดยการรวมความสัมพันธ์ของสมการ (3-3) และ (3-4) ซึ่งสามารถใช้ทำนายรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานในสภาวะเริ่มต้นซึ่งแสดงในพจน์ของความเค้นภายใน (σ) ค่ามอดูลัสของยัง (E) และขนาดของโครงสร้าง ดังสมการที่ (3-6) ซึ่งแสดงในรูปส่วนกลับของรัศมีส่วนโค้ง ดังสมการ (3-7) และในกรณีที่ระนาบของแผ่นคานในสภาวะเริ่มต้นไม่อยู่ในระนาบปกติหรือมีรัศมีส่วนโค้งเริ่มต้นอยู่ก่อน (ρ_0) สามารถหารัศมีส่วนโค้งที่เปลี่ยนไปดังสมการที่ (3-8)

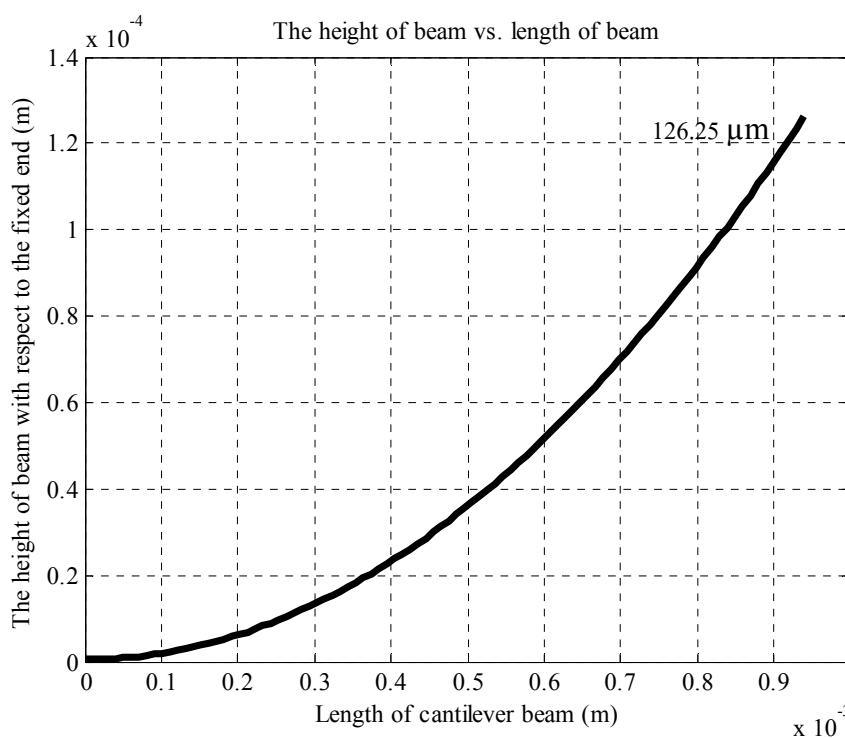
$$\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w_{beam}} + \frac{t_1}{2\rho} = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (3-4)$$

$$P_{axis} = \frac{2(M_1 + M_2)}{t_{beam}} = \frac{2}{\rho \cdot t_{beam}} (E_1 I_1 + E_2 I_2) \quad (3-5)$$

$$\alpha_1(\Delta T) + \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w_{beam}} + \frac{t_1}{2\rho} = \alpha_2(\Delta T) + \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (3-6)$$

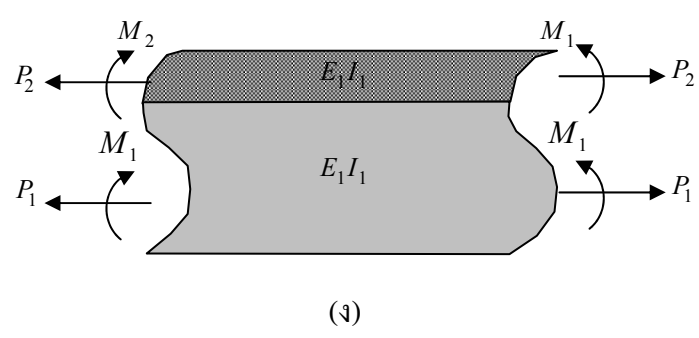
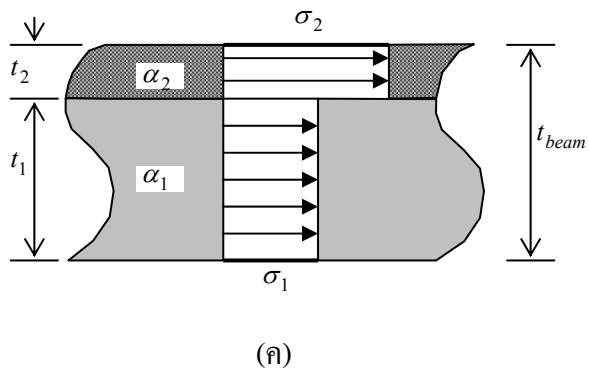
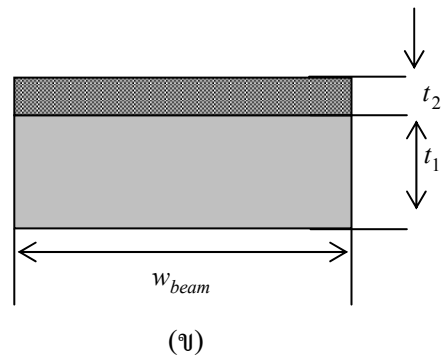
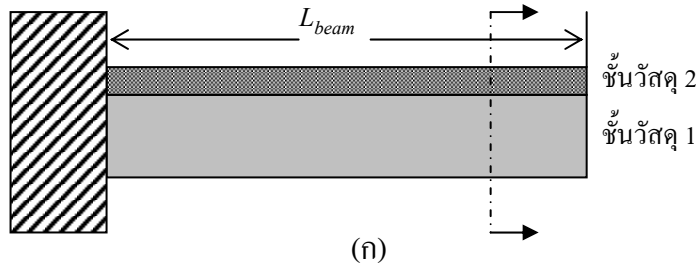


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ (ก) ผลเฉลยที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (ข) ผลเฉลยจากโครงสร้างที่ออกแบบในกระบวนการสร้าง



■ ชั้นวัสดุ 1 ■ ชั้นวัสดุ 2

รูปที่ 3.6 โครงสร้างและแรงกระทำกับชั้นวัสดุของแผ่นคาน (ก) โครงสร้างของแผ่นคานด้านข้าง (ข) ภาคตัดขวางด้านหน้า (ค) การกระจายความเค้นภายใน (ง) แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับชั้นวัสดุ

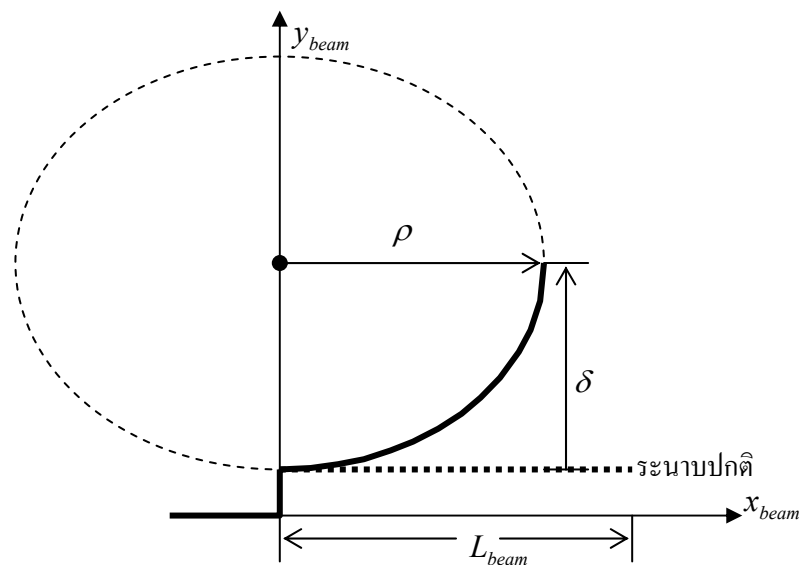
$$\frac{1}{\rho} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T - \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}}{\frac{t_{beam}}{2} + \frac{E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3}{6t_{beam}} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \quad (3-7)$$

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T - \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}}{\frac{t_{beam}}{2} + \frac{E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3}{6t_{beam}} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \quad (3-8)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ระยะยกตัวที่ปลายแผ่นคาน และระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคาน ไปจากสภาวะเดิมตามความยาวคาน สามารถคำนวณได้จากสมการ (3-9) (Mu, 2003) และ (3-10) (Mosolf, 2003) ตามลำดับ โดยแสดงรูปแบบทางเรขาคณิตที่แสดงพฤติกรรมของแผ่นคาน โค้งดังรูปที่ 3.7

$$\delta = \rho \left(1 - \cos \frac{L_{beam}}{\rho} \right) \quad (3-9)$$

$$c(x_{beam}) = \frac{x_{beam}^2}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (3-10)$$



รูปที่ 3.7 รูปแบบทางเรขาคณิตที่ใช้แสดงพฤติกรรมของแผ่นคาน โค้ง

ผลการจำลองสถานการณ์เพื่อหาระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานที่เปลี่ยนไปจากสภาวะเดิม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 (ก) โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้นของแผ่นคานอยู่ในระนาบปกติก่อนการสกัดชิ้นวัสดุชั่วคราว ภายหลังการปลดปล่อยโครงสร้าง แผ่นคานจะโค้งตัวขึ้นแม้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเลยก็ตามเพราะผลจากความเค้นภายในชิ้นวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้าง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (หรือค่าอุณหภูมิลดลง) แผ่นคานจะโค้งตัวมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิของวัสดุ โดยที่ผลเฉลยของระยะเคลื่อนที่และความยาวแผ่นคานจะแสดงเป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับระยะเคลื่อนที่สูงที่สุด เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบสำหรับกระบวนการสร้างจากตารางที่ 3.1 มาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองจะได้ผลเฉลยของระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานดังรูปที่ 3.8 (ข) โดยการประมาณค่าความเค้นภายในชิ้นวัสดุ SU-8 และ โลหะนิกเกิลเท่ากับ 0.9 MPa และ 1.0 MPa ตามลำดับ โดยมีระยะยกตัวจากระนาบปกติ $4.2 \mu\text{m}$ ที่ปลายของแผ่นคานในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับขั้นตอนการสกัดชิ้นวัสดุกันในสารละลาย โดยแผ่นคานจะโค้งตัวขึ้นเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย และภายหลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการล้างชิ้นงานด้วยน้ำบริสุทธิ์ โดยในกระบวนการช่วงนี้อุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการสกัดชิ้นวัสดุชั่วคราว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับโครงสร้างของแผ่นคาน ระดับการโค้งตัวของแผ่นคานปลายอิสระที่แสดงในรูปที่ 3.8 (ข) จะกำหนดช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงละ 2 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ความหนาของแผ่นคานก็เป็นตัวแปรกำหนดระดับความสูงและรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานให้มากขึ้นหรือลดลงได้เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มความหนาของชิ้นวัสดุ นิกเกิล (หรือชิ้นวัสดุ 2) ทำให้ความหนารวมของแผ่นคานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความโค้งของแผ่นคานลดลงหรือมีรัศมีส่วนโค้งมากขึ้น ดังรูปที่ 3.9 (ข) สำหรับกระบวนการเพิ่มความหนาให้กับแผ่นคานนั้นจะควบคุมผ่านความหนาของชั้นนิกเกิลที่เป็นโลหะตัวนำไฟฟ้าทางด้านบนของแผ่นปิดด้วยวิธีการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า โดยมีระยะเวลาที่ใช้และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่เป็นปัจจัยหลักในการกำหนดค่าความหนาของชั้นนิกเกิล

3.3 แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน

ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานปลายอิสระมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนตัวเก็บประจุ รูปที่ 3.10 (ก) ที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนานและมีชั้นไดอิเล็กทริกคือชิ้นวัสดุ SU-8 และอากาศว่างกั้นระหว่างตัวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.10 (ข) ในการวิเคราะห์นี้ ค่าความจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าภายนอกแผ่นสมมติเป็นศูนย์ไม่พิจารณาและการสัมผัสระหว่างชิ้นวัสดุถือว่าสมบูรณ์ ในระบบนี้สมมติด้วยว่าโครงสร้างตัวเก็บประจுவางอยู่ในสุญญากาศ ปราศจากแรงทางกลจาก

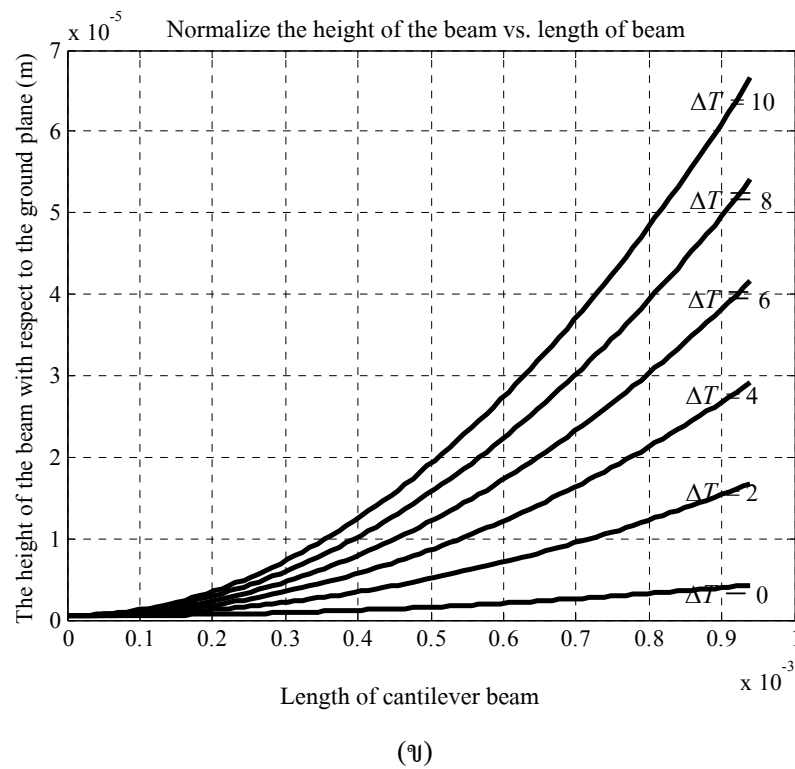
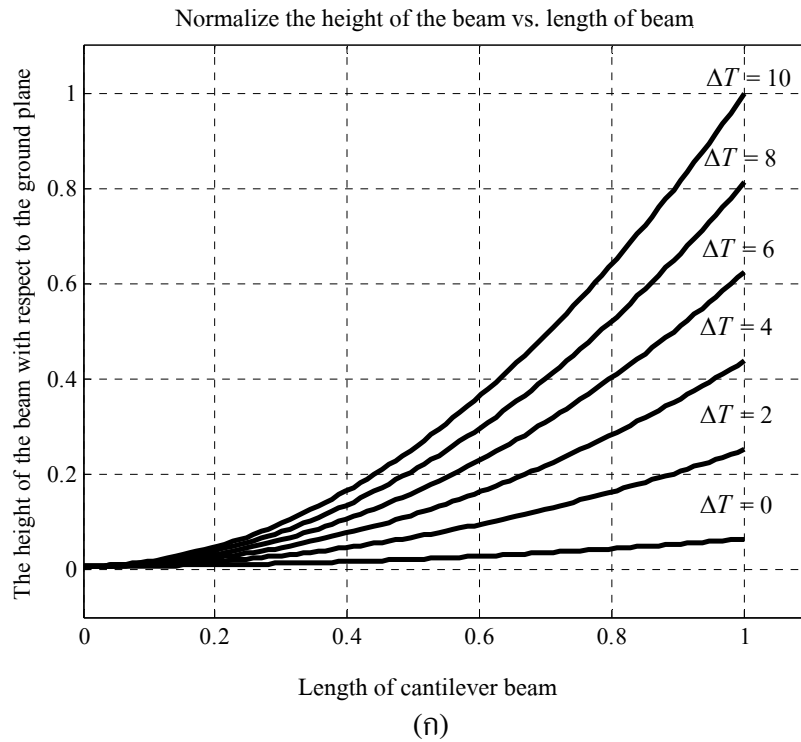
ภายนอกมากระทำกับตัวนำไฟฟ้าด้านบน รวมทั้งสมมติให้แรงดึงดูดของแผ่นคานเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะเคลื่อนที่ เมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิต (F_e) ขึ้น แผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนซึ่งถูกแขวนลอยในอากาศด้วยโครงสร้างที่มีค่าความแข็งแรงคงที่เคลื่อนที่ลงมาตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทาง z การหาแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากการพิจารณาประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ (Senturia, 2001) โดยค่าความจุไฟฟ้ามีอยู่ 2 ส่วนคือ ค่าความจุไฟฟ้าแปรค่าได้ ซึ่งเกิดจากช่องอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำด้านบน และค่าความจุไฟฟ้าคงที่ ซึ่งเกิดจากชั้นไดอิเล็กทริก ซึ่งเมื่อนำค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวเก็บประจุมาคำนวณแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าจะแสดงได้ดังสมการ (3-11)

$$F_e = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(g + d/\epsilon_r)^2} \quad (3-11)$$

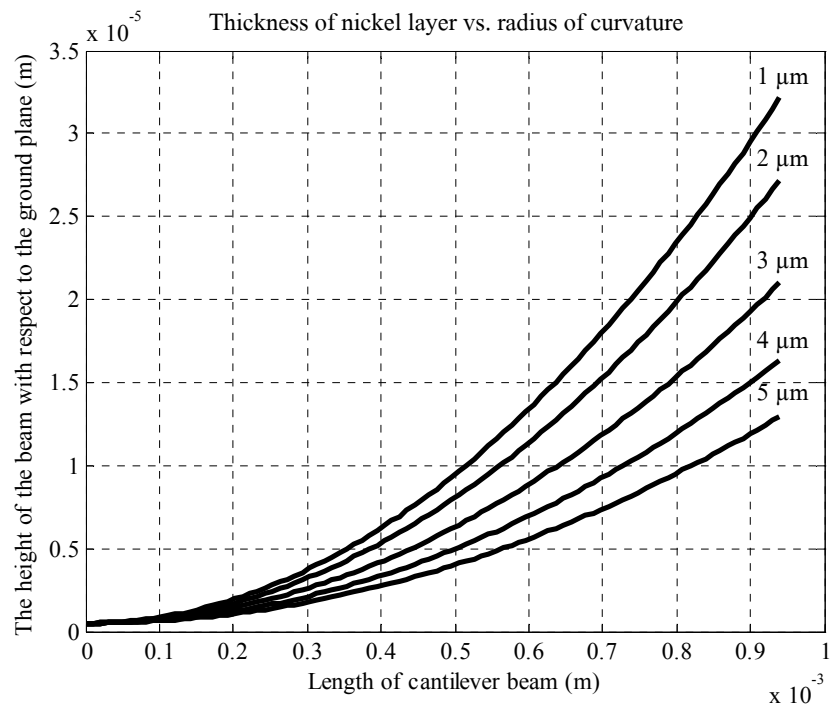
เมื่อ F_e คือ แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมสัมบูรณ์ (8.85×10^{-12} F/m) ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กทริก A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่ขนานกัน V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างตัวเก็บประจุ g คือ ระยะช่องอากาศระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า และ d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก

สำหรับแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงดูดหรือแรงทางกลของแผ่นคาน (F_s) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนดังสมการ (3-12) โดยที่ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน z อยู่ฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแผ่น g ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3-13) และเมื่อจัดรูปสมการจะได้สมการพหุนามกำลัง 3 ดังสมการที่ (3-14) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน โครงสร้างแผ่นคานที่ไม่มีการเบี่ยงเบนออกจากระนาบปกติได้ดังรูปที่ 3.11 และไม่พิจารณาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ($d = 0$) ผลเฉลยที่ได้จากสมการ (3-14) จะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในสภาวะเริ่มต้น (g_0) และค่าความต่างศักย์เริ่มต้น $V(z = 0)$ โดยที่ผลเฉลยจะมีอยู่ 3 คำตอบในระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยชุดผลเฉลยในช่วงเสถียรภาพ (stable) ผลเฉลยในช่วงขาดเสถียรภาพ (unstable) และผลเฉลยในช่วงที่เป็นไปไม่ได้ในระบบที่กำลังพิจารณา (infeasible)

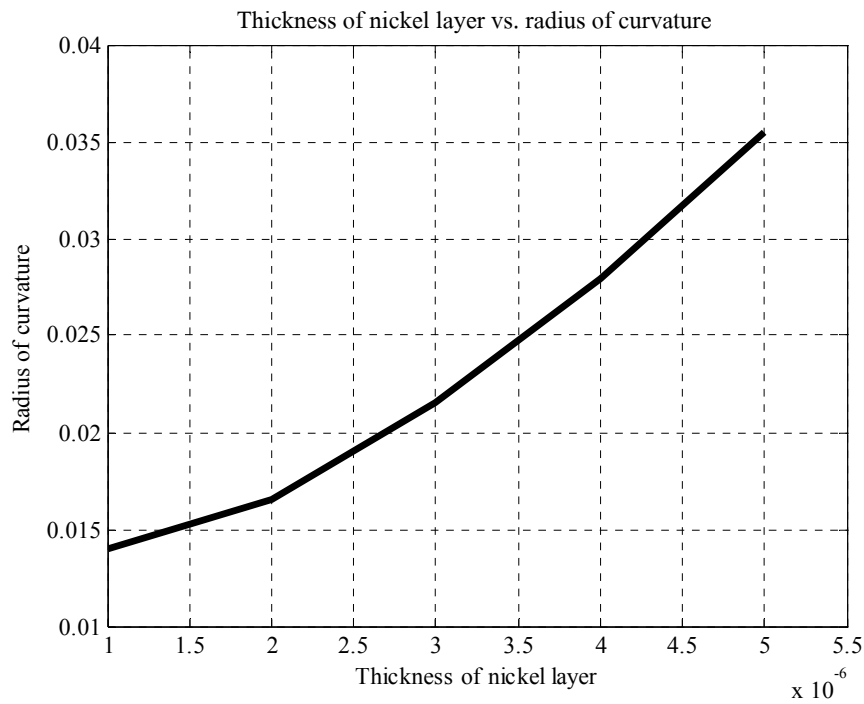
สำหรับแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงดูดหรือแรงทางกลของแผ่นคาน (F_s) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนดังสมการ (3-12) โดยที่ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน z อยู่ฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแผ่น



รูปที่ 3.8 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระ เนื่องจากความเค้นภายใน และการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (ก) ผลเฉลยที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (ข) ผลเฉลยจากโครงสร้างที่ออกแบบในกระบวนการสร้าง



(ก)

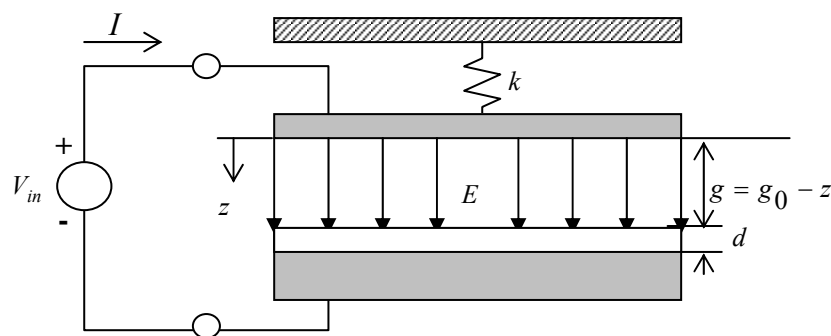


(ข)

รูปที่ 3.9 ผลจากการเปลี่ยนความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล (ก) ระดับความโค้งของแผ่นคานที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล (ข) การเปลี่ยนแปลงรัศมีส่วนโค้งเมื่อความหนาของชั้นโลหะนิกเกิลเพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)

■ นิกเกิล □ SU-8 ▨ โครเมียม/ทองแดง

รูปที่ 3.10 แบบจำลอง 1 มิติของแผ่นคานปลายอิสระ (ก) โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระในระนาบปกติ (ข) โครงสร้างแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนาน

ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3-13) และเมื่อจัดรูปสมการจะได้สมการพหุนามกำลัง 3 ดังสมการที่ (3-14) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนของโครงสร้างแผ่นคานที่ไม่มีการเบี่ยงเบนออกจากระนาบปกติได้ดังรูปที่ 3.11 และไม่พิจารณาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ($d = 0$) ผลเฉลยที่ได้จากสมการ (3-14) จะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในสถานะเริ่มต้น (g_0) และค่าความต่างศักย์เริ่มต้น $V(z = 0)$ โดยที่ผลเฉลยจะมีอยู่ 3 คำตอบในระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยชุดผลเฉลยในช่วงเสถียรภาพ (stable) ผลเฉลยในช่วงขาดเสถียรภาพ (unstable) และผลเฉลยในช่วงที่เป็นไปไม่ได้ในระบบที่กำลังพิจารณา (infeasible)

$$z = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2k(g + d/\epsilon_r)^2} \tag{3-12}$$

เมื่อ k คือ ค่าความแข็งดึงของโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระ ($k = 48(EI)_{equiv}/L^3$) (Fedder, 1994)

$$g = g_0 - z = g_0 - \frac{\varepsilon_0 AV^2}{2k(g + d/\varepsilon_r)^2} \quad (3-13)$$

$$z^3 - 2\left(g_0 + \frac{d}{\varepsilon_r}\right)z^2 + \left(g_0^2 + 2g_0 \frac{d}{\varepsilon_r} + \frac{d^2}{\varepsilon_r^2}\right)z - \frac{\varepsilon_0 AV^2}{2k} = 0 \quad (3-14)$$

ผลเฉลยในช่วงเสถียรภาพ คือช่วงเคลื่อนที่ลงของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในช่วง $0 - 0.33$ ของระยะห่างทั้งหมด เป็นช่วงที่สามารถควบคุมพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิดได้ตามขนาดอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในทางกายภาพสามารถอธิบายได้ว่า เป็นช่วงที่แรงทางกลหรือแรงจากค่าความแข็งดึงจากโครงสร้างแผ่นปิดมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า โดยที่แรงทั้ง 2 จะมีขนาดเท่ากันที่ระยะเสถียรภาพสุดท้ายที่ 0.33 ของระยะห่างทั้งหมด ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าแนบติด (V_{PI}) เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของแผ่นปิดเพื่อข้ามเข้าไปสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นช่วงที่อินพุตไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมหรือการควบคุมใดๆต่อแผ่นปิด และถูกใช้เป็นตัวกำหนดจุดทำงานของตัวเข้ารหัสหลายรูปแบบ

ผลเฉลยในช่วงขาดเสถียรภาพ คือระยะประมาณ 2 ใน 3 ของระยะห่างทั้งหมดภายหลังช่วงเสถียรภาพ เป็นช่วงที่ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดได้ ซึ่งในทางกายภาพจะเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงทางกลของแผ่นปิดเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตจะมีค่ามากที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำที่มีค่าน้อยๆ ตามสมการ (3-11) ส่งผลให้แผ่นปิดเคลื่อนตัวลงมาแนบติดกับฐานในทันที (snap-down หรือ pull-in) และจะไม่กลับเข้าสู่ช่วงเสถียรภาพถ้าไม่ลดระดับอินพุตระหว่างแผ่นตัวนำ

และผลเฉลยในช่วงสุดท้ายคือช่วงที่เป็นไปไม่ได้ในระบบที่กำลังพิจารณา คือค่าการเคลื่อนที่ที่อยู่นอกขอบเขตของระยะห่างทั้งหมดระหว่างแผ่นตัวนำ ซึ่งไม่ได้ระบุถึงพฤติกรรมใดๆของแผ่นปิด

ระยะเคลื่อนที่สุดท้ายก่อนเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ สามารถหาได้จาก 2 เงื่อนไข เงื่อนไขแรกคือ แรงสุทธิที่กระทำต่อแผ่นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและฐานต้องเท่ากับศูนย์ และเงื่อนไขที่สองคืออนุพันธ์ของแรงสุทธิระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและฐานต้องเท่ากับศูนย์เช่นกัน (Senturia, 2001) ดังนั้นระยะเคลื่อนที่ลงของแผ่นปิดก่อนการเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-15) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดเริ่มเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพหรือแรงดันแนบติดจะสอดคล้องกับระยะเคลื่อนที่สุดท้ายซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (3-16)

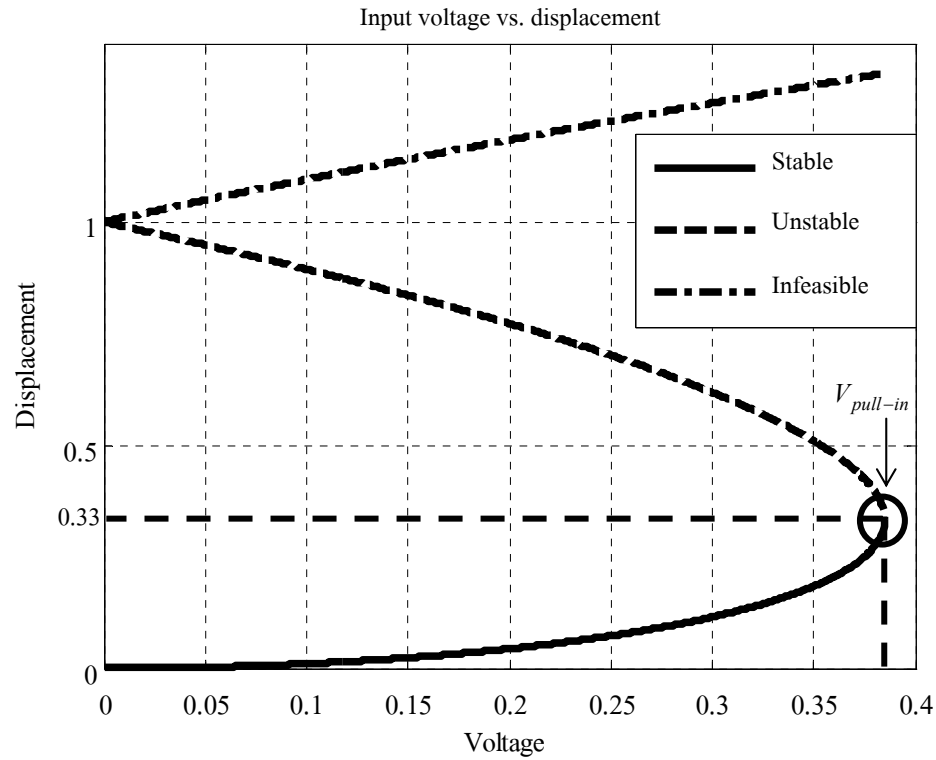
$$z = \frac{g_o}{3} + \frac{d}{3\epsilon_r} \quad (3-15)$$

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8k}{27\epsilon_0 A} \left(g_o + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^3} \quad (3-16)$$

ผลการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อกำหนดความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกเปลี่ยนไปแสดงดังรูปที่ 3.12 โดยผลเฉลยที่ได้จะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำในสถานะเริ่มต้น g_0 และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น $V(z=0)$ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการดึงแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพหรือการดึงแผ่นปิดลงมาแนบติดกับฐาน จะมีค่าแปรผันตรงกับความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกและระยะสุดท้ายของการเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นเดียวกัน เมื่อนำโครงสร้างไมโครวาล์วที่ออกแบบในตารางที่ 3.1 มาทำนายระยะเคลื่อนที่ภายในช่องอากาศก่อนจะเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ และถูกดึงลงมาแนบติดกับชั้นไดอิเล็กทริกได้ดังรูปที่ 3.13 โดยได้ระยะเคลื่อนที่สุดท้ายเท่ากับ 0.36 ไมโครเมตรที่แรงดันแนบติดเท่ากับ 0.85 โวลต์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมาก เนื่องจากระยะห่างมีค่าน้อยและการกำหนดให้แผ่นปิดอยู่ในระนาบปกติขนานกับฐานรองจะมีพื้นที่มาก ดังนั้นแรงไฟฟ้าสถิตจะสูงตามไปด้วย แต่ในโครงสร้างจริงระนาบของแผ่นปิดจะมีการโค้งงอขึ้น การวิเคราะห์หาแรงดันแนบติดด้วยวิธีการนี้จะให้ผลที่คลาดเคลื่อนมาก

การวิเคราะห์หาแรงดันแนบติดสำหรับโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระที่มีการโค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติสามารถพิจารณาได้จากสมการของ Haji-Babaei สมการที่ (3-17) ที่นำเสนอเพื่อคำนวณกับโครงสร้างแผ่นคานที่มีออกไซด์เป็นโครงสร้างหลักของแผ่นปิดและชั้นโลหะโครเมียมเป็นตัวนำไฟฟ้าด้านบนดังรูปที่ 3.14 การคำนวณจะนำรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานและความยาวของแผ่นคานช่วงที่มีระนาบเดียวกับฐานรองมาเป็นค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในข้างต้นเป็นสมการหาแรงดันแนบติดรูปแบบปิด (a close form model for the pull-in voltage) ซึ่งใช้หลักการแทนค่าทางพารามิเตอร์ของโครงสร้างและคุณสมบัติของชั้นวัสดุ ทำให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิดได้

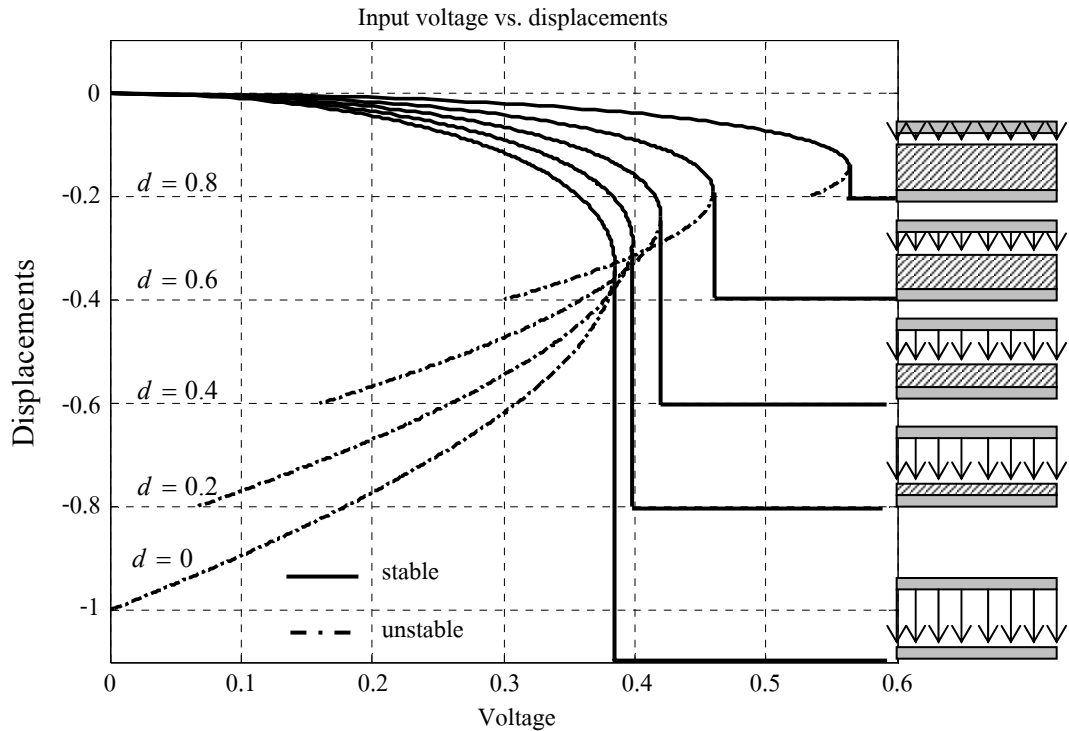
พฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิด จะเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แผ่นคานก็จะเคลื่อนที่ลงมามากเท่าใดนั้นจะขึ้นกับค่าความแข็งดึงของโครงสร้างดังนั้นแบบจำลองที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของแผ่นคานจะเป็นแบบจำลองคู่ควบกลไฟฟ้า (electromechanical model) ประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานโค้งและแรงไฟฟ้าสถิต ซึ่งสัมพันธ์กันผ่านสมการอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้างแผ่นคาน เนื่องจากมี



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อไม่พิจารณาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก โดยทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{Et^3}{12\rho^2} \left(\frac{t_g}{\epsilon_g} + \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right) \frac{l \cdot w_{beam}}{A}} \quad (3-17)$$

- เมื่อ t คือความหนาของแผ่นคาน
 ρ คือรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน
 E คือค่ามอดูลัสของยังของแผ่นคานหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
 t_{ox} คือความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
 ϵ_{ox} คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
 t_g คือความสูงของแผ่นปิดจากฐานรองในระนาบปกติ
 ϵ_g คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของอากาศ
 l คือความยาวส่วนแผ่นคานที่วางตัวขนานกับระนาบปกติ
 w_{beam} คือความกว้างของคาน
 A คือพื้นที่ของตัวนำไฟฟ้าด้านล่างที่ขนานกับแผ่นคาน



รูปที่ 3.12 การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน เมื่อความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกเปลี่ยนไป โดยการทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้ามีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวของแผ่นคาน ดังนั้นจึงสมมติว่าสนามไฟฟ้ามีการกระจายแบบ 1 มิติ และเมื่อให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง จะเกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นที่มีขนาดเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำยกกำลัง 2 นั่นคือแรงไฟฟ้าสถิตจะขึ้นกับระยะเคลื่อนที่ของแผ่นปิด ซึ่งนำไปสู่พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือการเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ สำหรับการเบนสถิตของแผ่นคาน $z(x)$ เนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิต $F_e(x, V)$ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับ 4 (Osterberg, 1997) ซึ่งพิจารณาในโครงสร้างที่ไม่มีชั้นไดอิเล็กทริก และมีชั้นไดอิเล็กทริกเป็นระยะต่อหน่วยความยาวหนึ่ง หน่วย ดังสมการ (3-18) และ (3-19) ตามลำดับ โดยพจน์แรกทางด้านขวามือของสมการ (3-18) คือแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุเมื่อไม่พิจารณาสนามไฟฟ้าบริเวณขอบ (fringing-field) ส่วนพจน์ที่สองคือการชดเชยแรงไฟฟ้าสถิตเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบ

$$(EI)_{equiv} \frac{d^4 z}{dx^4} = -\frac{\epsilon_0 w_{beam} V^2}{2g^2} \left(1 + 0.65 \frac{g}{w_{beam}} \right) \quad (3-18)$$

$$(EI)_{equiv} \frac{d^4 z}{dx^4} = -\frac{\epsilon_0 w_{beam} V^2}{2(g + d/\epsilon_r)^2} \left(1 + 0.65 \frac{(g + d/\epsilon_r)}{w_{beam}} \right) \quad (3-19)$$

เมื่อ $(EI)_{equiv}$ คือ ค่าความแข็งดิ่งสมมูลของโครงสร้าง

w_{beam} คือ ความกว้างของแผ่นคาน

g คือ ระยะช่องอากาศระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า

V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า

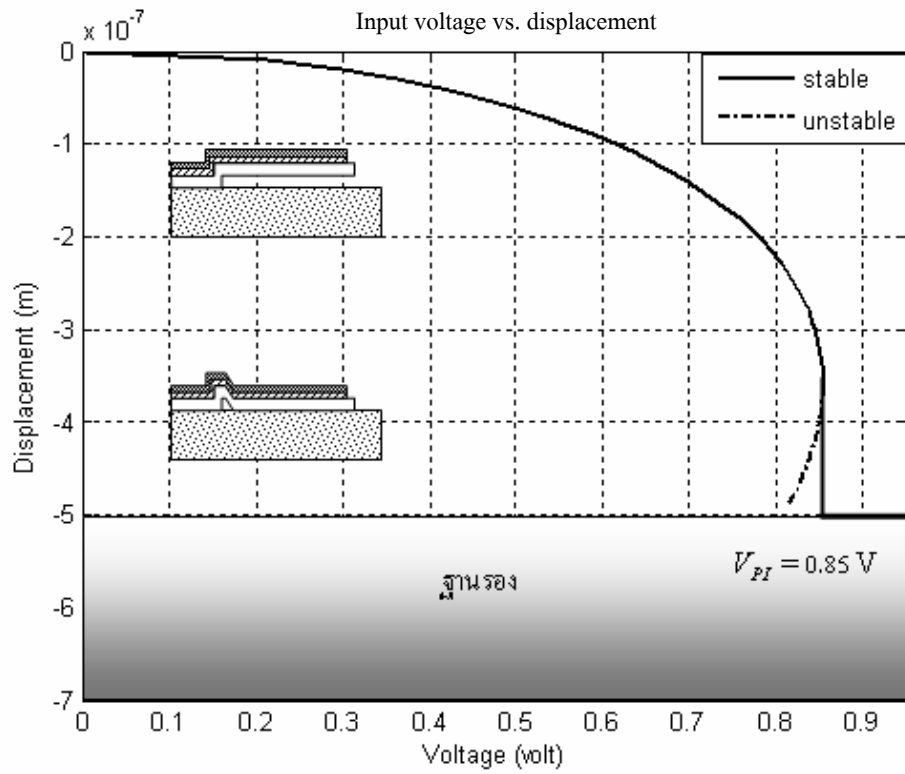
z คือ ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานตามทิศของสนามไฟฟ้า

x คือ ตำแหน่งตามระยะความยาวของแผ่นคาน

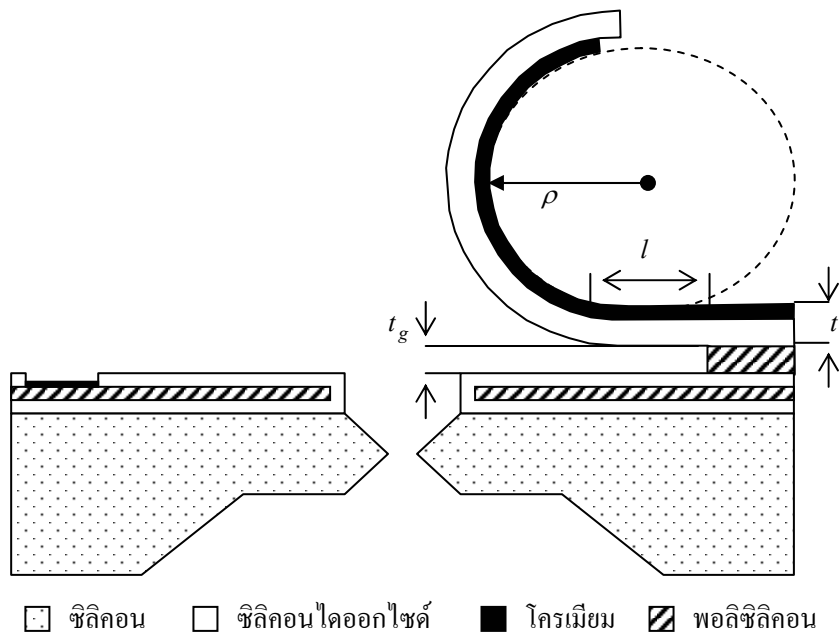
ผลการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของแผ่นคาน โค้งปลายอิสระโดยใช้ค่าที่ออกแบบในกระบวนการสร้างดังตารางที่ 3.1 เมื่อกำหนดให้ระยะยกตัวเริ่มต้นที่ปลายแผ่นคานอิสระสูงจากฐานรองเท่ากับ 122 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.15 (ก) ซึ่งเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าแผ่นปิดจะถูกดึงลงมาด้วยแรงไฟฟ้าสถิตจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ แผ่นปิดจะถูกดึงลงมาแนบติดกับฐานรองที่แรงดันแนบติดเท่ากับ 75 โวลต์ โดยในช่วงแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นแผ่นปิดจะเคลื่อนที่ลงมาช้ามากจนกระทั่งเหลือระยะช่องอากาศประมาณ 90 ไมโครเมตร แผ่นปิดจะเคลื่อนที่ลงมาแนบติดกับฐานรองในฉับพลันดังรูปที่ 3.15 (ข) เมื่อนำสมการที่ (3-17) มาคำนวณหาแรงดันแนบติดของโครงสร้างโดยประมาณรัศมีส่วนโค้งเท่ากับ 300 μm และมีชั้นไดอิเล็กทริกคือ SU-8 จะได้แรงดันแนบติดเท่ากับ 16.5 โวลต์ ซึ่งแตกต่างกันมาก สาเหตุเนื่องจากแบบจำลองคู่ควบ-ไฟฟ้าเป็นแบบจำลอง 1 มิติ จึงไม่มีการประมาณรัศมีส่วนโค้ง แต่จะพิจารณาเฉพาะระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองเท่านั้น ส่วนแบบจำลองในสมการ (3-17) จะคิดรัศมีส่วนโค้งที่เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นปิดซึ่งแบบจำลองคู่ควบไม่สามารถจำลองพฤติกรรมในส่วนนั้นได้ ดังนั้นการใช้งานจึงต้องพิจารณาโครงสร้างจากกระบวนการสร้างจริงเป็นตัวเปรียบเทียบเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด

3.4 การออกแบบช่องทางเดินแก๊ส

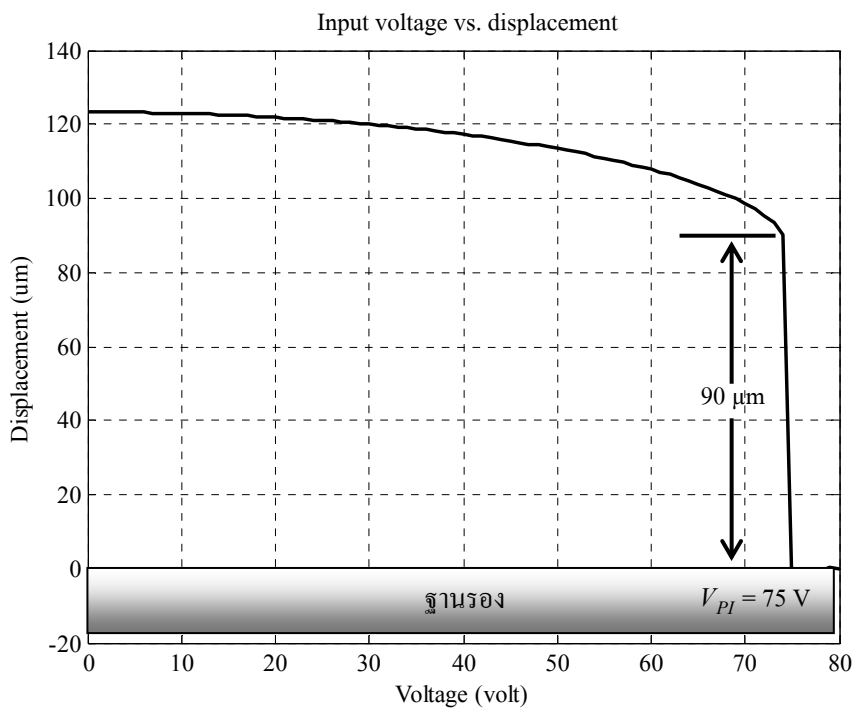
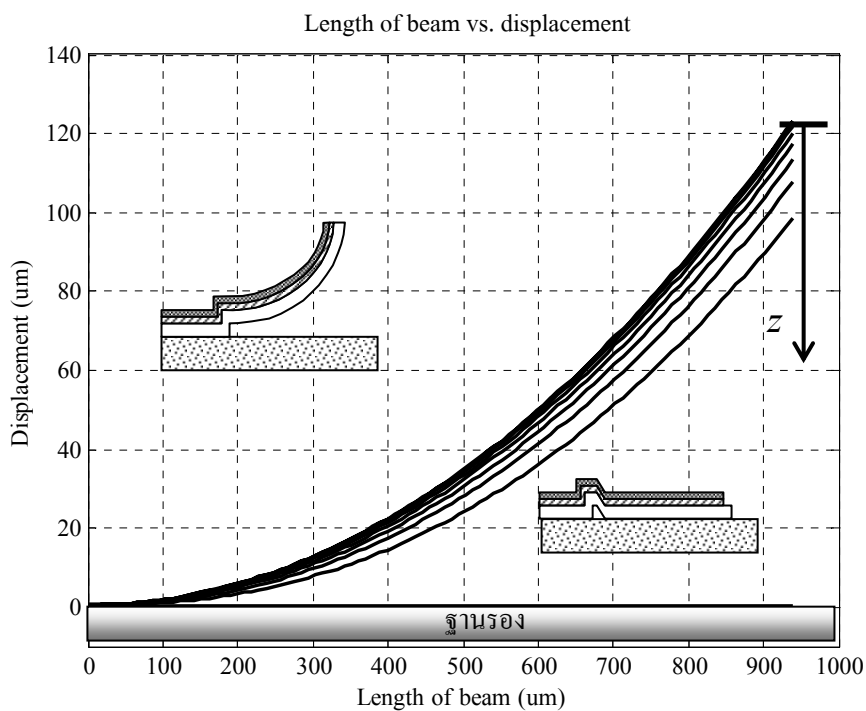
ขนาดของช่องทางเดินแก๊สจะเป็นรูสี่เหลี่ยมมีลักษณะเป็นท่อสอบเข้าแบบขั้นบันได ซึ่งทะลุผ่านฐานจากด้านล่างขึ้นมาด้านบนแสดงดังรูปที่ 3.16 โดยใช้ชั้นโลหะ निकิลเป็นวัสดุฐานรองและในขณะที่เดียวกันจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านล่างให้กับไมโครวาล์ว พื้นที่ช่องแก๊สด้านบนจะมีผลต่อแรงดันแก๊สที่กระทำต่อแผ่นปิด และส่งผลถึงพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนการทำงานของไมโครวาล์ว นั่นคือ อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของพื้นที่เปิดด้านบนของช่องทางเดินแก๊ส ทำให้มีแรงดันแก๊สเพิ่มขึ้น และต้องใช้พลังงานขับเคลื่อนแผ่นปิดสูงตามไปด้วย ในทำนองเดียวกัน การที่พื้นที่



รูปที่ 3.13 การเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนของแผ่นคานขนาดที่ออกแบบในกระบวนการสร้างเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงแรงดันแนบติด



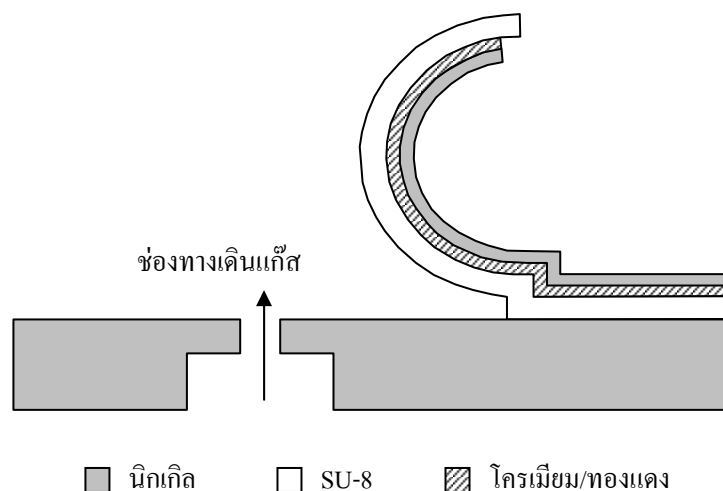
รูปที่ 3.14 ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระของ Hajji-Babaei



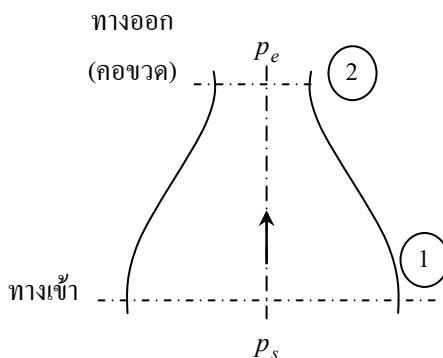
รูปที่ 3.15 ผลเฉลยแบบจำลองคู่ควบกล-ไฟฟ้าเมื่อกำหนดสภาวะโค้งเริ่มต้นให้กับแผ่นคาน (ก) การเคลื่อนที่ของแผ่นคานเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันแนบติด (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของปลายแผ่นคาน โค้งปลายอิสระ

เปิดด้านบนของช่องทางเดินแก๊สเล็กกลางจะส่งผลให้มีอัตราการไหลต่ำและมีแรงกระทำต่อแผ่นปิดน้อย ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการขับเร้าจึงลดลงตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบช่องทางเดินของของไหลจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณการสูญเสียที่เกิดขึ้น และอัตราการไหลของมวลภายใต้เงื่อนไขการใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ขนาดรูเปิดของช่องทางเดินแก๊สมีขนาดไม่เกิน $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นขนาดช่องเปิดสำหรับไมโครวาล์วที่ใช้สำหรับกระตุ้นการแสดงผลของจุดอักษรเบรลล์ (Yobas, 2003) ที่มีความต่างระหว่างแรงดันแก๊สภายในและภายนอก 27.6 kPa ในการดันชั้นผิวยึดหยุ่นของจุดเบรลล์ แม้ว่าพื้นที่เปิดของช่องทางเดินแก๊สจะมีขนาดเล็กและให้อัตราการไหลของมวลต่ำ แต่จะมีพื้นที่ประกบระหว่างแผ่นปิดและฐานในสภาวะปิดช่องทางเดินแก๊สมากซึ่งจะป้องกันการรั่วไหลได้เป็นอย่างดี

โครงสร้างของช่องทางเดินแก๊สได้ถูกออกแบบไว้ให้ช่องทางเข้ามีพื้นที่มากกว่าช่องทางออกหรือท่อสอบเข้า ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อสอบเข้าดังรูปที่ 3.17 โดยกำหนดให้แก๊สเป็นของไหลแบบอัดตัวได้ และมีอัตราการไหลของมวลแก๊สใน 1 มิติคงที่ มีกระแสการไหลผ่านท่อในสภาวะต่อเนื่อง ในการคำนวณอัตราการไหลของมวลจำเป็นต้องกำหนดก่อนว่าการไหลออกของแก๊สที่ปากมีความเร็วเท่ากับเสียง (sonic) หรือมีความเร็วน้อยกว่าเสียง (subsonic) ในขณะที่อัตราส่วนแรงดันแก๊สออกและเข้า (p_e/p_s) ถูกสมมติให้สม่ำเสมอตลอดช่วงซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าวิกฤตคือ $(2/(\gamma + 1))^{\frac{\gamma}{\gamma + 1}}$ (สำหรับอากาศมีค่า 0.528) สมมติว่ากระแสการไหลของแก๊สเป็นแบบอัดตัวได้และมวลไหลผ่านรูสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถประมาณได้ด้วยสมการของรูกลม (Wilcock, 1967) และการพิจารณาอัตราการไหลของมวลจะใช้ค่าวิกฤตเป็นตัวกำหนดการไหลว่าสัมพันธ์กับรูปแบบใด (Roberson, 1994)



รูปที่ 3.16 ช่องทางเดินแก๊สของไมโครวาล์ว



รูปที่ 3.17 การไหลของของไหลแบบอัดตัวได้ผ่านท่อที่สอบเข้า

ถ้า $(p_e/p_s) < (2/(\gamma+1))^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ การไหลออกเป็น sonic อัตราการไหลของมวลคำนวณด้วยสมการที่ (3-20) และถ้า $(p_e/p_s) > (2/(\gamma+1))^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ การไหลออกเป็น subsonic อัตราการไหลของมวลคำนวณด้วยสมการ (3-21)

$$\dot{m} = C_i A_o p_s \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3-20)$$

$$\dot{m} = C_i A_o p_s \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT} \left[\left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (3-21)$$

เมื่อ m_o คือ อัตราการไหลของมวลแก๊สผ่านช่องทางเดินแก๊ส

C_i คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (discharge coefficient)

A_o คือ พื้นที่ทางออกของแก๊ส

p_s คือ แรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายก่อนเข้าช่องทางเดินแก๊ส

p_e คือ แรงดันสัมบูรณ์ที่ทางออกช่องทางเดินแก๊ส

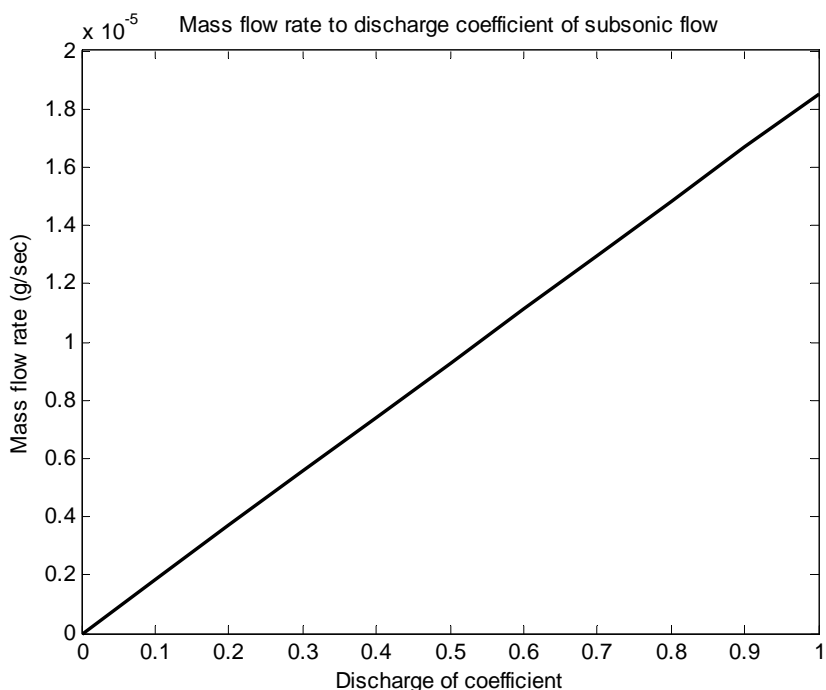
γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (อากาศเท่ากับ 1.4)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สสัมพัทธ์ต่อน้ำหนักโมเลกุล (อากาศเท่ากับ 0.287 J/g-K)

T คือ อุณหภูมิห้อง (K)

จากแบบจำลองข้างต้น สัมประสิทธิ์การสูญเสีย C_i เป็นผลของการสูญเสียแรงดันแก๊สที่ไม่

สามารถคำนวณได้อย่างแน่ชัด ตามนิยามสัมประสิทธิ์การสูญเสียคืออัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลจากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งค่าทางทฤษฎีจะมากกว่าจากการทดลองเสมอ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของช่องทางเดินแก๊ส รูปแบบการจับเร้าและแรงดันแก๊สของไมโครวาล์ว สัมประสิทธิ์การสูญเสียจะแปรผันตรงต่ออัตราการไหลของมวลดังรูปที่ 3.18 ถ้าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่าต่ำจะทำให้อัตราการไหลของมวลต่ำตามไปด้วย ในขณะที่อัตราการไหลของมวลจะใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีถ้าอัตราการไหลจากการทดลองมีค่าสูง



รูปที่ 3.18 การแปรผันตรงของสัมประสิทธิ์การสูญเสียและอัตราการไหลของมวลแก๊ส

เนื่องจากขนาดทางออกของช่องทางเดินแก๊สมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นปิด จึงสมมติพฤติกรรมของแผ่นปิดในสถานะใกล้เคียงกับฐานมีการวางระนาบของแผ่นปิดขนานสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นกับฐานและให้แผ่นปิดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ปราศจากการโค้งตัวจากแรงกระทำภายนอกดังรูปที่ 3.19 เมื่อการไหลของแก๊สเกิดขึ้นในท่อสู่เข้าของช่องทางเดินแก๊สของไมโครวาล์ว ผลของระยะห่างระหว่างแผ่นปิดและระนาบช่องทางออกของแก๊สหรือความสูงของแผ่นปิด จะมีผลต่ออัตราการไหลของมวลแก๊ส ตามสมการที่ (3-20) และ (3-21) โดยพื้นที่ A_0 ในสมการทั้งสองเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับระยะความสูงของแผ่นปิดซึ่งสามารถสร้างพื้นที่การไหลของแก๊สกระจายออกโดยรอบของปากรู ความสูงของช่องอากาศ g และเส้นรอบวงของปากรู W จะเป็นตัวกำหนดค่าที่จะนำไปแทนในสมการ ($A_0 = W \cdot g$) แต่เมื่อระยะความสูงของแผ่นปิดสร้างพื้นที่กระจายแก๊ส

ออกโดยรอบมากกว่าพื้นที่ของปากรู ค่าพื้นที่ที่นำมาใช้จะไม่ขึ้นกับความสูงของแผ่นปิดอีกต่อไป แต่จะเท่ากับพื้นที่ของปากรู ($A_o = D^2$) ซึ่งจะทำให้อัตราการไหลของมวลแก๊สคงที่ตลอด ดังนั้น สำหรับการคำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊ส เมื่อพิจารณาตัวแปรต้นคือระยะความสูงของแผ่นปิด g และตัวแปรตามคืออัตราการไหลของมวล m ที่สัมพันธ์กับการสูญเสียที่ระดับต่างๆ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.20 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างในตารางที่ 3.2 นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายกับอัตราการไหลของมวลแก๊ส แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยพิจารณาพื้นที่ปากรูที่ขนาดต่างๆ โดยไม่พิจารณาการมีอยู่ของแผ่นปิดช่องทางเดินแก๊ส ผลที่ได้มีแนวโน้มเข้าสู่ระดับที่มีอัตราการไหลของมวลแก๊สคงที่เมื่อพื้นที่ปากรูเพิ่มขึ้น

ในทางปฏิบัติอัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อมีการเปลี่ยนระยะความสูงของแผ่นปิดจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของมวลแก๊สดังรูปที่ 3.22 (ข) โดยสามารถพิจารณาพฤติกรรมได้เป็น 3 ช่วง (Henning, 2003) คือ ช่วงที่มวลการไหลของแก๊สแปรผันตรงกับระยะเคลื่อนที่ขึ้นของแผ่นปิด (seat-controlled region) ช่วงระยะเปลี่ยนผ่าน (transition region) และช่วงที่มวลการไหลของแก๊สไม่ขึ้นกับระยะเคลื่อนที่ขึ้นของแผ่นปิด (orifice-controlled region) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะความสูงของแผ่นปิดและขนาดของช่องทางเดินแก๊ส โดย Henning ได้นำเสนอการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การไหลของแก๊สผ่านรู โดยใช้ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล (exponential function) จำลองการส่งผ่านจากช่วง seat-controlled ไปสู่ช่วง orifice-controlled ซึ่งสามารถให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.22 (ก) สมการที่ (3-22) และ (3-23) แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้ว โดยกำหนดพื้นที่ทางออกของแก๊ส A_{eff} ตามช่วงการไหลดังสมการที่ (3-24) ถึง (3-25) โดยพิจารณาเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่หนึ่ง ถ้า ($0 < r < r_o$) คือพิจารณาในช่วง seat-controlled พื้นที่ทางออกของแก๊สจะคำนวณได้ดังสมการที่ (3-24) ช่วงที่สอง ถ้า ($r_o < r$) คือพิจารณาในช่วง transition พื้นที่ทางออกของแก๊สจะคำนวณได้ดังสมการที่ (3-25) และช่วงที่สาม ถ้า ($r \gg 1$) คือพิจารณาในช่วง orifice-controlled พื้นที่ทางออกของแก๊สจะคำนวณได้ดังสมการที่ (3-26)

$$\dot{m}_{\text{sinic}} = C_i A_{\text{eff}} P_s \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3-22)$$

$$\dot{m}_{\text{subsonic}} = C_i A_{\text{eff}} P_s \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT} \left[\left(\frac{P_e}{P_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_e}{P_s} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (3-23)$$

$$A_{\text{eff}} = W \cdot g = W \cdot D_h \cdot r \quad (3-24)$$

$$A_{eff} = WD_h r_o + (A_o - WD_h r_o) \left[1 - \exp\left(-\frac{r-r_o}{\eta}\right) \right] \quad (3-25)$$

$$A_{eff} = A_o \quad (3-26)$$

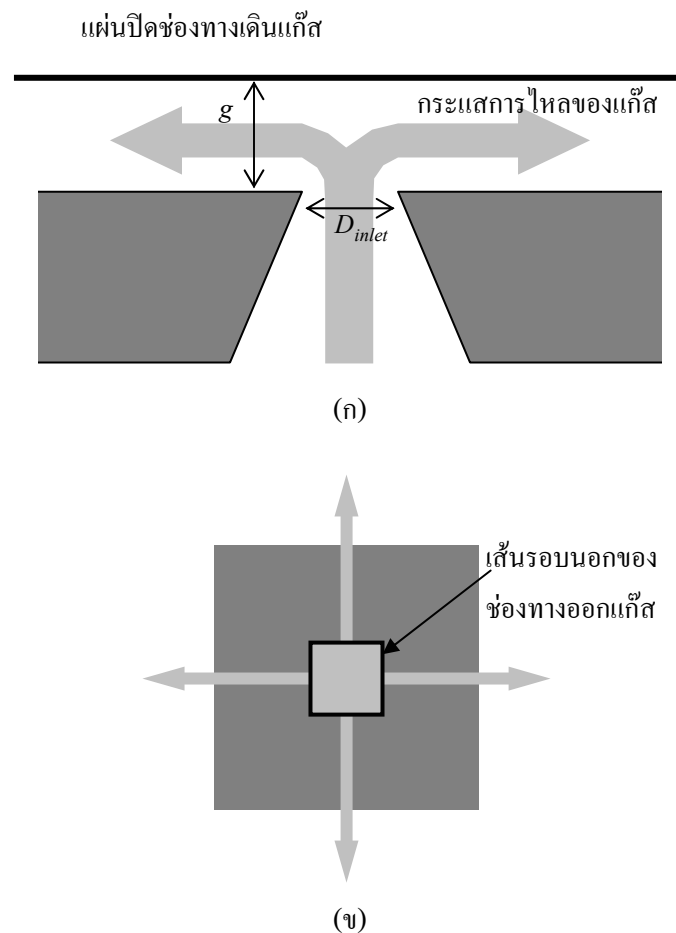
เมื่อ r คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงแผ่นปิดและ hydraulic diameter ($r = g/D_h$)

D คือ The hydraulic diameter ($D_h = 4A_o/W$)

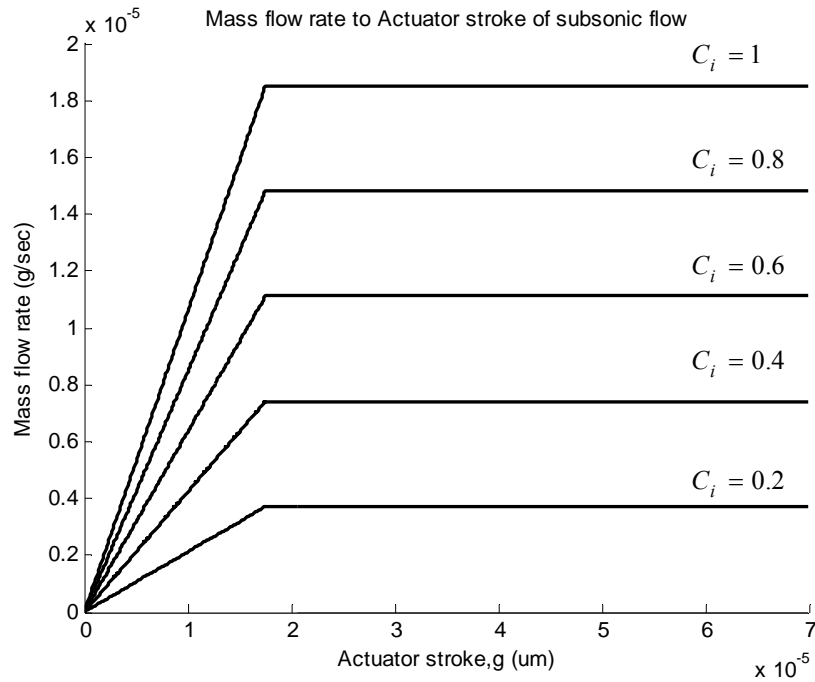
W คือ เส้นรอบนอกของช่องทางออกแก๊ส

r_o คือ อัตราส่วนเริ่มเปลี่ยนจากช่วง seat-controlled เข้าสู่ช่วง transition ($r_o = 0.13$)

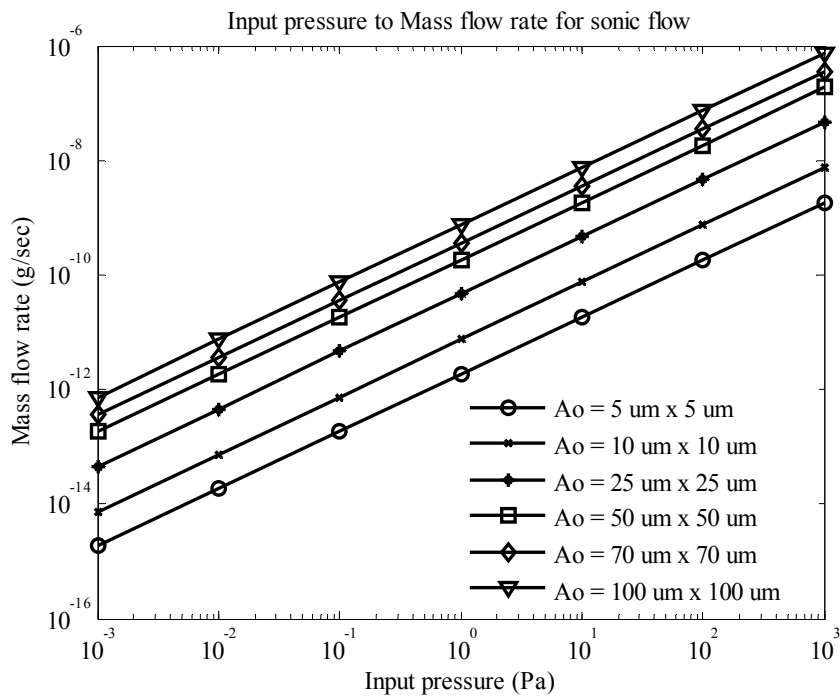
η คือ ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันเลขชี้กำลังที่ได้จากการปรับเส้นโค้งด้วยข้อมูลจากผลการทดลอง ด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้น ($\eta = (1/4) - r_o = 0.12$)



รูปที่ 3.19 พารามิเตอร์ทางโครงสร้างของไมโครวาล์ว เมื่อสมมติให้แผ่นปิดเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และขนาดกับระนาบของฐานสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น (ก) รูปภาคตัดขวาง (ข) รูปด้านบน



รูปที่ 3.20 อัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อความสูงของแผ่นปิดเปลี่ยนแปลงที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียระดับต่างๆ เมื่อกำหนดขนาดช่องทางเดินแก๊สเท่ากับ $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$



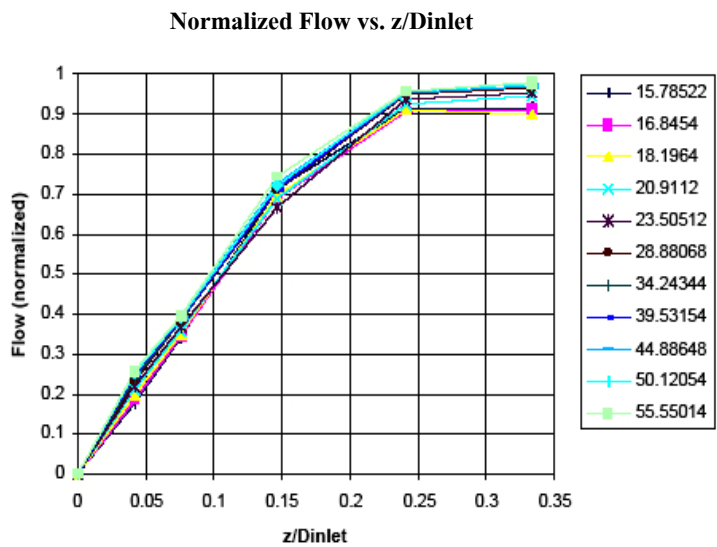
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายกับอัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อพิจารณาพื้นที่ทางออกของแก๊สที่ขนาดต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณแบบจำลองอัตราการไหลของมวลแก๊ส

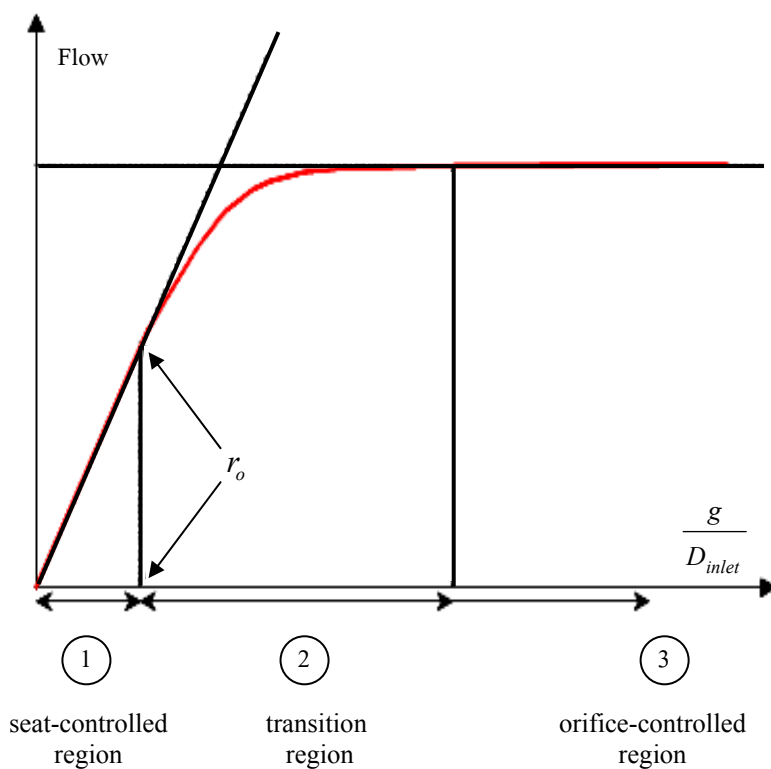
D_{inlet}	70 μm
p_s	110 kPa
p_e	104.1 kPa
γ	1.4
R	0.287 J/g-K
T	298.15 K

ผลเฉลยของสมการที่ (3-20) และ (3-21) แสดงผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงให้สอดคล้องกับผลการทดลอง และสมการที่ (3-22) ถึง (3-26) แสดงผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงแล้ว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างในตารางที่ 3.2 แสดงผังรูปที่ 3.23 ซึ่งแสดงอัตราการไหลของมวลอากาศเมื่อระยะความสูงแผ่นปิดเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้จากแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุง (เส้นประ) จะมีผลช่วงการไหลทั้งสามสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองของ Henning ในรูปที่ 3.22 (ก) ส่วนผลที่ได้จากวงการแบบจำลองเดิม (เส้นทึบ) จะให้ผลตรงในช่วงอัตราการไหลของมวลอากาศแปรผันตรงกับระยะเคลื่อนที่ขึ้นของแผ่นปิดและช่วงที่อัตราการไหลของมวลอากาศไม่แปรผันตามระยะเคลื่อนที่ของแผ่นปิดเท่านั้น และจะให้ผลเป็นเชิงเส้นและคงที่ในช่วงเปลี่ยนผ่าน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊ส ทั้งรูปแบบการไหลออกที่ช่องทางเดินแก๊สมีความเร็วเท่ากับเสียงและมีความเร็วต่ำกว่าเสียง ต้องมีการวัดแรงดันแก๊สที่ออกมาด้วยตัวตรวจรู้แรงดันแก๊สเสียก่อน จึงจะสามารถตัดสินใจได้ว่าแก๊สที่ไหลผ่านช่องทางเดินแก๊สมีรูปแบบใด สำหรับอัตราการไหลของมวลแก๊สในไมโครวาล์วนั้นจะอยู่ในหน่วยไมโครกรัมต่อวินาที ซึ่งเป็นหน่วยที่มีขนาดละเอียดมาก ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดแรงดันแก๊สที่ผ่านออกมาจากช่องทางเดินแก๊สต้องสามารถตรวจรู้ได้อย่างแม่นยำ สำหรับการติดตั้งระบบเพื่อทดสอบ ต้องระวังการรั่วไหลของแก๊สออกไปยังช่องว่างที่เกิดจากการประกบชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้แรงดันแก๊สที่ออกจากช่องทางเดินแก๊สมีค่าลดลง และการตรวจสอบระดับการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดตามแรงดันแก๊สที่ดันขึ้นมานั้น ต้องใช้อุปกรณ์หรือกล้องจุลทรรศน์ที่มีความไวสูง เพราะการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดเนื่องจากแรงดันแก๊สที่มีความดันสูงจะรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์นั้นจะวัดเฉพาะอัตราการไหลของมวลแก๊สที่สถานะคงที่แล้ว เพราะต้องใช้มวลแก๊สในการสร้างปริมาตรเพื่อเพิ่มแรงดันแก๊สภายในช่องปริมาตรปิดให้ดันขึ้นผนังยึดหุ่นแสดงเป็นจุดอักษรเบรลล์ อัตราการไหลของมวลแก๊สที่สามารถดันจุดเบรลล์ให้ขึ้นมาได้รวดเร็วจึงเป็นจุดสำคัญซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นที่ช่องทางเดินแก๊สและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมการทำงานด้วย

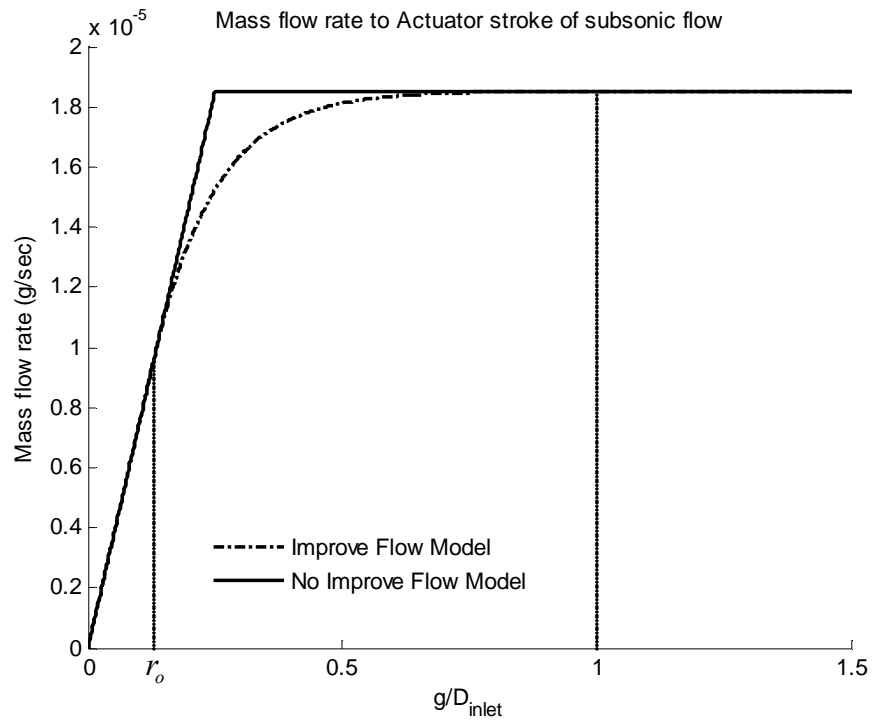


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 การไหลของแก๊สผ่านที่ได้จากการทดลองและการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Henning, 2003) (ก) ข้อมูลการไหลของแก๊สจากการทดลอง (ข) ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้ว



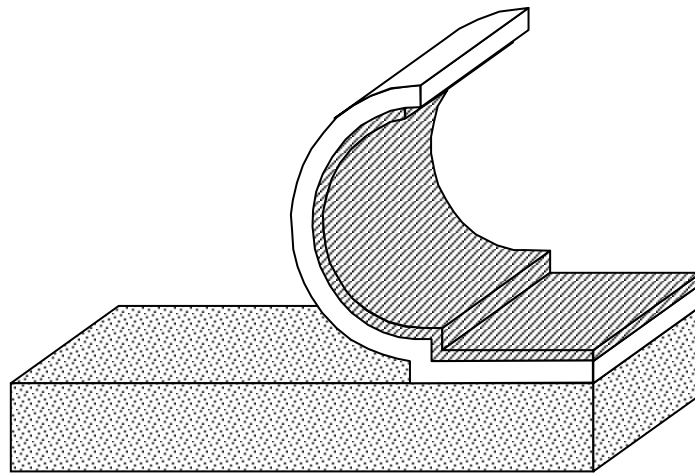
รูปที่ 3.23 ผลเฉลยของแบบจำลองการไหลที่ได้รับการปรับปรุงและไม่ได้รับการปรับปรุง

บทที่ 4

กระบวนการพัฒนาโครงสร้างไมโครวาล์ว

ไมโครวาล์วจะถูกสร้างขึ้นตามกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาค โดยจะแบ่งการสร้างเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรก สร้างโครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระบนฐานรองกระจกที่ไม่มีตัวนำไฟฟ้าด้านล่าง เพื่อทดสอบถึงการโค้งตัวของแผ่นคานจากระนาบปกติเนื่องจากผลของความเค้นภายใน และอัตราการขยายตัวตามอุณหภูมิในชั้นวัสดุ ส่วนที่สอง คือ การสร้างช่องทางเดินจุลภาคสำหรับการไหลของแก๊สด้วยกระบวนการหุบนิกเกิดด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 เป็นเข้าขึ้นรูปโครงสร้าง ส่วนที่สาม คือ กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบด้วยสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดบวก AZ P4620 และส่วนสุดท้าย คือ การสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สที่เตรียมไว้เพื่อทำหน้าที่เป็นไมโครวาล์ว

4.1 การสร้างโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจก



■ กระจก □ SU-8 2002 ▨ นิกเกิล/ทองแดง/โครเมียม

รูปที่ 4.1 โครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระ

โครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระแสดงดังรูปที่ 4.1 แผ่นคานที่โค้งงอขึ้น เกิดจากการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวเพื่อสร้างช่องว่างระหว่างฐานรองกับแผ่นคาน SU-8 ที่เคลือบด้วยชั้นโครเมียม

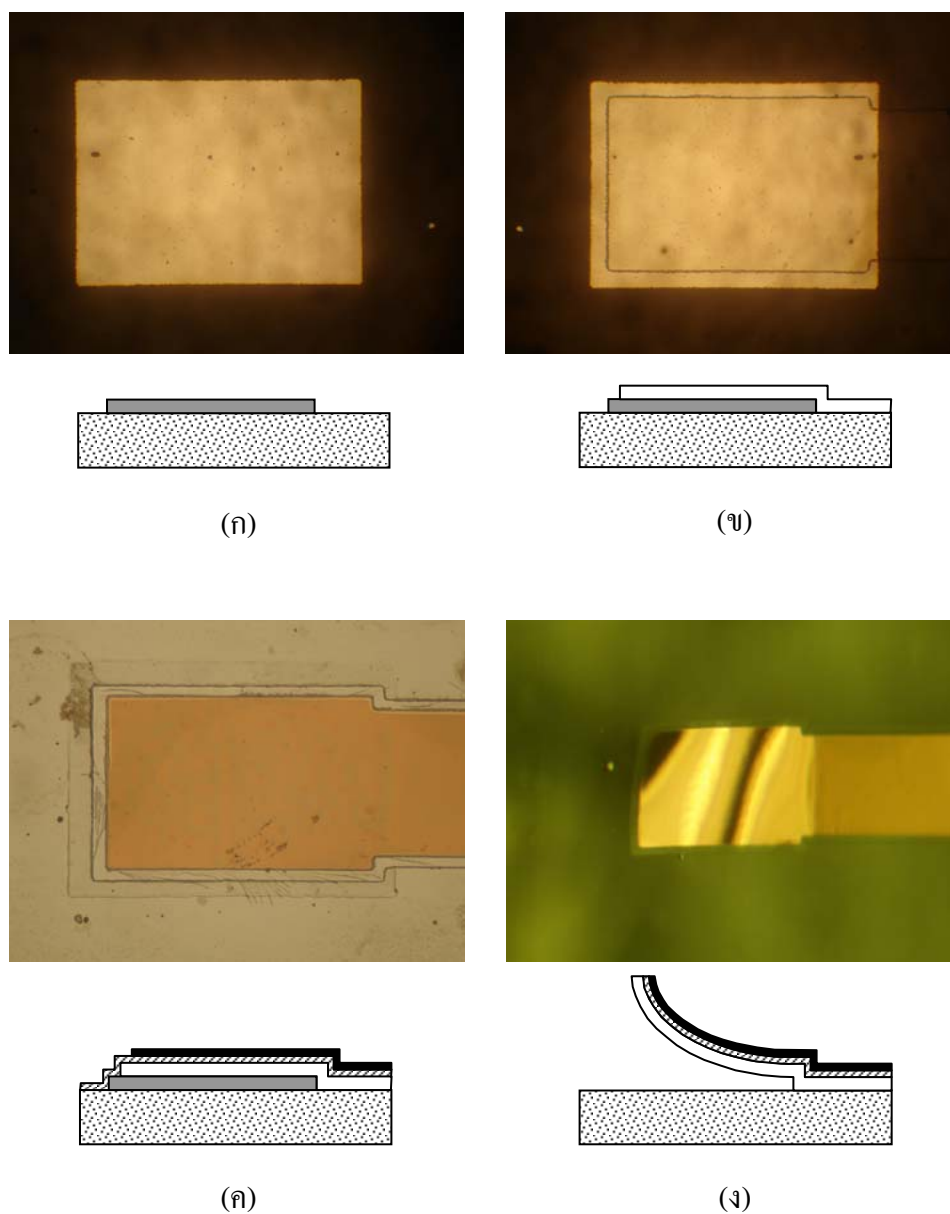
ทองแดงและนิกเกิล ตามลำดับ การโค้งขึ้นของแผ่นคานมาจากความเค้นอัดตกค้าง (residual compressive stress) ภายในชั้น SU-8 และความเค้นดึงตกค้าง (residual tensile stress) ภายในชั้นโครเมียมและทองแดงระหว่างกระบวนการสร้าง โดยที่ชั้นโครเมียม/ทองแดงซึ่งวางอยู่บนจะมีความเค้นดึงและเกิดการหดตัวสั้นกว่าปกติภายหลังการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวเพื่อปลดปล่อยโครงสร้าง ในขณะที่ชั้น SU-8 ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของแผ่นคานจะมีความเค้นอัด ทำให้แผ่นคานยาวกว่าปกติภายหลังการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวที่ส่งผลให้แผ่นคานโค้งงอขึ้นและทำให้เกิดสภาวะปกติเปิดกับไมโครวาล์ว ซึ่งช่วยลดปริมาณของเหลวเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราว ที่เป็นสาเหตุการแนบติดยึดกันของแผ่นคานกับฐานรองอย่างถาวร

ลำดับกระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจกแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ขนาด $1 \text{ นิ้ว} \times 1 \text{ นิ้ว}$ มาเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียมหนาประมาณ $0.5 \mu\text{m}$ ด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศ สารไวแสงโฟโตริซิชชนิดบวก AZ 1512 จะถูกเคลือบเป็นลำดับถัดมาและนำไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้น ชิ้นงานจะถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 60 วินาทีผ่านโฟโตมาสก์ และนำไปลอกสารไวแสงออก ซึ่งจะได้ลวดลายเพื่อใช้เป็นมาสก์สกัดชั้นอลูมิเนียมออกในสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริก กรดไนตริก กรดอะซิติกและน้ำบริสุทธิ์ ภายหลังการสกัดชั้นอลูมิเนียมสารไวแสงจะถูกล้างออกในอะซิโตน ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์และอบที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาที โครงสร้างชั้นอลูมิเนียมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุชั่วคราวแสดงดังรูปที่ 4.2 (ก)

แผ่นคานปิดช่องทางเดินแก๊สจะถูกสร้างจากสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 2002 หนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ โดยการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที และอบ (soft bake) ที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ซึ่งเป็นลวดลายแผ่นคานที่มีปลายด้านหนึ่งแนบติดกับฐานรองและปลายอีกด้านวางพาดบนชั้นอลูมิเนียม นำมาอบ (post-exposure bake) ที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปลอกสารไวแสงและล้างด้วยไอโซโพรพิล-แอลกอฮอล์ (IPA) เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบ (hard bake) ที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อสร้างความแข็งแรงให้ชั้นฟิล์ม ก่อนปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.2 (ข)

ชั้นโลหะโครเมียมหนาประมาณ $0.15 \mu\text{m}$ และชั้นทองแดงหนาประมาณ $0.2 \mu\text{m}$ จะถูกเคลือบลงบนผิวชิ้นงานตามลำดับ ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (sputtering) ชั้นโลหะด้านบนจะถูกสกัดออกให้เหลือเฉพาะส่วนบนของแผ่นคาน โดยเริ่มจากการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิช AZ 1512 และอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำมาฉายแสง ลอกสารไวแสงออกให้เหลือเฉพาะส่วนบนของแผ่นคาน นำมาอบที่ 90°C เป็นเวลา 30 นาทีอีกครั้ง เพื่อให้ชั้นสารไวแสงที่ทำหน้าที่เป็นมาสก์แข็งแรงขึ้น หลังจากนั้นจึงสกัดชั้นทองแดงออกในสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดซัลฟูริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และน้ำบริสุทธิ์ ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 4.2 (ค) จากนั้นจะทำการล้าง

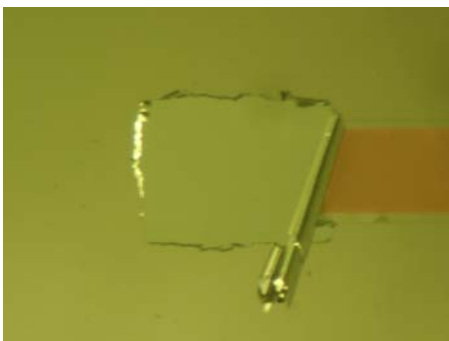
สารไวแสงออก และใช้ชั้นทองแดงเป็นมาสก์ สกัดชั้น โครเมียมด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต และน้ำบริสุทธิ์ ชั้นอลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุ ชั่วคราวจะถูกสกัดออกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 24 % ส่งผลให้แผ่นคานโค้งตัวขึ้นดังรูปที่ 4.2 (ง)



กระฉก
 อลูมิเนียม
 SU-8 2002
 โครเมียม
 ทองแดง

รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานกระฉก (ก) ชั้นโลหะอลูมิเนียมบนฐานรอ (ข) ชั้นสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8 บนชั้นอลูมิเนียม (ค) การสกัดชั้นทองแดงออกด้วย มาสก์สารไวแสง AZ (ง) สกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้งเพื่อปลดปล่อยแผ่นคานให้โค้งตัวขึ้น

ภายหลังการโค้งตัวขึ้นจากฐานรองของแผ่นคาน น้ำที่คงเหลือตามส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง จะถูกกำจัดด้วยการแช่ในเมธิลแอลกอฮอล์แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ ขั้นตอนนี้แผ่นคานจะเกิดการม้วนตัวมากขึ้นดังรูปที่ 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของเมธิลแอลกอฮอล์ต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ล้างชิ้นงานก่อนหน้านี้ และเมื่อทำชิ้นงานให้แห้งจะไม่เกิดการคืนตัวของแผ่นคาน เพื่อลดปัญหาดังกล่าวชั้น โลหะนิกเกิลจึงถูกเพิ่มเข้ามาบนชั้นทองแดง ด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) เพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงให้โครงสร้าง และลดการม้วนตัวของแผ่นคานดังรูปที่ 4.4



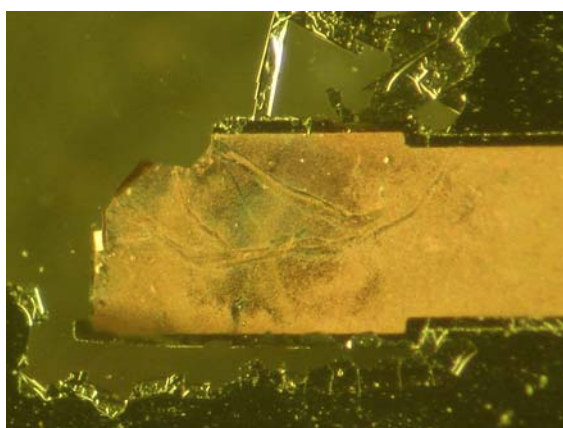
รูปที่ 4.3 การม้วนตัวของแผ่นคานในเมธิลแอลกอฮอล์เมื่อยังไม่มีชั้นนิกเกิลบนชั้นทองแดง



รูปที่ 4.4 การม้วนตัวของแผ่นคานในเมธิลแอลกอฮอล์ เมื่อเพิ่มชั้นนิกเกิลบนชั้นทองแดง

สำหรับขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจกคือ การทำให้ชิ้นงานแห้ง ปราศจากน้ำและความชื้น รวมทั้งมีการโค้งตัวขึ้นในสภาวะปกติ ซึ่งในขั้นตอนนี้สำหรับโครงสร้างจุลภาคทั่วไปจะนำชิ้นงานไปอบให้ความร้อน แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในกระบวนการสร้างและโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระที่สร้างขึ้นเกี่ยวข้องกับการขยายตัวตามอุณหภูมิของชั้นวัสดุ การนำชิ้นงานไปให้ความร้อนจะทำให้ชั้นโลหะขยายตัวดันแผ่นคานให้หงาย

แนบติดกับฐานรอง และถ้ายังมีความชื้นหรือน้ำเพียงเล็กน้อยตกค้างอยู่ แผ่นปิดจะแนบติดชิดกับฐานรอง ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีก ดังรูปที่ 4.5 เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานภายหลังการแช่ชิ้นงานในเมทิลแอลกอฮอล์ โดยปล่อยให้เมทิลแอลกอฮอล์ระเหยหมดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที และปล่อยให้แผ่นคานจะคลายตัวกลับในสถานะโค้งตัวตามขนาดแรงคืนภายในชั้นวัสดุและการแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ปัญหาการแนบยึดติดกันของแผ่นปิดกับฐานกระจก



รูปที่ 4.6 การคืนตัวของแผ่นคานเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง

โครงสร้างสุดท้ายที่ได้ จะเกิดการโค้งงอของแผ่นคานขึ้นเป็นรูปตัว C โดยขนาดความโค้งของแผ่นคาน จะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8 และชั้นโลหะนิเกิลที่เกิดที่อยู่ด้านบน ซึ่งสามารถควบคุมได้ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนชั้นโลหะทองแดง สำหรับ

ข้อดีของชั้นนิกเกิล นอกจากลดขนาดการม้วนตัวของแผ่นคาน เมื่อนำไปแช่ในเมทิลแอลกอฮอล์แล้ว ยังสามารถป้องกันการเกิดออกไซด์บนผิวทองแดงได้อีกด้วย รวมถึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นแผ่นปิดช่องทางเดินจุลภาค เพื่อควบคุมการไหลของแก๊สในไมโครวาล์ว สารละลายที่ใช้ในกระบวนการสกัดชั้นโลหะและกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สารละลายที่ใช้ในกระบวนการสกัดชั้นโลหะและกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

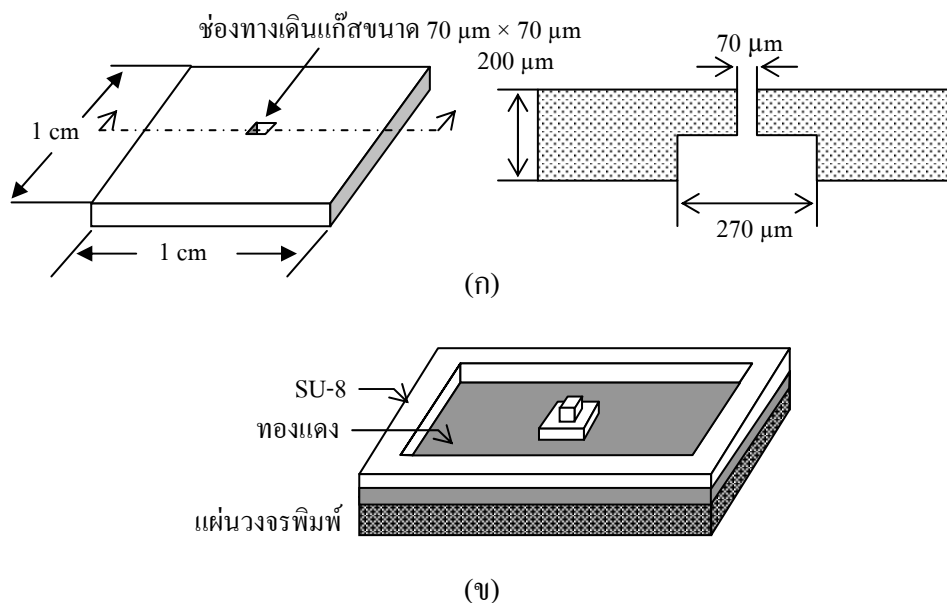
สารละลาย	สารเคมี	อัตราส่วน
ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า	นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	360 g
	นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	9 g
	กรดบอริก (H_3BO_3)	45 g
	น้ำบริสุทธิ์	1800 ml
ทำความสะอาดผิวทองแดง	กรดซัลฟูริก 5 % (H_2SO_4)	-
สกัดอลูมิเนียม	กรดไฮโดรฟลูออริก 24 % (HF)	
	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	1 g
	โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)	10 g
	น้ำบริสุทธิ์	100 ml
	กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	160 ml
	กรดไนตริก (HNO_3)	10 ml
สกัดทองแดง	กรดอะซิติก (CH_3COOH)	10 ml
	น้ำบริสุทธิ์	20 ml
	กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)	10 ml
	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)	10 ml
สกัดโครเมียม	น้ำบริสุทธิ์	200 ml
	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	20 g
	โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอเรต ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$)	20 g
	น้ำบริสุทธิ์	100 g

4.2 การสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาค

กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สเป็นโครงสร้างร่วมกันระหว่างฐานรองนำไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเร้าและช่องขนาดเล็กเพื่อให้แก๊สไหลผ่าน เป็นขั้นตอนแรกเริ่มที่สำคัญก่อนการพัฒนาสู่การ

สร้างแผ่นปิดเหนือช่องทางเดินแก๊ส การพัฒนากระบวนการสร้างประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ การสร้างเข้าขั้นรูปของฐานรองด้วยการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและการขัดผิวนิกเกิลเพื่อเตรียมฐานก่อนเข้าสู่กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ (planarization) แผ่นตัวนำไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นฐานชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามี 2 ชนิด คือ ทองแดงและกราไฟต์

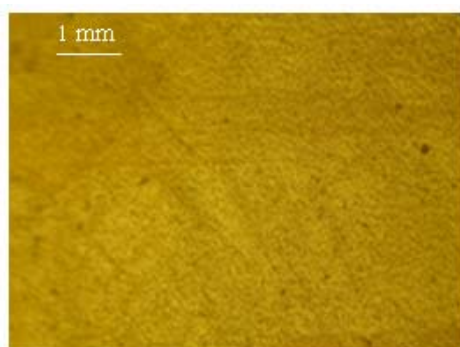
โครงสร้างช่องทางเดินแก๊สจตุภาคที่สร้างร่วมกับฐานรองนิกเกิลจากกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) พิจารณาใช้เข้าขั้นรูปที่สร้างจากสารไวแสงโฟโตริซซชนิดลบ SU-8 2100 โดยใช้กระบวนการสร้างลวดลายแม่พิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มีฐานชุบนิกเกิลเป็นชั้นทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 4.7 (ข) ช่องทางเดินแก๊สที่ได้ประกอบด้วยรูสี่เหลี่ยมขนาด $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ อยู่ด้านบน ทำหน้าที่เป็นช่องทางไหลออกของแก๊ส และขนาด $270\ \mu\text{m} \times 270\ \mu\text{m}$ เป็นช่องทางไหลเข้าของแก๊สอยู่ด้านล่าง ส่วนแผ่นฐานรองนิกเกิลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ การควบคุมความหนาของนิกเกิลทำได้โดยการควบคุมความหนาแน่นกระแสในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



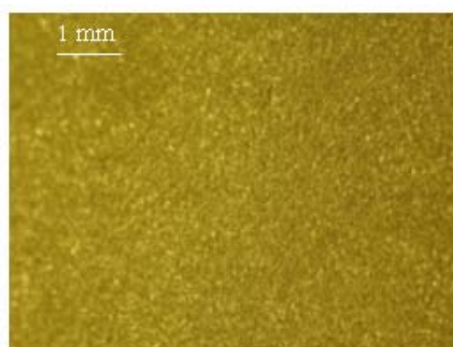
รูปที่ 4.7 ช่องทางเดินแก๊สที่ทะลุผ่านฐานรองนิกเกิลที่สร้างจากฐานทองแดง (ก) ฐานรองนิกเกิลที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (ข) เข้าขั้นรูปฐานรองนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างแม่พิมพ์หน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

กระบวนการสร้าง จะเริ่มจากการนำแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board: PCB) ไปเข้าเครื่องยิงเม็ดทรายสร้างพื้นผิวของทองแดงให้มีความขรุขระเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิล

และทองแดง ซึ่งเปรียบเทียบพื้นผิวทองแดงก่อนและหลังการยิงเม็ดทรายดังรูปที่ 4.8 พื้นผิวทองแดงที่เรียบจะมีแรงยึดติดผิวโลหะต่ำส่งผลให้ชั้นนิกเกิลโก่งตัวขึ้นจากผิวทองแดงเนื่องจากความเครียดภายใน ดังรูปที่ 4.9 (ก) แต่เมื่อฐานทองแดงผ่านการยิงเม็ดทรายปัญหาดังกล่าวจะหมดไป ดังรูปที่ 4.9 (ข) หลังจากได้พื้นผิวทองแดงที่ต้องการแล้วจึงนำไปทำความสะอาดและกำจัดความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการสร้างเบ้าขึ้นรูปด้วยสารไวแสงโฟโตริซิสต่อไป



(ก)



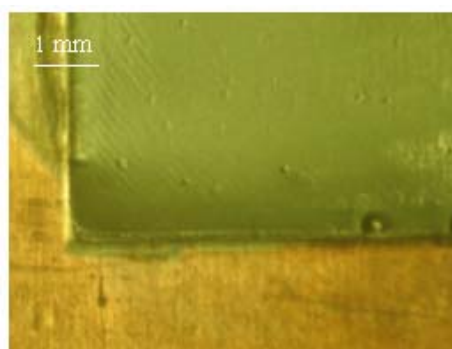
(ข)

รูปที่ 4.8 พื้นผิวทองแดงก่อนเข้าสู่กระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า (ก) ผิวทองแดงก่อนการยิงเม็ดทราย (ข) ผิวทองแดงภายหลังจากยิงเม็ดทราย

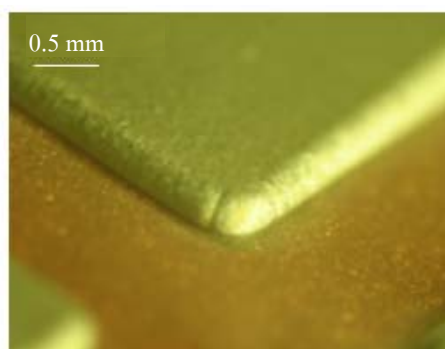
เบ้าขึ้นรูปของฐานรองนิกเกิลทำได้โดยการหมุนเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2100 ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที จำนวน 2 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งจะถูกรอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวทำละลาย (solvent) ที่อยู่ในสารไวแสงระเหยออกมากที่สุดก่อนการเคลือบชั้นต่อไป ความหนาของแต่ละชั้นมีค่าประมาณ 100 μm ซึ่งจะได้ความหนารวมประมาณ 200 μm หลังจากนั้นจึงนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์ และนำมาอบ (post-exposure bake) ที่ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ส่วนที่ถูกฉายแสงสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกันแล้วจึงนำมาลอกสารไวแสงออก ในขั้นตอนนี้จะได้ชั้น SU-8 รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 270 $\mu\text{m} \times 270 \mu\text{m}$ หนาประมาณ 200 μm ทำหน้าที่เป็นเบ้าขึ้นรูปของช่องทางเข้าทางด้านล่างของช่องทางเดินแก๊ส ภายหลังจากการล้างและทำให้ผิวชิ้นงานแห้งแล้ว จึงนำไปอบบนแผ่นความร้อน (hard bake) ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 นาที โครงสร้างชั้นแรกที่แล้วเสร็จ ดังรูปที่ 4.10 (ก)

ขั้นตอนต่อมา เป็นการชุบนิกเกิลขึ้นมาให้ล้นเบ้าขึ้นรูป ที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 5 mA/cm^2 ดังรูปที่ 4.10 (ข) แล้วจึงนำผิวหน้าของชั้นนิกเกิลขจัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ เบอร์ 1200 โดยใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งจะดำเนินไปจนกระทั่งผิวของนิกเกิลและผิวของ SU-

8 เรียบเสมอกันดังรูปที่ 4.10 (ค) เมื่อผ่านขั้นตอนขัดผิวหน้านิกเกิลแล้วจะได้ฐานรองชั้นใหม่ที่มีมวล SU-8 ฝังอยู่กลางมวลนิกเกิล แท่งมวลสารไวแสง SU-8 ชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นกลางมวล SU-8 ชั้นแรก ด้วยการเคลือบสารไวแสง SU-8 2100 จำนวน 2 ครั้งตามขั้นตอนในขั้นต้น แต่จะฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ที่สร้างก่อนมวลสูงประมาณ $200\ \mu\text{m}$ และมีขนาด $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ เพื่อใช้เป็นเบ้าขึ้นรูปนิกเกิลชั้นที่สองเพื่อสร้างช่องทางออกของแก๊สทางด้านบน ดังรูปที่ 4.10 (ง) แล้วจึงนำมาชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนกระทั่งชั้นนิกเกิลล้นเบ้าขึ้นรูปดังภาพที่ 4.11 (ก)



(ก)

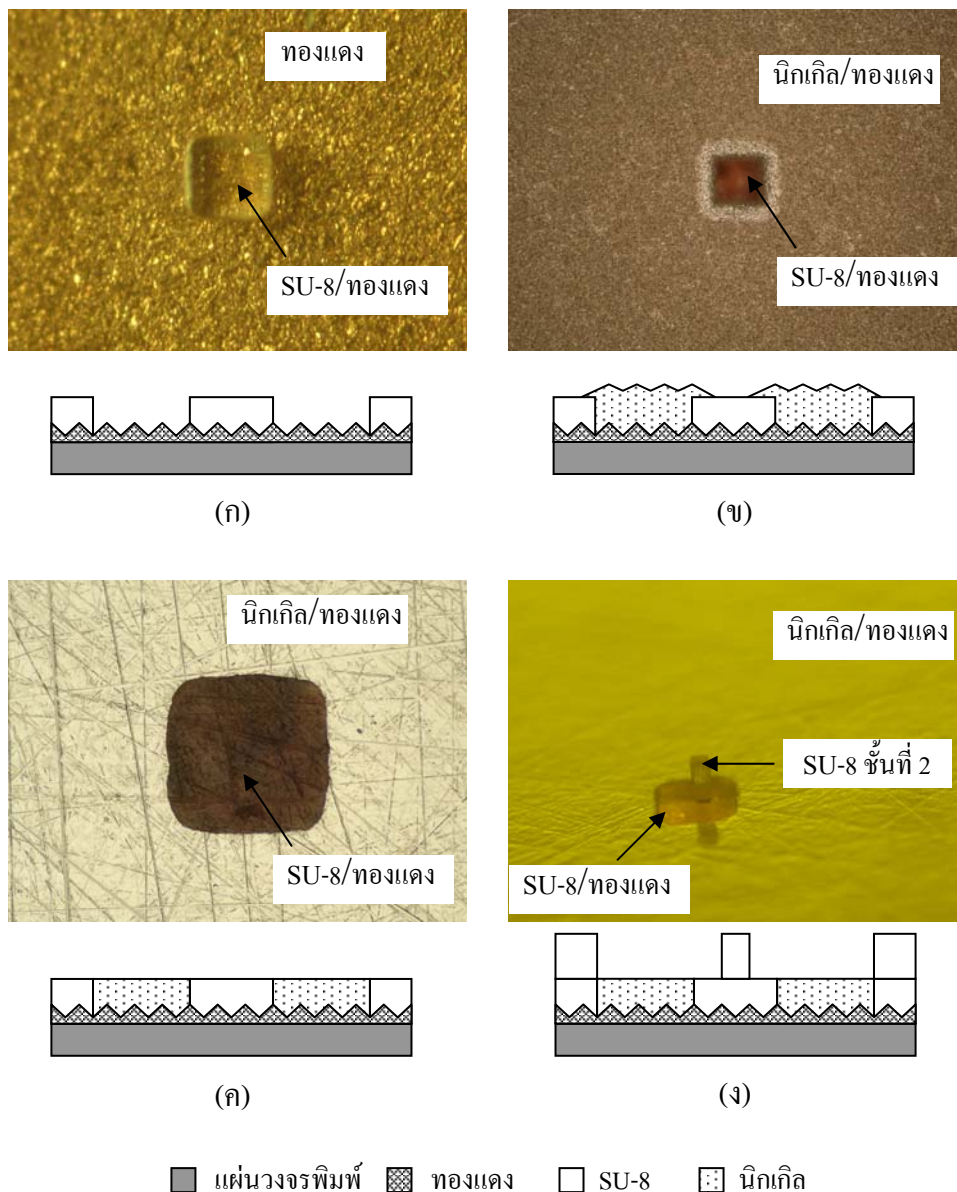


(ข)

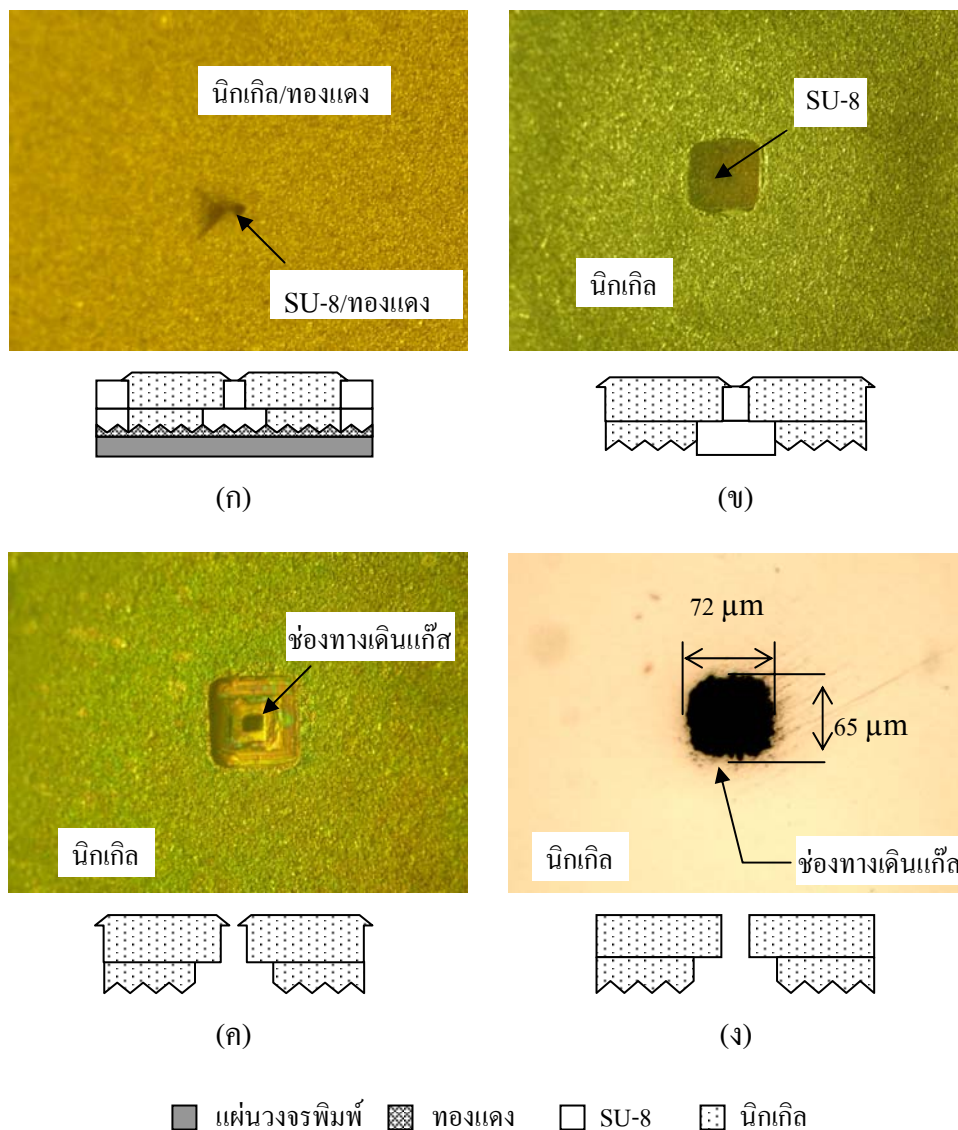
รูปที่ 4.9 ผลการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า (ก) ชั้นนิกเกิลแยกตัวออกจากผิวทองแดงที่เรียบ (ข) มวลนิกเกิลที่มีความสูง $500\ \mu\text{m}$ เมื่อฐานทองแดงถูกยิงด้วยเม็ดทราย

ลำดับต่อมาจึงนำชิ้นงานมาสกัดชั้นทองแดงออกในสารละลายกรด เพื่อปลดปล่อยให้แผ่นนิกเกิลหลุดออกมา สำหรับขั้นตอนนี้จะใช้เวลาในการสกัดชั้นทองแดงนานมาก เนื่องจากการกัดเซาะสามารถทำได้เฉพาะด้านข้างของแผ่นวงจรพิมพ์เท่านั้น และชั้น SU-8 ส่วนใหญ่จะหลุดออกมาด้วยเช่นกันยกเว้นในช่องทางเดินแก๊ส ดังภาพที่ 4.11 (ข) การทำลายพันธะยึดเหนี่ยวของ SU-8 นั้นจะดำเนินการในเตาเผาอุณหภูมิสูงประมาณ 650°C เป็นเวลา 30 นาที ทำให้ชั้น SU-8 สลายตัวไปเหลือเพียงนิกเกิลเท่านั้น ดังรูปที่ 4.11 (ค) และขั้นตอนสุดท้ายจึงนำแผ่นนิกเกิลที่ได้มาขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาไบด์และลบรอยตำหนิต่างๆบนผิวด้วยผ้าขัดมันและผงขัดเพชรระดับไมโครเมตร (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก) ซึ่งจะได้ช่องทางเดินแก๊ส ดังรูปที่ 4.11 (ง) ที่พร้อมนำเข้าสู่กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบในลำดับถัดไป กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สที่กล่าวในข้างต้นสามารถสร้างโครงสร้างช่องทางเดินแก๊สบนฐานรองนิกเกิลได้ที่มีขนาด $65\ \mu\text{m} \times 72\ \mu\text{m}$ และมีความหนาลดลง จากการขัดผิวนิกเกิลเหลือเพียงประมาณ $250\ \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามกระบวนการสร้างจะใช้เวลานานในขั้นตอนการสกัดแผ่นนิกเกิลออกจากฐานทองแดง

เนื่องจากสารเคมีสามารถกัดเซาะเข้าได้ทางด้านข้างเท่านั้น เพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการสร้างฐานกราวไฟต์จึงถูกนำมาแทนที่ฐานทองแดงด้วยโลหะเฉื่อยที่จะกล่าวในลำดับถัดไป



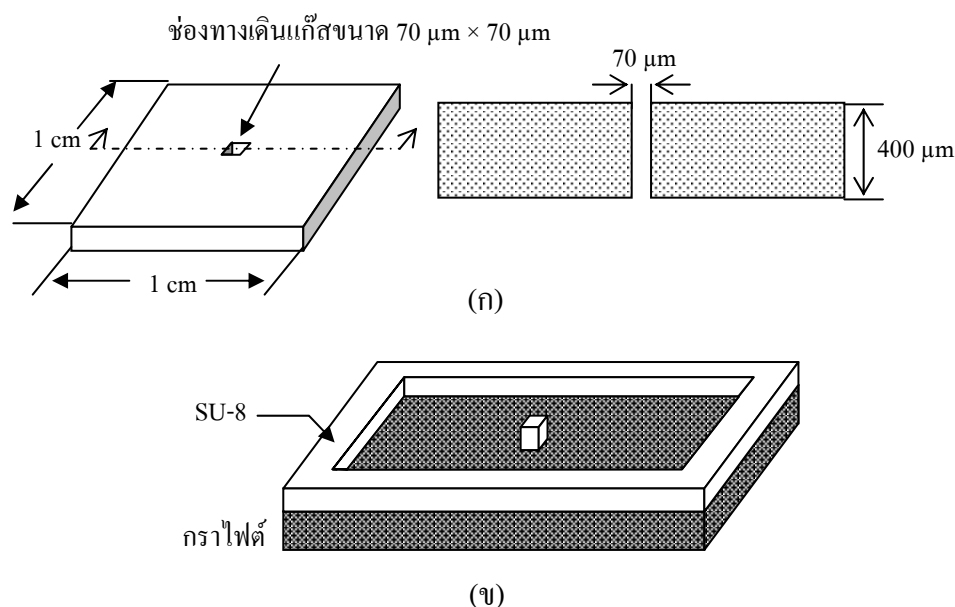
รูปที่ 4.10 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนฐานทองแดง (ก) โครงสร้าง SU-8 ที่สร้างโดยกระบวนการสร้างลวดลายแม่พิมพ์หน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (ข) ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนล้นเป่าขึ้นรูป เพื่อสร้างช่องทางออกของแก๊สด้านล่าง (ค) ขัดผิวนิกเกิลให้มีระนาบเดียวกับมวล SU-8 ด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ (ง) สร้างแท่งมวลของสารไวแสงชั้นที่ 2 บนมวล SU-8 ด้านล่าง (ในภาพเป็นมุมมองด้านข้าง)



รูปที่ 4.11 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนฐานทองแดง (ต่อ) (ก) ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจนล้นเข้าขึ้นรูปเพื่อสร้างช่องทางออกของแก๊สด้านบน (มองจากด้านบน) (ข) สกัดชั้นทองแดงออกเพื่อปลดปล่อยแผ่นนิกเกิลออกจากฐานทองแดง (มองจากล่างฐานรอง) (ค) สลายพันธะ SU-8 ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (มองจากด้านล่างฐานรอง) (ง) นำชิ้นงานไปขัดเรียบและขัดเงา (มองจากด้านบน)

กราไฟต์ เป็นวัสดุธรรมชาติอีกรูปหนึ่งของธาตุคาร์บอน ชื่อสามัญเรียกว่า พลัมเบโก (plumbago) หรือแร่ดินสอดำ มีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปผลึกเป็นแผ่นบาง ๆ ทึบแสง อ่อนนุ่ม สีเทา เข้มถึงดำเนื้ออ่อน เป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูง แต่สามารถสึกกร่อนได้ง่ายด้วยการขัดถู เป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่น่านำมาใช้ในกระบวนการชุบ

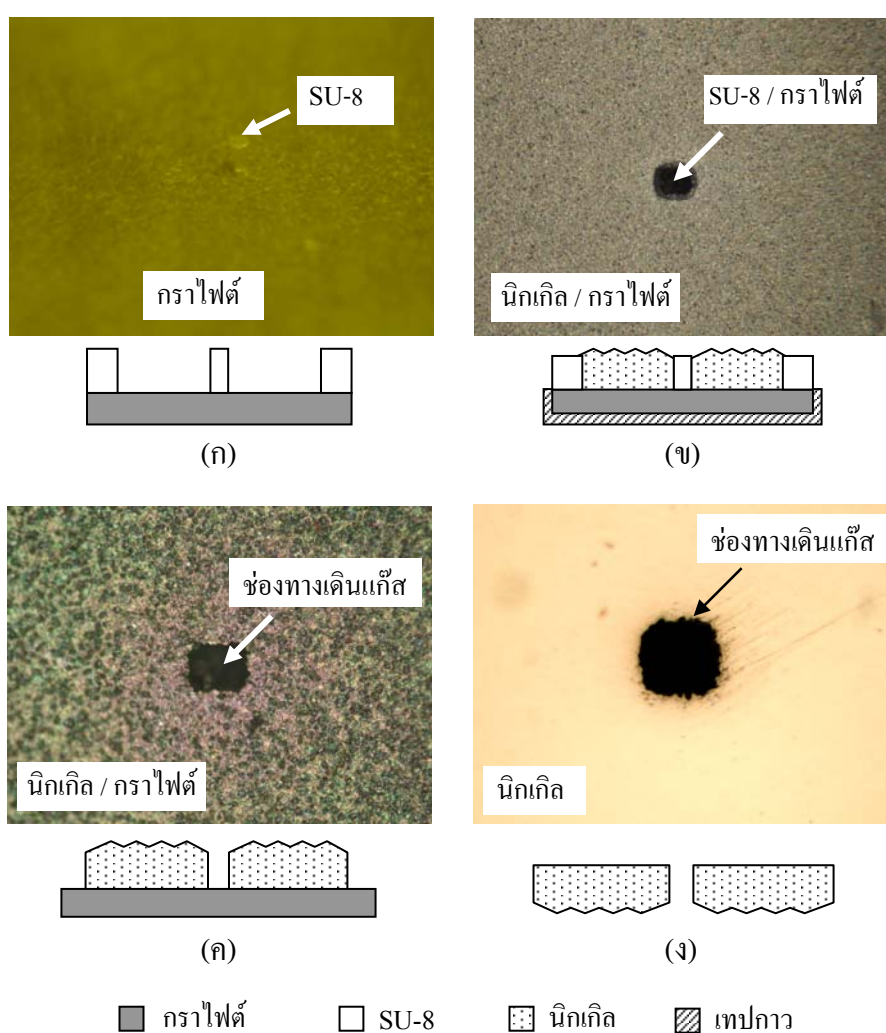
โลหะด้วยไฟฟ้า แต่เนื่องจากการสึกกร่อนง่ายหากเกิดการเสียดสี จึงต้องระวังเรื่องเศษผง โครงสร้างฐานรองนิกเกิลที่มีช่องทางเดินแก๊สสร้างบนฐานกราฟต์แสดงดังรูปที่ 4.12 ประกอบด้วยรูสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ เพียงขนาดเดียว เนื่องจากกราฟต์จะสามารถยึดโครงสร้าง SU-8 โดยไม่หลุดออกระหว่างกระบวนการสร้าง การเตรียมแผ่นกราฟต์เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊ส จะเริ่มจากตัดแบ่งแผ่นกราฟต์ขนาด $1\ \text{นิ้ว} \times 1.5\ \text{นิ้ว}$ เช่นเดียวกับแผ่นลายวงจร นำเข้าสู่กระบวนการสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง และกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 ช่องทางเดินแก๊สที่ทะลุผ่านฐานของไมโครวาล์วที่สร้างจากฐานกราฟต์ (ก) ฐานรองนิกเกิลที่ได้จากการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (ข) เบ้าขึ้นรูปฐานรองนิกเกิลที่สร้างด้วยกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเลต

กระบวนการสร้างเริ่มจากการหมุนเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 2100 และนำไปอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง นำมาเคลือบอีก 2 ชั้น ตามกระบวนการเดิม จะได้ความหนาทั้งหมดประมาณ $300\ \mu\text{m}$ นำมาฉายแสงผ่านโฟโตมาสก์ และอบ (post-exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ลอกสารไวแสงออก จะได้เบ้าขึ้นรูปโครงสร้าง SU-8 มีเสาอยู่ตรงกลาง ขนาดประมาณ $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ สูงประมาณ $300\ \mu\text{m}$ พิจารณารูปที่ 4.13 (ก) ชิ้นงานจะถูกนำมาชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส $5\ \text{mA}/\text{cm}^2$ จนมวลนิกเกิลเสมอเบ้าขึ้นรูป SU-8 ที่อยู่ตรงกลางดังรูปที่ 4.13 (ข) ระหว่างกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าใช้เทปกาวปิดด้านล่างของแผ่นกราฟต์เพื่อป้องกันนิกเกิลถูกเคลือบขึ้นมา นำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ

650°C เวลา 30 นาที ทำให้ SU-8 สลายพันธะและถูกเผาจนหมดเหลือเพียงนิกเกิลและกราฟไฟต์ ดังรูปที่ 4.13 (ค) ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการขัดผิวนิกเกิลให้เรียบ จะขัดจากด้านกราฟไฟต์ลงไป โดยเริ่มขัดชั้นกราฟไฟต์ออกด้วยกระดาษทรายซิลิโคนคาร์ไบด์เบอร์ 1200 กระทั่งปรากฏชั้นนิกเกิล เริ่มขัดผิวนิกเกิลด้วยผ้าขัดมัน DP Mol และผงขัดเพชรขนาด 3 μm หลังจากนั้นขัดด้วยผ้าขัดมัน DP Nap และผงขัดเพชรขนาด 1 μm แล้วจึงขัดล้างผิวหน้านิกเกิลอีกครั้งด้วยผ้าขัดมัน DP Nap ที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น จะได้ช่องทางเดินแก๊สดังรูปที่ 4.13 (ง) ทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง เป่าผิวชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนก่อนนำไปอบกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สด้วยกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าบนฐานกราฟไฟต์ (ก) สร้างเป็นรูปร่างจากกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นหน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (มองด้านข้าง) (ข) ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระทั่งเสมอกับเป็นรูปร่าง (ค) เผาละลายสารไวแสงโฟโตเรซิส SU-8 (ง) ช่องทางเดินแก๊สและผิวหน้านิกเกิลที่ขัดจนเรียบและเป็นเงา

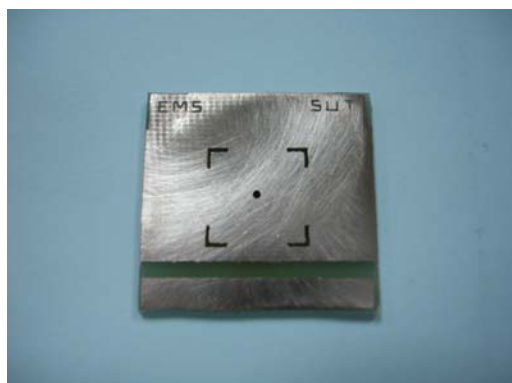
สำหรับปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้างทั้ง 2 วิธีคือ การอุดตันช่องทางเดินแก๊ส จากตะกอนผงขัดเพชรและเศษตะกอนที่เกิดขึ้นจากการขัด เพราะช่องทางเดินแก๊สมีขนาดเล็กมาก และการนำตะกอนที่อุดตันออกเป็นการยากแม้จะใช้แก๊สแรงดันสูงเป่าก็ตาม ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบตลอดเวลาและต้องกำจัดออกทุกครั้ง โดยแก๊สแรงดันสูง กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สและฐานรองนิกิลสำหรับไมโครวาล์วทั้งสองวิธี คือ การสร้างบนฐานทองแดงและการสร้างบนฐานกราฟไฟต์ มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับกระบวนการสร้างบนฐานทองแดงมีข้อดีที่ต้นทุน โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ที่มีชั้นทองแดงซึ่งมีราคาถูกมาเป็นฐานชุบนิกิลด้วยไฟฟ้า แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการสกัดชั้นทองแดงเพื่อปลดปล่อยแผ่นนิกิลออกจากฐานนาน เพราะสามารถกัดเจาะได้เฉพาะด้านข้างเท่านั้น อีกทั้งกระบวนการสร้างมีถึง 8 ขั้นตอน ซึ่งต่างจากการสร้างบนฐานกราฟไฟต์มีเพียง 4 ขั้นตอนเท่านั้นและไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการสกัดชั้นวัสดุ แต่ฐานกราฟไฟต์จะมีข้อเสียที่เกิดการสึกกร่อนได้ง่ายและเปราะ จึงต้องระวังเรื่องเศษผงเกิดขึ้น อีกทั้งมีราคาสูงกว่าแผ่นวงจรพิมพ์มาก

4.3 กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สคุณภาพให้เรียบ

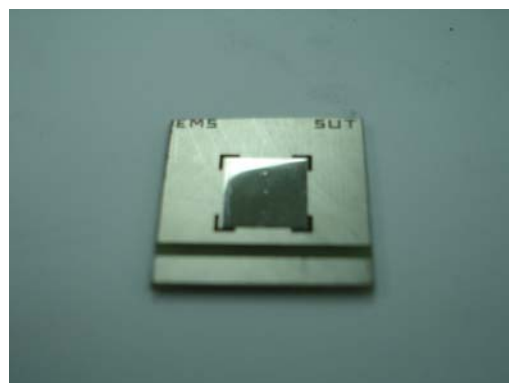
ช่องทางเดินแก๊สที่สร้างขึ้น จะต้องถูกเติมเต็มให้ได้ระดับใกล้เคียงกับฐานรองนิกิลมากที่สุด ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สกระบวนการจะเริ่มด้วยการนำแผ่นทดสอบยึดกับฐานนิกิลเพื่อเป็นจุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้กับไมโครวาล์วฐานทดสอบจะสร้างจากแผ่นลายวงจรและเจาะรูตรงกลางแผ่นด้วยดอกสว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.14 (ก) และก่อนการยึดแผ่นนิกิลกับฐานทดสอบเข้าด้วยกันต้องชุบนิกิลด้วยไฟฟ้าบนชั้นทองแดงก่อน เพื่อป้องกันออกไซด์ที่จะเกิดขึ้นและนำไปทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและคลื่นความถี่สูงในน้ำบริสุทธิ์ ก่อนนำไปอบกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเชื่อมต่อชิ้นงานทั้งสองด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าซึ่งเป็นเรซินชนิดหนึ่งที่สามารถนำไฟฟ้าได้โดยจัดวางให้รูของนิกิลตรงกับรูของฐานทดสอบด้วยการมองส่องกับแสง สิ่งที่ต้องระวังคือ เรซินจะเคลื่อนตัวอุดรูทั้งสอง แผ่นนิกิลที่เชื่อมต่อกับฐานทดสอบเรียบร้อยแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.14 (ข) ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการต่อไป

ช่องทางเดินแก๊สจะถูกเติมเต็มด้วยสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ P4620 เพื่อให้มีระดับใกล้เคียงกับระนาบของนิกิลมากที่สุด ก่อนนำไปเคลือบชั้นโลหะอลูมิเนียม กระบวนการจะเริ่มจากนำแผ่นทดสอบที่ประกบติดกับแผ่นนิกิลมาเป่าทำความสะอาดด้วยแก๊สไนโตรเจน และพลิกด้านที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ขึ้น ดังรูปที่ 4.15 (ก) หลังจากนั้นจึงหยดสารไวแสงโฟโตริซิส AZ P4620 ประมาณ 2 หยด ให้ตรงกับรูที่เจาะไว้ สารไวแสงโฟโตริซิสจะไหลลงในรูเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.15 (ข) เมื่อทำการต่อท่อสายน้ำเกลือกับปั๊มดูดอากาศ และประกบติดกับแผ่นนิกิลด้านล่าง โดย

พิจารณาให้ตรงกับรูปมากที่สุด สารไวแสงโฟโตริซิสจะถูกคัดออกมาซึ่งสามารถสังเกตได้ จากสีแดงของสารไวแสงโฟโตริซิส แสดงดังรูปที่ 4.15(ก) และ 4.16(ก) ต่อมานำชิ้นงานไปดูอากาศที่ตกค้างภายในสารไวแสงออกในตู้สุญญากาศเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงแห้งสนิท ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำกระดาษที่ขูดอะซีโตนให้หมด เช็ดสารไวแสงโฟโตริซิสด้านแผ่นลายวงจรให้สะอาด ดังรูปที่ 4.15 (ง) แล้วจึงนำชิ้นงานไปขัดผิวด้านนิกเกิลด้วยผ้าขัด DP MoI และผงขัดเพชร ขนาด 3 μm จนกระทั่งสารไวแสงที่ผิวถูกขัดออกจนหมด ขัดต่อด้วยผ้าขัด DP Nap และผงขัดเพชร ขนาด 1 μm และทำความสะอาดผิวด้วยผ้าขัด DP Nap โดยใช้น้ำสะอาดเป็นสารหล่อลื่น ดังรูปที่ 4.15 (จ) และ 4.16 (ข) นำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงโฟโตริซิสแข็งตัวมากที่สุด ขั้นตอนสุดท้าย คือ การเตรียมผิวนิกเกิลก่อนนำไปเคลือบอลูมิเนียม โดยทำความสะอาดด้วยพลาสมาออกซิเจน ที่ความดัน 0.3 mbar 100 W เป็นเวลา 2 นาที เพื่อนำสารไวแสงโฟโตริซิสที่ตกค้างบนผิวนิกเกิลออกให้หมด



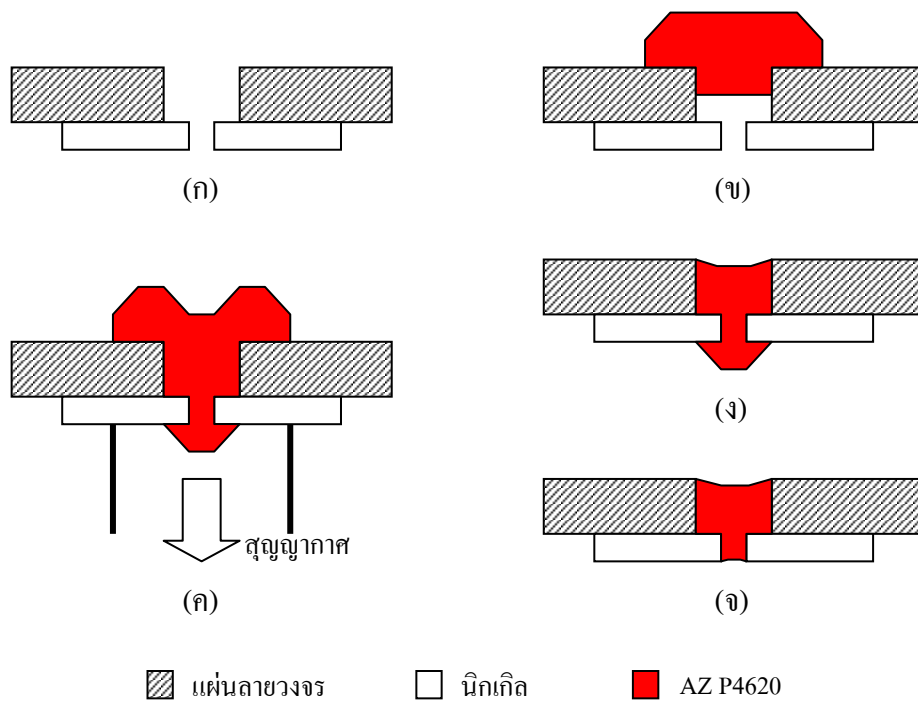
(ก)



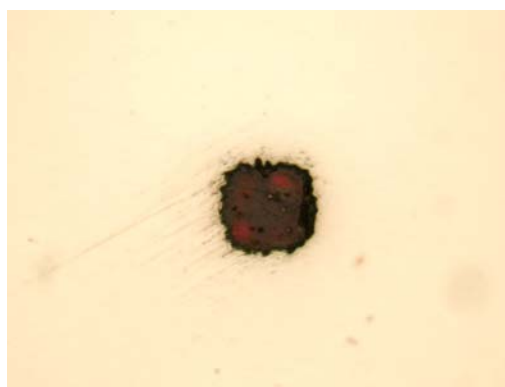
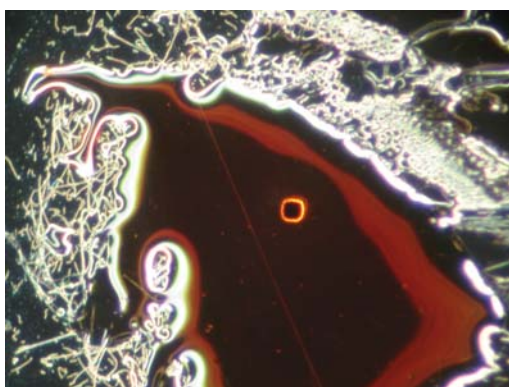
(ข)

รูปที่ 4.14 แผ่นทดสอบที่สร้างจากแผ่นลายวงจร (ก) แผ่นทดสอบที่ทำหน้าที่ยึดฐานนิกเกิลซึ่งชั้นทองแดงยังไม่ได้ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า (ข) แผ่นนิกเกิลที่ติดตั้งบนแผ่นทดสอบโดยเชื่อมต่อกับกาวเงิน

ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือการประกบติดระหว่างแผ่นนิกเกิล และฐานไม่สนิทและมีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าสัมผัส ทำให้สารไวแสงไหลออกมาระหว่างการอบ ดังรูปที่ 4.17 แนวทางแก้ไขคือการล้างสารไวแสงออกให้หมดด้วยอะซีโตน นำแผ่นนิกเกิลออกจากฐานทดสอบ มาทำความสะอาดและนำมาประกบติดกันอีกครั้ง



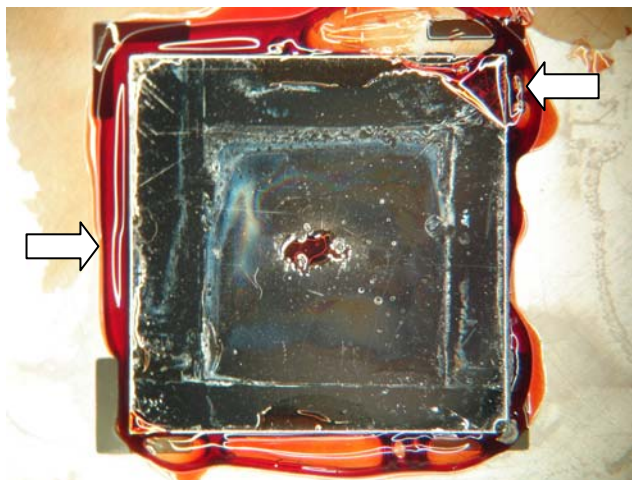
รูปที่ 4.15 กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ (ก) แผ่นทดสอบประกบกับฐานรองนิกเกิลคว่ำ
 หน้าลง (ข) หยอดสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ 4620 (ค) ฉูดสารไวแสงให้ไหลออกมาที่ผิว
 นิกเกิล (ง) เช็ดสารไวแสงทางด้านแผ่นทดสอบออก (จ) ชัดผิวหน้าชิ้นงานให้ช่องทาง
 เดินแก๊สเรียบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.16 การทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบด้วยสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ P4620 (ก) สารไวแสงถูก
 ฉูดให้ไหลออกมาปิดช่องทางเดินแก๊ส (ข) ช่องทางเดินแก๊สภายหลังการขัดให้ได้ระนาบ
 เดียวกับนิกเกิล



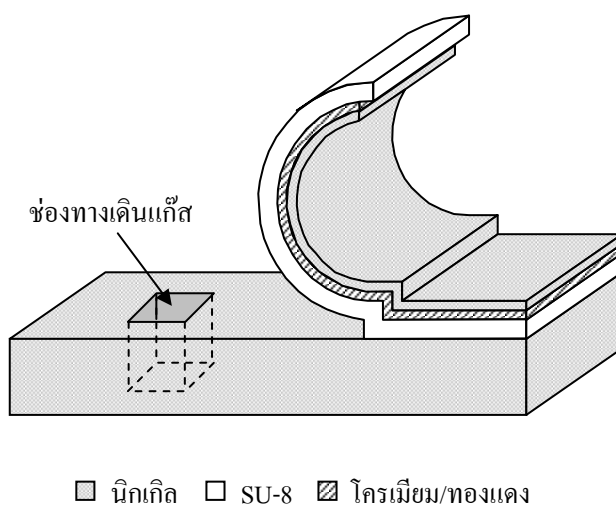
รูปที่ 4.17 สารไวแสงไหลออกมาจากการประกบติดของแผ่นนิกเกิลกับฐานที่ไม่สนิท

4.4 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส

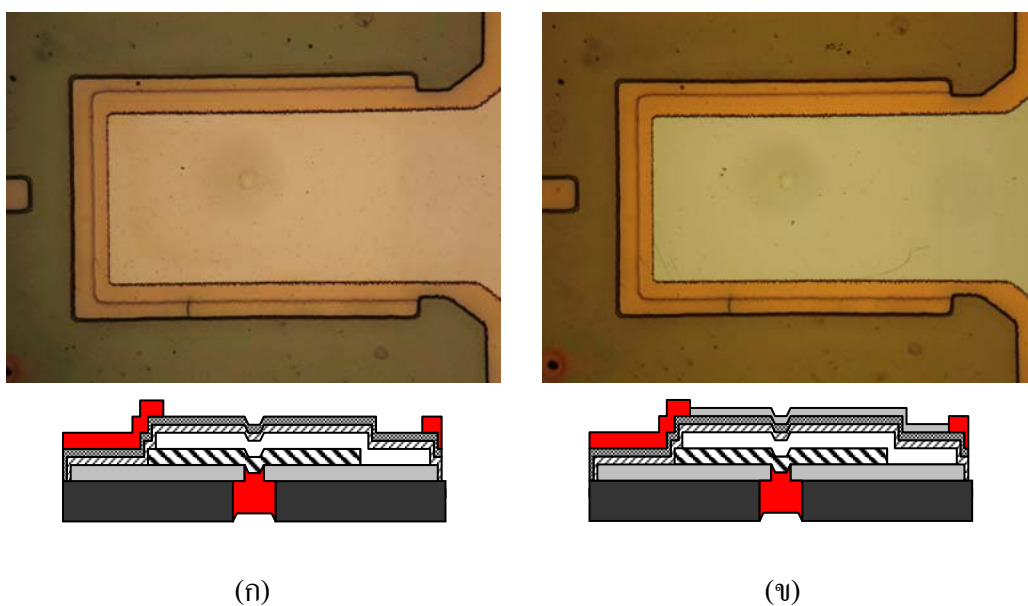
โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระจะถูกสร้างขึ้นบนช่องทางเดินจุลภาคเพื่อทำหน้าที่เป็นการไหลของแก๊ส ดังรูปที่ 4.18 โครงสร้างหลักของแผ่นคานคือวัสดุพอลิเมอร์ SU-8 ทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริกป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำไฟฟ้าด้านล่างซึ่งเป็นฐานรองนิกเกิลและตัวนำไฟฟ้าด้านบนที่สร้างจากการซ้อนทับชั้นโลหะโครเมียม ทองแดงและนิกเกิล ตามลำดับ ฐานรองนิกเกิลและช่องทางเดินจุลภาคที่ผ่านกระบวนการทำให้เรียบจะถูกนำมาเคลือบชั้นโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศ ซึ่งจะให้ความหนาประมาณ $0.5 \mu\text{m}$ และสร้างลวดลายเป็นก้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $1,140 \mu\text{m} \times 820 \mu\text{m}$ โดยใช้สารไวแสงโฟโตริซิส AZ 1512 เป็นมาสก์ในการสกัดชั้นอะลูมิเนียม หลังจากนั้นจึงเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2002 และสร้างลวดลายโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระโดยมีปลายด้านหนึ่งแนบติดกับฐานรองและอีกด้านวางพาดบนชั้นอะลูมิเนียม สำหรับตัวนำไฟฟ้าด้านบนบนแผ่นคานจะใช้กระบวนการสปีดเตอร์ริงเคลือบชั้นโครเมียมและทองแดงตามลำดับ และสร้างเข้าขั้นรูปสำหรับการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าลงบนผิวทองแดงที่วางพาดอยู่บนแผ่นคานด้วยสารไวแสงโฟโตริซิส AZ 1512 ซึ่งโครงสร้างที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก)

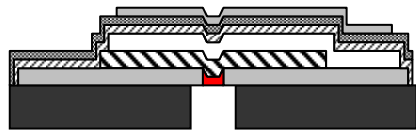
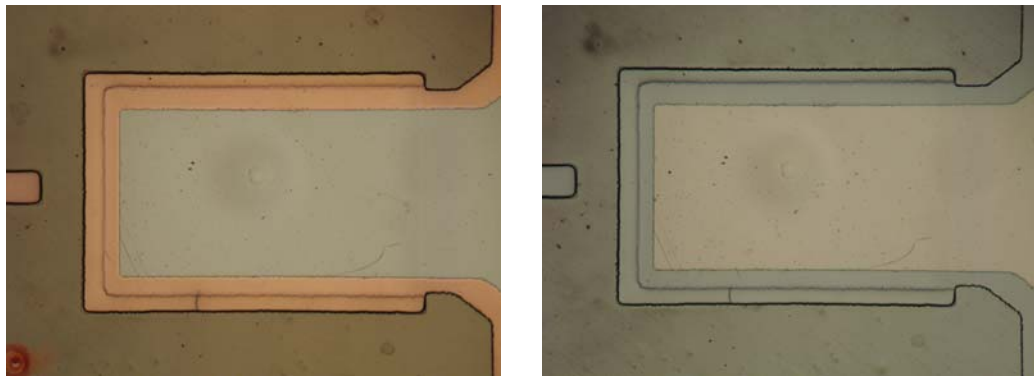
หลังจากสร้างชั้นนิกเกิลขึ้นมาในเข้าขั้นรูปด้วยกระบวนการชุบด้วยไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.19 (ข) แล้วสารไวแสงโฟโตริซิส AZ จึงถูกล้างออกในอะซิโตน โดยที่สารไวแสงที่อุดช่องทางเดินแก๊สจะละลายตัวออกมาได้ส่วนหนึ่ง แต่ยังคงค้างอยู่ภายในรูของช่องนิกเกิล ดังรูปที่ 4.19 (ค) หลังจากนั้นจึงสกัดทองแดงออกและจะปรากฏชั้นโครเมียมดังรูปที่ 4.19 (ง) นำไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ชิ้นงานแห้งสนิทก่อนนำมากำจัดสารไวแสงที่ตกค้างอยู่ในช่องทางเดินแก๊สด้วย

กระบวนการกัดด้วยพลาสมาของออกซิเจนที่ความดัน 0.5 mbar 200 W ประมาณ 7 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ช่องทางเดินแก๊สดังรูปที่ 4.21 ชั้นโครเมียมจะถูกสกัดเป็นลำดับต่อมาดังรูปที่ 4.20 (ก) และขั้นตอนสุดท้ายจึงสกัดอลูมิเนียมทิ้งเพื่อปลดปล่อยโครงสร้างแผ่นคานให้โค้งตัวขึ้น ดังรูปที่ 4.20(ข) แล้วจึงล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์และดึงน้ำออกจากโครงสร้างด้วยเมซิลแอลกอฮอล์ประมาณ 30 นาที วางชิ้นงานไว้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป่าแก๊สไนโตรเจนเข้าทางด้านล่างของรูเพื่อยกแผ่นคานให้โค้งตัวขึ้นป้องกันการแนบติดยึดกับฐานและอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นและเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นไดอิเล็กทริก ก่อนนำมาทดสอบการทำงานเป็นลำดับถัดไป

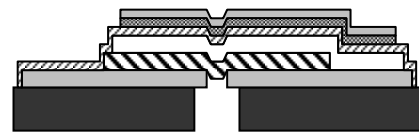


รูปที่ 4.18 โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นเหนือช่องทางเดินแก๊ส





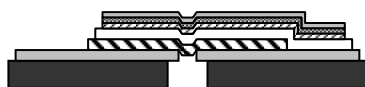
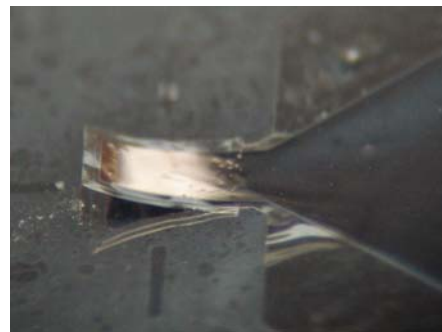
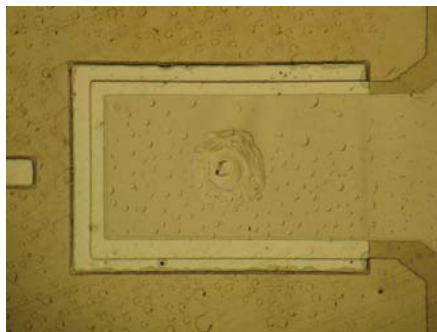
(ค)



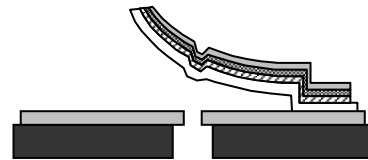
(ง)

- | | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------|
| ■ แผ่นลายนวงจร | ■ สสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ | □ สสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8 2002 | ■ ทองแดง |
| ■ นิกเกิล | ▨ อลูมิเนียม | ▨ โครเมียม | |

รูปที่ 4.19 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สจุลภาค



(ก)



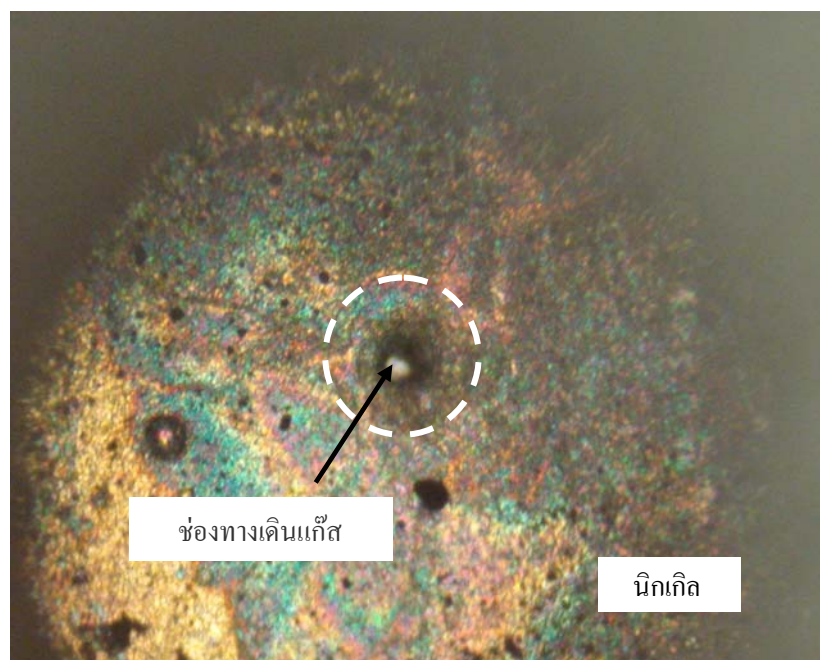
(ข)

- | | | | |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|----------|
| ■ แผ่นลายนวงจร | ■ สสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ | □ สสารไวแสงโฟโตรีซิส SU-8 2002 | ■ ทองแดง |
| ■ นิกเกิล | ▨ อลูมิเนียม | ▨ โครเมียม | |

รูปที่ 4.20 กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สจุลภาค (ต่อ)

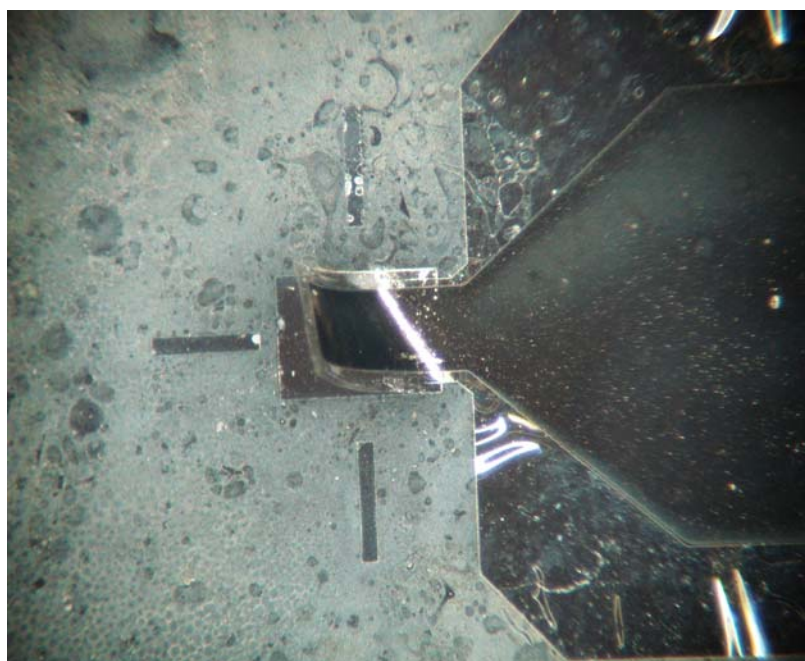
4.5 สรุป

กระบวนการพัฒนาโครงสร้างไมโครวาล์วถูกพัฒนาขึ้นมา โดยเริ่มตั้งแต่ทดสอบการโค้งตัวของแผ่นคานปลายอิสระที่สร้างบนฐานกระจก เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำโครงสร้างดังกล่าวมาพัฒนาเป็นแผ่นปิด-เปิดการไหลของแก๊ส หลังจากนั้นจึงได้ดำเนินการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคขึ้นพร้อมกับฐานรองนิกเกิล ด้วยการสร้างเบ้าขึ้นรูปโครงสร้างฐานรองและช่องทางเดินจุลภาค ผ่านกระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจากสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 2100 โดยมีฐานรองนิกเกิลที่หนาประมาณ $200\ \mu\text{m}$ สร้างจากกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า สามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ จากการใช้ฐานทองแดงเป็นฐานชุบนิกเกิลขึ้นมา ซึ่งจำเป็นต้องใช้กระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนาถึง 2 ครั้ง เพื่อให้ได้เบ้าขึ้นรูปที่ต้องการ อีกทั้งใช้เวลาในการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวหรือชั้นทองแดงนาน และมีขั้นตอนการสร้างมากกว่า อีกวิธีการหนึ่ง คือ การใช้ฐานกราไฟต์เป็นฐานในการชุบนิกเกิลซึ่งใช้กระบวนการสร้างลวดลายแบบชั้นหนาเพียง 1 ครั้ง และมีขั้นตอนการสร้างที่น้อยกว่า แต่ต้องระวังเรื่องเศษผงที่เกิดจากการขัดถู ทำให้ชิ้นงานสกปรกได้ สำหรับการเตรียมฐานรองนิกเกิลนั้นต้องผ่านกระบวนการขัดผิวหน้าให้เรียบ ซึ่งต้องระมัดระวังการอุดตันของเศษตะกอนที่เกิดจากการขัดที่จะมาอุดตันช่องทางเดินแก๊ส และต้องควบคุมระดับการขัดไม่ให้มากจนแผ่นนิกเกิลบางส่งผลให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 4.21 ช่องทางเดินแก๊สที่ผ่านการกัดสารไวแสง AZ ด้วยพลาสมาของออกซิเจน (มองจากด้านหลังแผ่น)

ในขั้นต่อมา แผ่นฐานรองนิกเกิลจะเข้าสู่กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ โดยทำการอุดช่องทางเดินแก๊สด้วยสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดบวก AZ P4620 และผ่านการขัดให้ระนาบของสารไวแสงที่สันออกมาใกล้เคียงกับผิวนิกเกิล เพื่อเตรียมผิวของฐานรองเข้าสู่กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊สต่อไป สิ่งสำคัญในกระบวนการสร้างคือการสกัดชั้นโลหะแต่ละชั้นต้องเป็นไปตามลำดับชั้น ทั้งนี้แล้วสารละลายที่ใช้สกัดโลหะชั้นบนจะต้องไม่สกัดโลหะด้านล่างออกไป หรือมีอัตราการสกัดที่ต่ำมาก และการสกัดโลหะด้านล่างจะใช้โลหะด้านบนเป็นตัวป้องกัน (hard mask) ซึ่งต้องระวังการกัดเซาะทางด้านล่าง สำหรับโครงสร้างไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระที่ได้ทำสร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระ (มุมมองจากด้านบน)

บทที่ 5

การวัดและทดสอบการทำงานของไมโครวาล์ว

ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระที่ผ่านกระบวนการสร้าง จะถูกนำมาวัดระดับการยกตัวของแผ่นคานซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นภายในชั้นวัสดุและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หลังจากนั้นจึงเข้าสู่การทดสอบการทำงานในสถานะที่ไม่มีแรงดันแก๊ส โดยป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าระหว่างฐานรองและแผ่นคาน เพื่อหาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้แผ่นคานเริ่มเคลื่อนที่และแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้แผ่นคานแนบติดกับฐานรอง ขั้นตอนทดสอบสุดท้ายคือการป้อนแรงดันแก๊สเข้าสู่ไมโครวาล์วเพื่อประมาณอัตราการไหลของมวลแก๊สและระดับแรงดันไฟฟ้าแนบติดที่สามารถปิดช่องทางเดินแก๊สในสถานะที่มีแรงดันแก๊สได้แผ่นปิดได้

5.1 แผ่นคานโค้งปลายอิสระภายหลังการปลดปล่อยโครงสร้าง

โครงสร้างไมโครวาล์วที่สร้างขึ้นจะถูกตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเครื่อง Optical profiler รุ่น Wyko NT1100 ดังตารางที่ 5.1 และภายหลังการสกัดชั้นอลูมิเนียมซึ่งวัสดุชั่วคราว แผ่นคานจะถูกปลดปล่อยโครงสร้างออกจากฐานรองและโค้งตัวขึ้นตามความเค้นภายในชั้นวัสดุ (σ) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ดังรูปที่ 5.1 โดยมีระยะความสูงที่ปลายคานที่ได้จากการวัด (δ) ประมาณ $272.9 \mu\text{m}$ ซึ่งเมื่อนำระยะดังกล่าวไปคำนวณในสมการที่ (3-9) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-1) จะสามารถประมาณรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานปลายอิสระ (ρ) ได้เท่ากับ 1.93 mm และเมื่อนำรัศมีส่วนโค้งมาคำนวณหาระยะยกตัวตามความยาวแผ่นคาน $c(x_{beam})$ ในสมการที่ (3-10) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-2) จะได้ผลเฉลยดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยกำหนดให้แผ่นคานในสถานะเริ่มต้นอยู่ในระนาบปกติหรือไม่มีรัศมีส่วนโค้งเริ่มต้น ($1/\rho_0 = 0$)

$$\delta = \rho \left(1 - \cos \frac{L_{beam}}{\rho} \right) \quad (5-1)$$

$$c(x_{beam}) = \frac{x_{beam}^2}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (5-2)$$

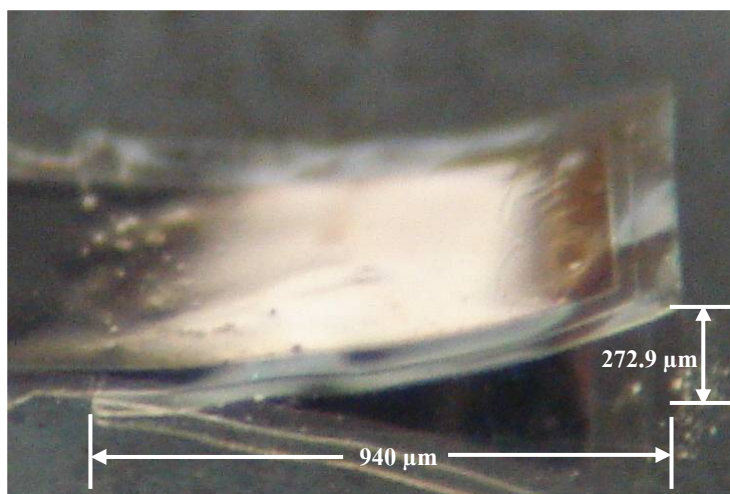
สำหรับการประมาณค่าขนาดความเค้นภายในชั้นวัสดุ ที่มีผลทำให้แผ่นคานเกิดการโค้งตัว

ชั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3-7) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-3) โดยพิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ SU-8 ที่มีความหนาเท่ากับ $2.5 \mu\text{m}$ และไม่พิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นโลหะ ($\sigma_{Ni} = 0$) เนื่องจากมีความบางมากเท่ากับ $0.224 \mu\text{m}$ รวมทั้งไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($\Delta T = 0$) ดังนั้นจะได้ความเค้นภายในแผ่นคาน (σ_{su8}) เท่ากับ 4.55 MPa ซึ่งเป็นขนาดความเค้นที่ทำให้แผ่นคานมีการโค้งตัวดังรูปที่ 5.1

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(\alpha_{su8} - \alpha_{Ni})\Delta T - \frac{\sigma_{su8}}{E_{su8}} + \frac{\sigma_{Ni}}{E_{Ni}}}{\frac{t_{beam}}{2} + \frac{E_{su8}t_{su8}^3 + E_{Ni}t_{Ni}^3}{6t_{beam}} \left(\frac{1}{E_{su8}t_{su8}} + \frac{1}{E_{Ni}t_{Ni}} \right)} \quad (5-3)$$

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของไมโครวาล์ว

คุณลักษณะ	SU-8	นิกเกิล
ความยาว	940 μm	840 μm
ความกว้าง	620 μm	520 μm
ความหนา	2.5 μm	0.224 μm
ค่ามอดูลัสของยัง	4.5 GPa	220.5 GPa
สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิ	50 ppm/K	13.3 ppm/K
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	3.5	-



รูปที่ 5.1 แผ่นคานปลายอิสระโค้งตัวขึ้นภายหลังสกัดชั้นวัสดุชั่วคราว

ระยะยกตัวขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระดังรูปที่ 5.2 นำมาใช้หาค่าแรงดันไฟฟ้าแบบคิดในสถานะปกติเมื่อไม่มีแรงดันแก๊สกระทำทำให้แผ่นปิดด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3-19) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-4) โดยจะข้อมูลที่ได้จากการวัดในตารางที่ 5.1 มาผ่านการคำนวณด้วยวิธีผลต่างอันดับ (finite difference) ซึ่งกำหนดเงื่อนไขขอบในการแก้ปัญหาดังสมการที่ (5-5) ถึง (5-8) สำหรับค่าความแข็งดิ่งสมมูลของโครงสร้างแผ่นคาน $(EI)_{equiv}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5-9) (Shigley, and Mitchell, 1983)

$$(EI)_{equiv} \frac{d^4 z}{dx^4} = -\frac{\varepsilon_0 w_{beam} V^2}{2 \left(g + \frac{d}{\varepsilon_r}\right)^2} \left(1 + 0.65 \frac{\left(g + \frac{d}{\varepsilon_r}\right)}{w_{beam}}\right) \quad (5-4)$$

$$z(x=0) = 0 \text{ ไม่มีการเบนที่จุดยึดปลายแผ่นคานหรือที่จุด } x = 0 \quad (5-5)$$

$$\frac{dz}{dx}(x=0) = 0 \text{ ความชันของการเบนที่จุดยึดปลายเป็นคานเป็นศูนย์} \quad (5-6)$$

$$\frac{d^2 z}{dx^2}(x=L) = 0 \text{ ไม่มีโมเมนต์กระทำที่ปลายอิสระของแผ่นคาน} \quad (5-7)$$

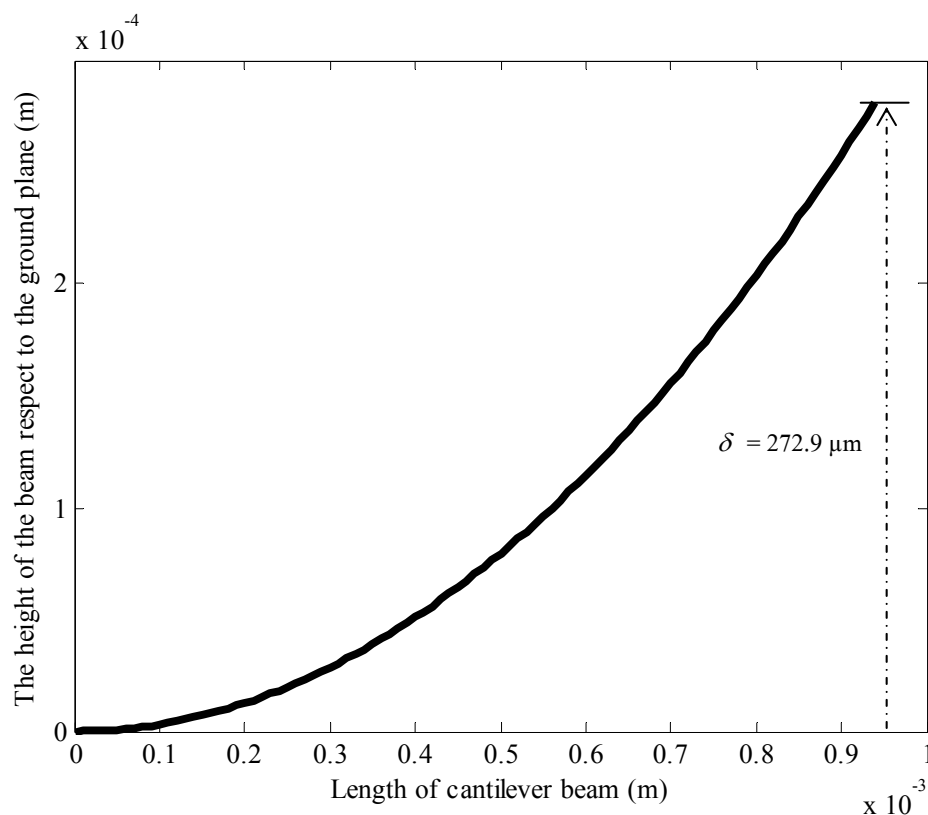
$$\frac{d^3 z}{dx^3}(x=L) = 0 \text{ ไม่มีแรงเฉือนกระทำที่ปลายอิสระของแผ่นคาน} \quad (5-8)$$

$$(EI)_{equiv} = \frac{E_{Ni} \cdot w_{su8} \cdot t_{Ni}^3}{12(1 + m \cdot n)} \cdot K \quad (5-9)$$

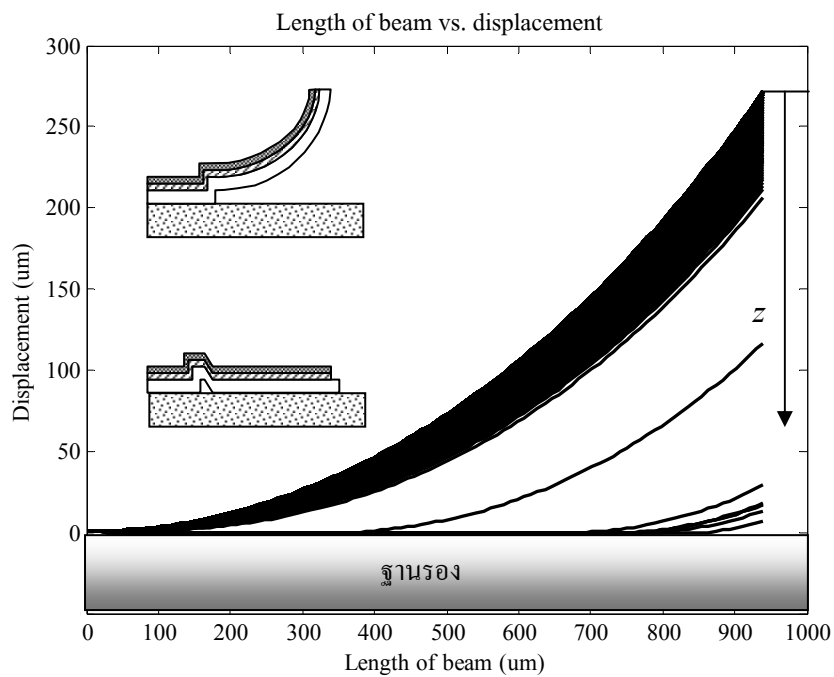
เมื่อ $K = 1 + 4m \cdot n + 6m \cdot n^2 + 4m \cdot n^3 + m^2 \cdot n^4$, $m = E_{su8}/E_{Ni}$, $n = t_{su8}/t_{Ni}$, E_{Ni} คือ มอดูลัสของยังในชั้นโลหะนิกเกิล E_{su8} คือ มอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ SU-8 t_{Ni} คือ ความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล t_{su8} คือ ความหนาของชั้นวัสดุ SU-8 และ w_{su8} คือ ความกว้างของแผ่นคานชั้นวัสดุ SU-8

การหาผลเฉลยของสมการ (5-4) จะใช้วิธีทำซ้ำ โดยเริ่มจากการคำนวณแรงไฟฟ้าสถิตเมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าป้อนเข้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า ด้วยระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในสถานะเริ่มต้น และแรงที่ได้จะใช้คำนวณหาระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคาน เมื่อแผ่นคานเคลื่อนที่ลงมา

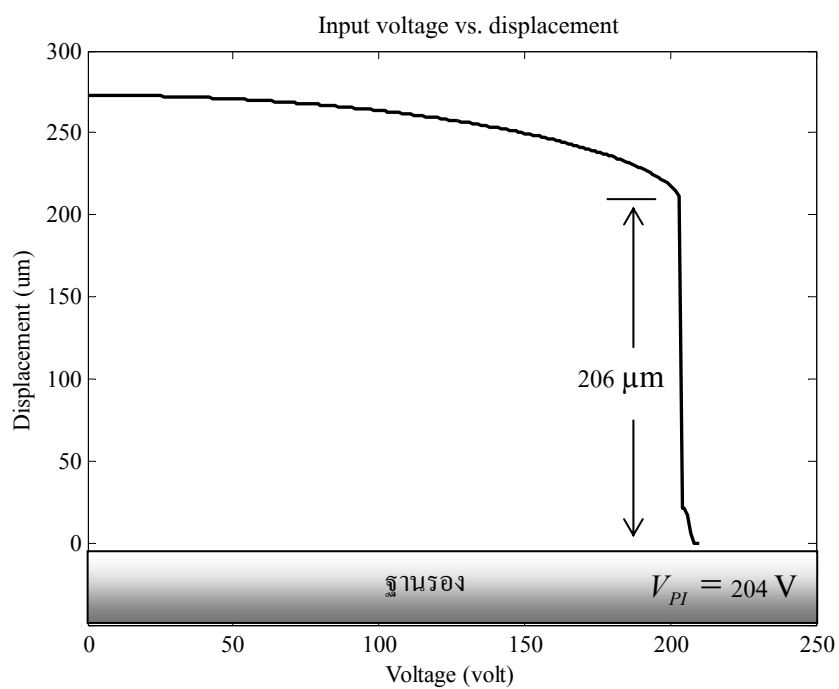
ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าเปลี่ยนไป และถูกนำไปคำนวณหาแรงไฟฟ้าสถิตอีกครั้ง โดยกระบวนการคำนวณจะทำซ้ำจะกระทั่งผลเฉลยคู่เข้าหาคำตอบ เช่น เมื่อผลเฉลยจากการทำซ้ำสองครั้งมีค่าใกล้เคียงกันมากประมาณ 0.0001 ซึ่งจะเป็นจุดที่ถูกประมาณการเกิดความสมดุลระหว่างแรงไฟฟ้าสถิตและแรงทางกลของแผ่นคาน และถ้าแรงดันไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าแนบติด V_{PI} แผ่นคานก็จะเคลื่อนที่ลงมาแนบกับฐานด้านล่างทันทีทันใด ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อแทนค่าคุณลักษณะไมโครวาล์วในตารางที่ 5.1 โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าแนบติดซึ่งแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิดลงมาแนบติดกับฐานรองรับรูปที่ 5.3 (ก) และระยะห่างของปลายแผ่นคานกับฐานรองรับรูปที่ 5.3 (ข) ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะให้แรงดันแนบติดเท่ากับ 204 โวลต์ โดยมีระยะห่างระหว่างปลายแผ่นคานกับฐานรองรับก่อนการแนบติดที่ 206 ไมโครเมตร โดยแผ่นคานจะลงมาแนบกับฐานทันทีเมื่อความแรงดันไฟฟ้ามากกว่าค่าความแรงดันไฟฟ้าแนบติด ซึ่งเป็นจุดที่แรงไฟฟ้าสถิตมากกว่าแรงทางกลของแผ่นคานและเป็นกลไกสำคัญของไมโครวาล์วในการนำไปใช้ปิดการไหลของแก๊ส



รูปที่ 5.2 การโค้งขึ้นของแผ่นคานปลายอิสระที่นำข้อมูลจากการวัดมาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



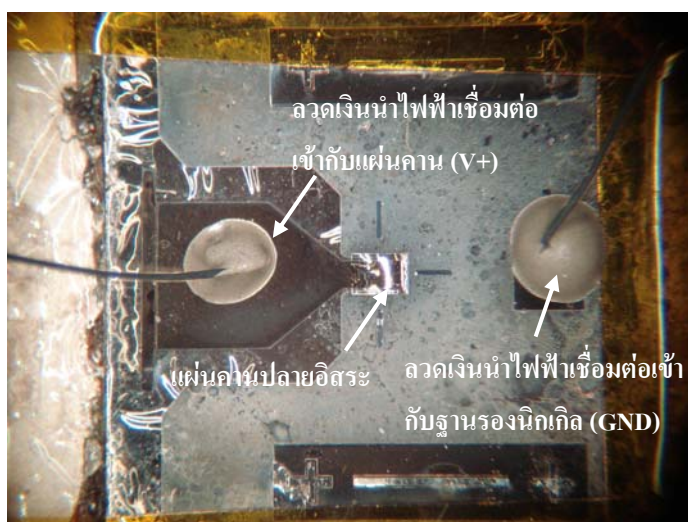
(ก)



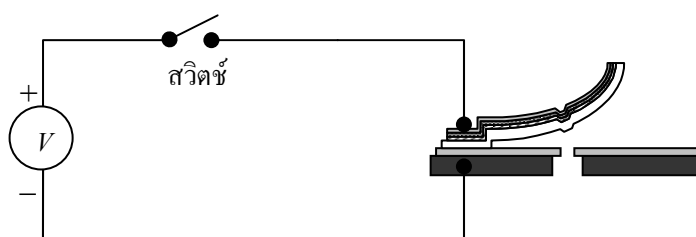
(ข)

รูปที่ 5.3 ผลจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นคานโค้งปลายอิสระด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (ก) พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแผ่นคานเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า (ข) ระดับความสูงของปลายแผ่นคานจากฐานรองเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

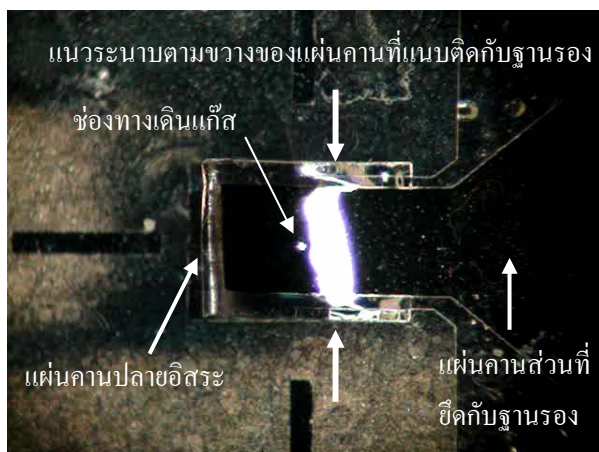
ไมโครวาล์วที่ผ่านการสร้างจะเข้าสู่กระบวนการทดสอบการทำงานในสถานะที่ไม่มีแรงดันแก๊สกระทำใฝ่แผ่นปิด เพื่อศึกษาถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้แผ่นคานเริ่มเคลื่อนที่จนกระทั่งสามารถปิดช่องทางเดินแก๊สได้ การป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ไมโครวาล์วจะใช้ลวดเงินนำไฟฟ้าต่อเข้ากับฐานรองนิกเกิลและแผ่นคานด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าดังรูปที่ 5.4 และนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้กาวเงินแห้งสนิท แล้วจึงดำเนินการทดสอบเพื่อหาระดับแรงดันไฟฟ้าแนบติดต่อไป สำหรับการเคลื่อนที่ของแผ่นคานปลายอิสระในสภาวะปกติ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเข้าระหว่างฐานรองนิกเกิลและแผ่นคานปลายอิสระ จะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง โดยมีทิศทางพุ่งลงมาส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นและดึงแผ่นปิดให้เคลื่อนที่ลงมาที่ฐาน วงจรไฟฟ้าที่ติดตั้งในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยจะป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านสวิตช์เป็นจังหวะเพื่อให้แผ่นคานมีการคืนสภาพเดิมภายหลังการเคลื่อนที่ลง ซึ่งสามารถลดความเสียหายของชิ้นงานได้ในกรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูง



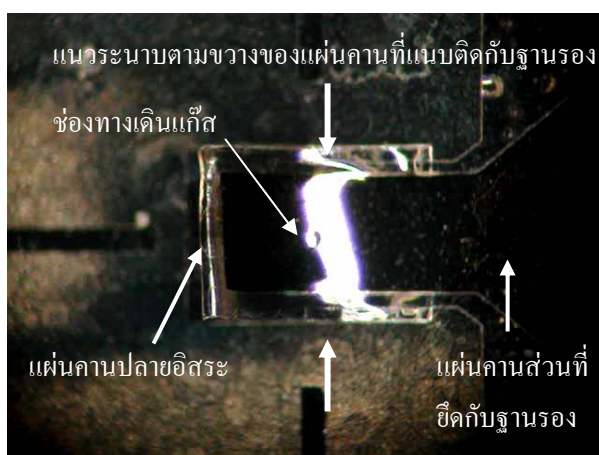
รูปที่ 5.4 การเชื่อมต่อลวดเงินนำไฟฟ้าเข้าชิ้นงานก่อนการทดสอบ (มุมมองด้านบน)



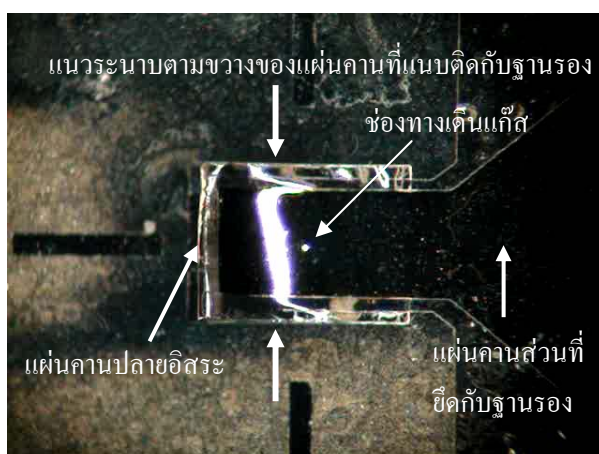
รูปที่ 5.5 วงจรทดสอบการทำงานของไมโครวาล์ว



(ก)



(ข)



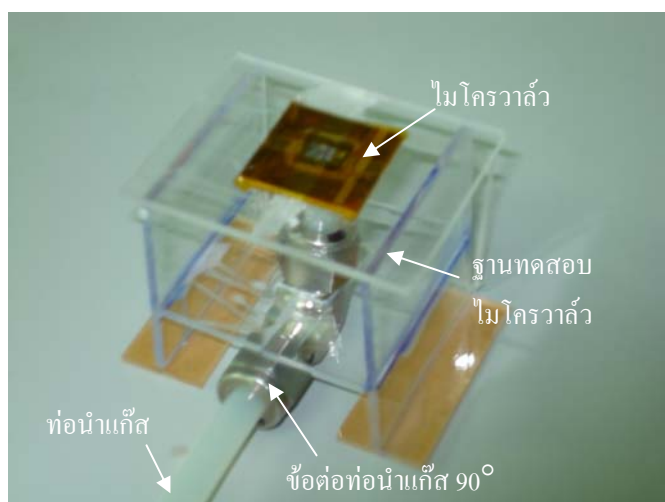
(ค)

รูปที่ 5.6 การเคลื่อนที่ของแผ่นคานปลายอิสระเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ (ก) แรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์ (ข) แรงดันไฟฟ้า 150 โวลต์ (ค) แรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า แผ่นคานปลายอิสระจะเคลื่อนที่ลงมาตามขนาดอินพุตที่ป้อน โดยแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้แผ่นคานเริ่มเคลื่อนที่ประมาณ 30 โวลต์ และเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง 150 โวลต์ แผ่นคานจะมีการเคลื่อนที่ลงมามากขึ้นและเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าจนถึง 200 โวลต์ แผ่นคานจะเคลื่อนที่ลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สดังรูปที่ 5.6 ระดับแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวเป็นแรงดันไฟฟ้าแบบคิดที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ 204 โวลต์ สอดคล้องกับการทดลองที่ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปิดช่องทางเดินแก๊สเท่ากับ 200 โวลต์

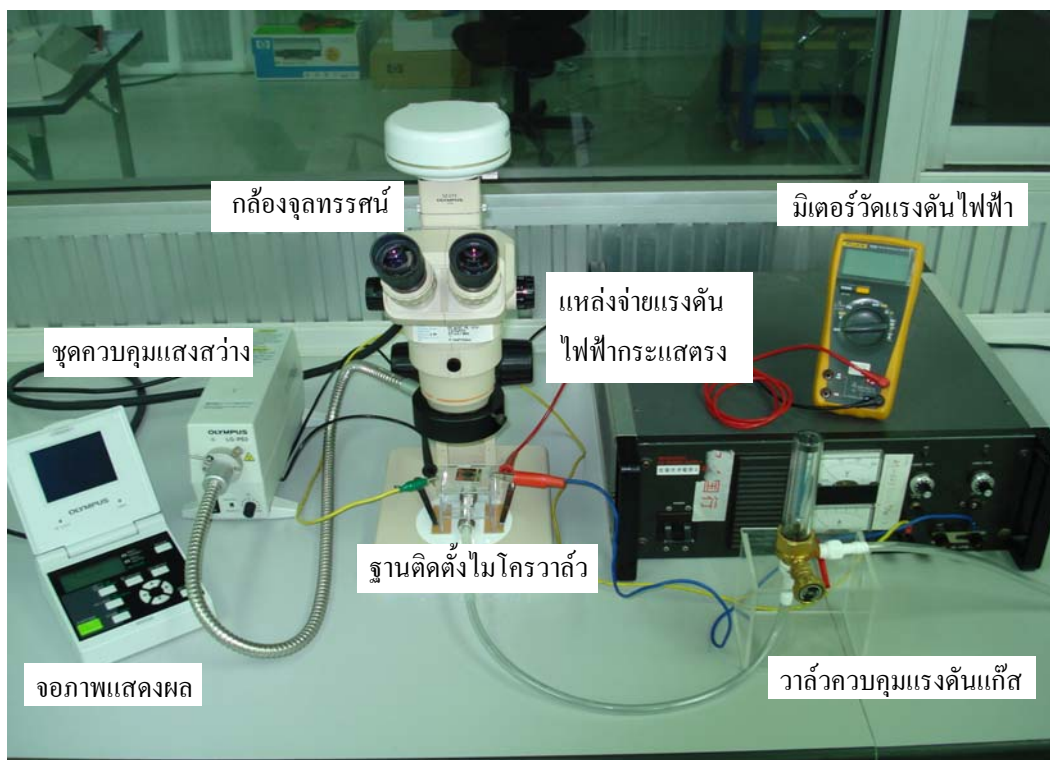
5.2 การเคลื่อนที่ของแผ่นคานปลายอิสระเมื่อมีแรงดันแก๊สกระทำทำให้แผ่นปิด

แรงดันแก๊สที่ผ่านขึ้นมาจากช่องทางเดินแก๊สขนาด $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ สามารถตรวจสอบได้จากการยกตัวขึ้นของแผ่นปิด โดยการปล่อยแก๊สในโตรเจนผ่านวาล์วปรับแรงดันแก๊สเข้าสู่ช่องทางด้านล่างผ่านฐานทดสอบ การเตรียมชิ้นงานจะเริ่มจากการปิดช่องทางรั่วไหลของแก๊สระหว่างฐานรองนิกเกิลและแผ่นวงจรมพิมพ์ด้วยกาวที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง โดยทาการอบฐานรองนิกเกิลและปล่อยไว้ให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงติดตั้งท่อแก๊สเข้าสู่ฐานด้านล่างของแผ่นวงจรมพิมพ์ด้วยกาวที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูงและปล่อยไว้ให้แห้งประมาณ 12 ชั่วโมง แล้วจึงนำเทปพอลิไธไมด์ปิดรอบฐานรองนิกเกิลอีกครั้งและนำเข้าติดตั้งกับฐานทดสอบไมโครวาล์วดังรูปที่ 5.7 โดยมีท่อนำแก๊สเชื่อมต่อกับวาล์วควบคุมแรงดันแก๊สซึ่งสามารถวัดระดับแรงดันแก๊สได้ต่ำสุดเท่ากับ 10 psi หรือ 68.94 kPa การติดตั้งฐานทดสอบไมโครวาล์วเพื่อตรวจสอบการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงทำหน้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 5.7 การเตรียมไมโครวาล์วเพื่อการทดสอบ

บวกรวมเข้าสู่แผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและแรงดันไฟฟ้าลบเข้าที่ฐานรองนิกเกิล โดยใช้มิเตอร์ดิจิตอลตรวจสอบขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครวาล์ว การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของแผ่นกานจะใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงซึ่งสามารถควบคุมระดับแสงสว่างและตรวจสอบการเคลื่อนที่ผ่านจอภาพแสดงผลได้และใช้วาล์วควบคุมแรงดันแก๊สที่จะเข้าสู่ไมโครวาล์ว



รูปที่ 5.8 การติดตั้งชุดทดสอบไมโครวาล์ว

ระดับแรงดันแก๊สต่ำที่สุดที่สามารถดันแผ่นปิดให้ยกตัวขึ้นจากสถานะปกติที่แสดงในรูปที่ 5.9 (ก) มีค่าประมาณ 10 psi หรือ 69 kPa ซึ่งแผ่นปิดจะมีการยกตัวขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 5.9 (ข) และเมื่อปรับวาล์วควบคุมแรงดันแก๊สเพิ่มขึ้นเป็น 20 psi หรือ 138 kPa แผ่นปิดจะมีระดับการยกตัวสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ค) ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มระดับการยกตัวของแผ่นปิดที่มีค่าแปรผันตามขนาดแรงดันแก๊สที่ผ่านเข้าสู่ไมโครวาล์ว โดยการควบคุมขนาดแรงดันแก๊สผ่านวาล์วควบคุมซึ่งสามารถตรวจวัดแรงดันแก๊สได้ระดับต่ำสุดที่ 10 psi

$$\dot{m}_{\text{sinic}} = C_i A_{\text{eff}} P_s \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5-10)$$

เมื่อ $p_e/p_s < (2/(\gamma+1))^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$ เข้าสู่การไหลความเร็วเท่ากับเสียง โดยมีค่าคงที่ของแก๊สในโตรเจน สัมพัทธ์ต่อน้ำหนักโมเลกุล (R) เท่ากับ 0.2968 และอุณหภูมิ (T) เท่ากับ 298.15 เคลวิน (25.15 องศาเซลเซียส)

$$\dot{m}_{subsonic} = C_i A_{eff} p_s \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT} \left[\left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_e}{p_s} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (5-11)$$

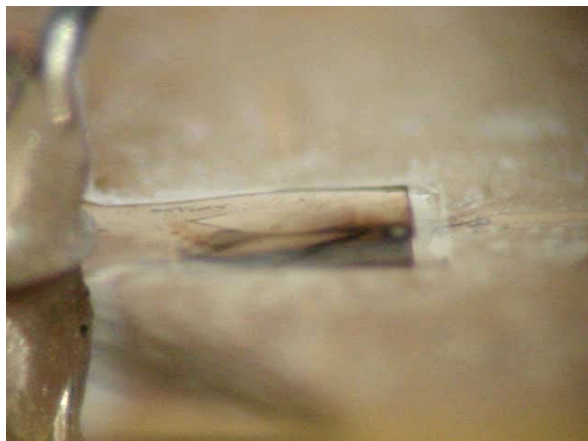
เมื่อ $p_e/p_s > (2/(\gamma+1))^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$ เข้าสู่การไหลความเร็วต่ำกว่าเสียง

พิจารณาอัตราการไหลของมวลแก๊สสำหรับการไหลความเร็วเท่ากับเสียง ด้วยการตั้งสมมติฐานว่าไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างการไหลผ่านช่องทางเดินแก๊สหรืออัตราการไหลการทดลองเท่ากับอัตราการไหลทางทฤษฎี ($C_i = 1$) จะได้อัตราการไหลของมวลแก๊สสูงสุดเท่ากับ 24.653 $\mu\text{g}/\text{sec}$ ดังรูปที่ 5.10 (ก) และถ้าพิจารณาอัตราการไหลของมวลแก๊สสำหรับการไหลความเร็วต่ำกว่าเสียง ด้วยเงื่อนไขเดียวกันจะได้อัตราการไหลของมวลแก๊สสูงสุดเท่ากับ 15.289 $\mu\text{g}/\text{sec}$ ดังรูปที่ 5.10 (ข) โดยในรูปที่ 5.10 จะแสดงอัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อแผ่นปิดมีการเคลื่อนที่ขึ้นจากฐานรองโดยแบ่งเป็น 3 ช่วงตามแบบจำลองอัตราการไหลของมวลแก๊สที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว ซึ่งในช่วงแรกจะมีอัตราการไหลของมวลแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นกับระยะเคลื่อนที่ขึ้นของแผ่นปิด (seat-controlled region) ช่วงที่สองเป็นช่วงเปลี่ยนผ่านจากจากช่วงที่ 1 ไปช่วงที่ 3 เรียกว่าย่านเปลี่ยนผ่าน (transition region) ซึ่งจะมีอัตราการไหลของมวลแก๊สเข้าสู่หาค่าคงที่และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงที่ระยะความสูงของแผ่นปิดไม่มีผลต่ออัตราการไหลของมวล (orifice-controlled region) เนื่องจากไมโครวาล์วมีสภาวะปกติเปิดเพราะการโค้งตัวขึ้นของแผ่นคาน ดังนั้นจึงพิจารณาอัตราการไหลของมวลได้จากช่วงสุดท้าย ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์การไหลของแก๊สในโตรเจนผ่านช่องทางเดินแก๊สขนาด $70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$

คุณสมบัติ	การไหลแบบ sonic	การไหลแบบ subsonic
แรงดันแก๊สเข้า ⁽¹⁾	69 kPa	69 kPa
แรงดันแก๊สออก ⁽²⁾	≤ 61.919 kPa	> 61.919 kPa
อัตราการไหลของมวลแก๊ส ⁽²⁾ ที่ $C_i = 1$	24.653 $\mu\text{g}/\text{sec}$	15.289 $\mu\text{g}/\text{sec}$

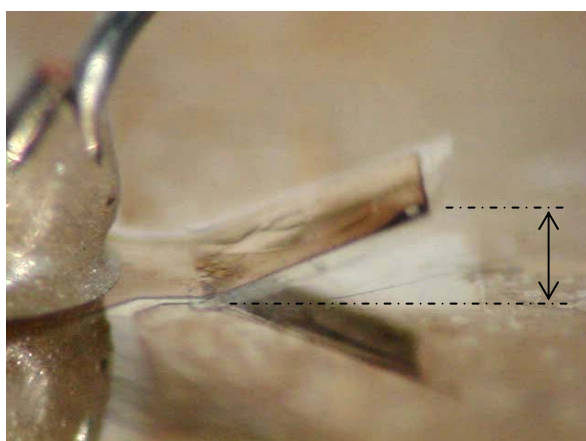
⁽¹⁾ ผลจากการทดลอง ⁽²⁾ ผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์



(ก)

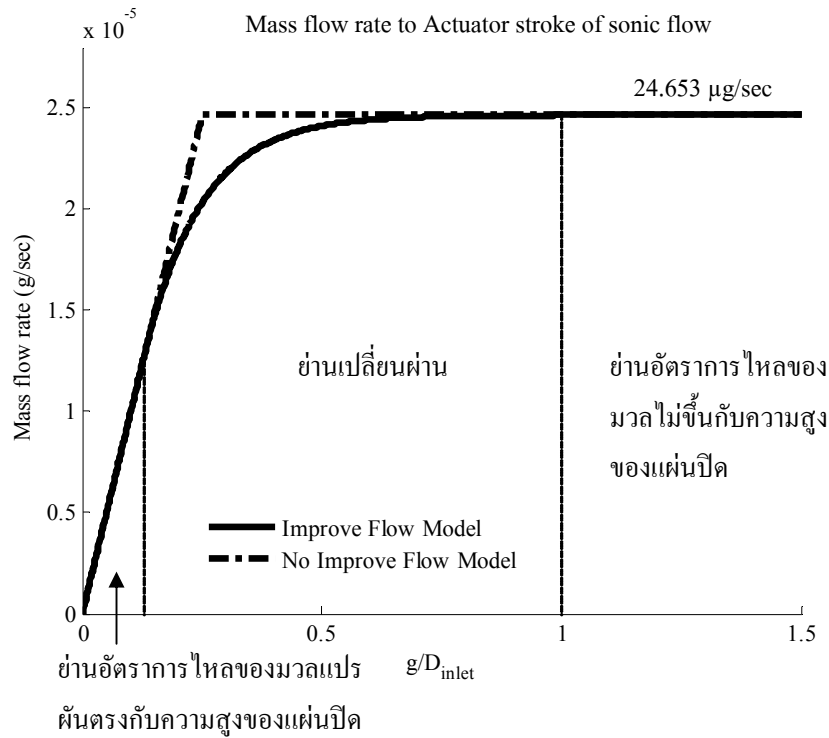


(ข)

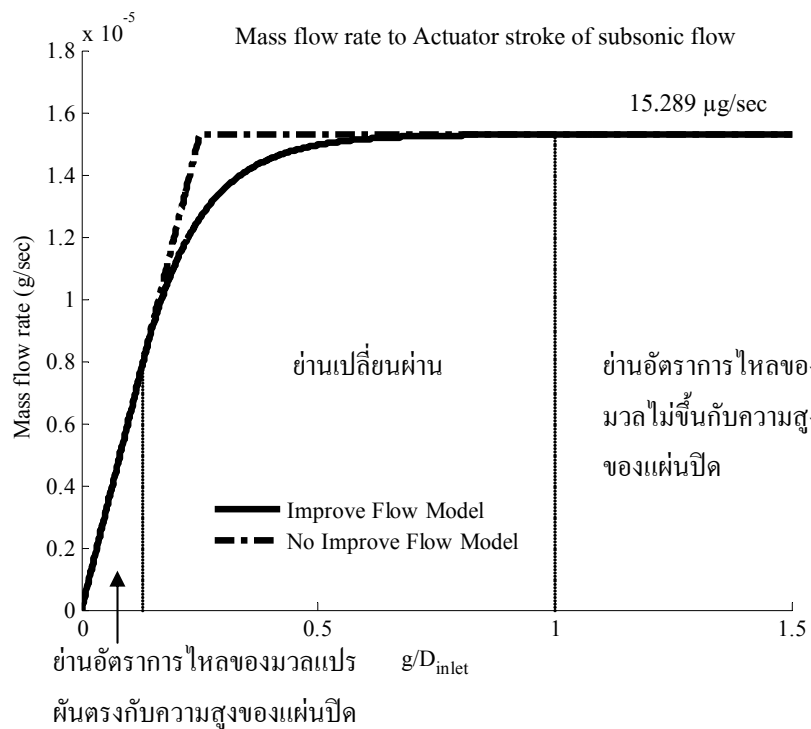


(ค)

รูปที่ 5.9 การยกตัวของแผ่นคานเมื่อมีแรงดันแก๊สกระทำทำให้แผ่นปิด (ก) แผ่นคานในสภาวะปกติ
(ข) ป้อนแรงดันแก๊ส 69 kPa (ค) ป้อนแรงดันแก๊ส 138 kPa



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.10 อัตราการไหลของมวลแก๊สในโตรเจนเมื่อไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น (ก) การไหลความเร็วเท่ากับเสียง (ข) การไหลความเร็วต่ำกว่าเสียง

5.3 การควบคุมการไหลของแก๊ส

เมื่อแผ่นคานปลายอิสระได้รับแรงดันแก๊สได้แผ่นปิดจะมีระยะช่องอากาศระหว่างฐานรองกับแผ่นคานเพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันแก๊สที่ผ่านเข้ามา ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่เป็นโครงสร้างหลักของการขับเคลื่อนการทำงานของแผ่นปิดด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ระยะช่องอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ใช้พลังงานในการดึงแผ่นคานปลายอิสระลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สมากขึ้น ยิ่งระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า (g_0) มีค่าสูงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังสมการที่ (3-16) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5-12) ดังนั้นเพื่อให้ไมโครวาล์วสามารถควบคุมการไหลของแก๊สได้ดีจึงต้องกำหนดระดับแรงดันแก๊สหรืออัตราการไหลของมวลที่ต้องการ เพื่อให้สามารถให้พลังงานในการขับเคลื่อนสอดคล้องกับระดับการยกตัวของแผ่นปิดได้อย่างเหมาะสม

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 A} \left(g_0 + \frac{d}{\varepsilon_r} \right)^3} \quad (6-12)$$

เมื่อ k คือค่าความแข็งดึงของแผ่นคานปลายอิสระ A คือพื้นที่แผ่นตัวนำไฟฟ้า g_0 คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า d คือความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ε_0 คือค่าสภาพยอมสัมบูรณ์ เท่ากับ $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (Universal gas constant / molecular weight) และ ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กทริก

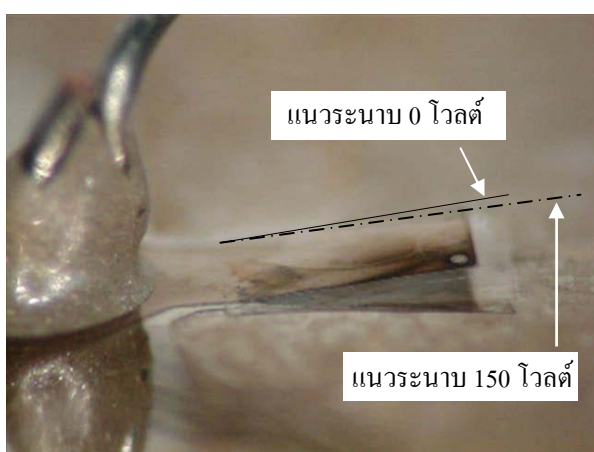
ในการทดสอบการควบคุมการไหลของแก๊สสำหรับไมโครวาล์วในงานวิจัยนี้ ได้ทดสอบป้อนแรงดันแก๊สที่สามารถดันแผ่นปิดให้เคลื่อนที่ขึ้นได้เล็กน้อย ก่อนจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้แผ่นคานเคลื่อนที่ลงมา สำหรับแรงดันแก๊สดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 69 kPa ซึ่งเป็นระดับแรงดันแก๊สต่ำสุดที่สามารถตรวจสอบได้จากวาล์วปรับแรงดันแก๊ส จะให้ระดับการยกตัวขึ้นจากสภาวะปกติเมื่อได้รับแรงดันแก๊สดังรูปที่ 5.11 (ข) หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในการขับเคลื่อนแผ่นปิดขึ้น ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้แผ่นปิดเริ่มขยับลงมาเท่ากับ 100 โวลต์และเมื่อเพิ่มเป็น 150 โวลต์การเคลื่อนที่มากขึ้น ดังรูปที่ 5.11 (ค) สำหรับแรงดันไฟฟ้าแบบติดของไมโครวาล์วอยู่ที่ประมาณ 200 โวลต์ซึ่งเป็นระดับในสภาวะปกติ แต่เมื่อมีแรงดันแก๊สมากกระทำทำให้แผ่นปิดส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าแบบติดมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในระดับแรงดันสูงส่งผลให้เกิดการลัดวงจรที่จุดต่อทางไฟฟ้าเข้ากับแผ่นคานและฐานรองนิกเกิลและทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายแสดงดังรูปที่ 5.12 และจากการทดสอบการทำงานของไมโครวาล์วที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง พบว่าการลัดวงจรจะเกิดขึ้นเฉพาะที่จุดต่อระหว่างลวดเงินนำไฟฟ้าและชิ้นงานเท่านั้น ซึ่งการเชื่อมต่อจะใช้กาวเงินนำไฟฟ้า การลัดวงจรดังกล่าวอาจเกิดจากกาวเงินนำไฟฟ้า ไม่สามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงได้ถึงระดับที่ใช้ทดสอบการทำงานไมโครวาล์ว หรือขั้นตอนการอบแห้งกาวยังไม่สามารถทำให้กาวขึ้นในแห้งสนิทรวมทั้งการ



(ก)



(ข)

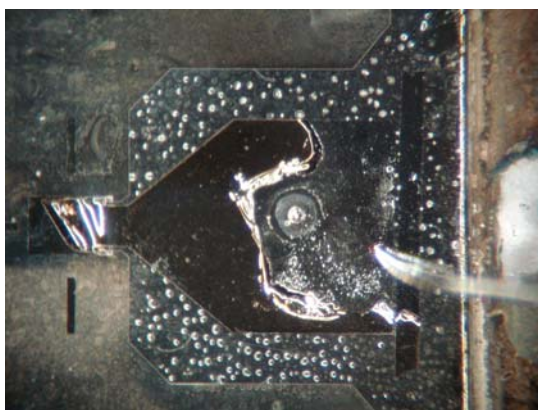


(ค)

รูปที่ 5.11 การขั้วการทำงานของไมโครวาล์วเมื่อมีแรงดันแก๊ส 69 kPa (ก) สภาวะปกติ (ข) ป้อนแรงดันแก๊ส 69 kPa (ค) ขั้วด้วยแรงดันไฟฟ้า 150 โวลต์

ติดตั้งชิ้นงานซึ่งอาจเกิดจากความชื้นที่เทปพอลิอิมิดซึ่งใช้ยึดฐานรองนิกเกิลกับแผ่นทดสอบ สำหรับการแก้ไขปัญหาจะกล่าวในบทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะต่อไป

อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบการขับเร้า เพื่อให้แผ่นปิดเคลื่อนที่ลงมาปิดช่องทางเดินแก๊ส นั้น ได้ทดสอบที่ระดับแรงดันแก๊ส 69 kPa ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันแก๊สที่ใช้ในระบบการแสดงผล อักษรเบรลล์ที่มีค่าเพียง 27.6 kPa ทำให้ได้แนวโน้มการเคลื่อนที่ลงมาของแผ่นปิดเมื่อป้อน แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 150 โวลต์ บ่งบอกถึงการทำงานว่ามีความเป็นไปได้ที่แผ่นปิดสามารถ เคลื่อนที่ลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สที่แรงดันแก๊ส 27.6 kPa และสามารถนำโครงสร้างไมโครวาล์ว ชนิดแผ่นคานปลายอิสระไปพัฒนาเพื่อปรับปรุงให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าแบบติดลดลงจนสามารถใช้ ควบคุมแรงดันแก๊สต่อไปได้



(ก)



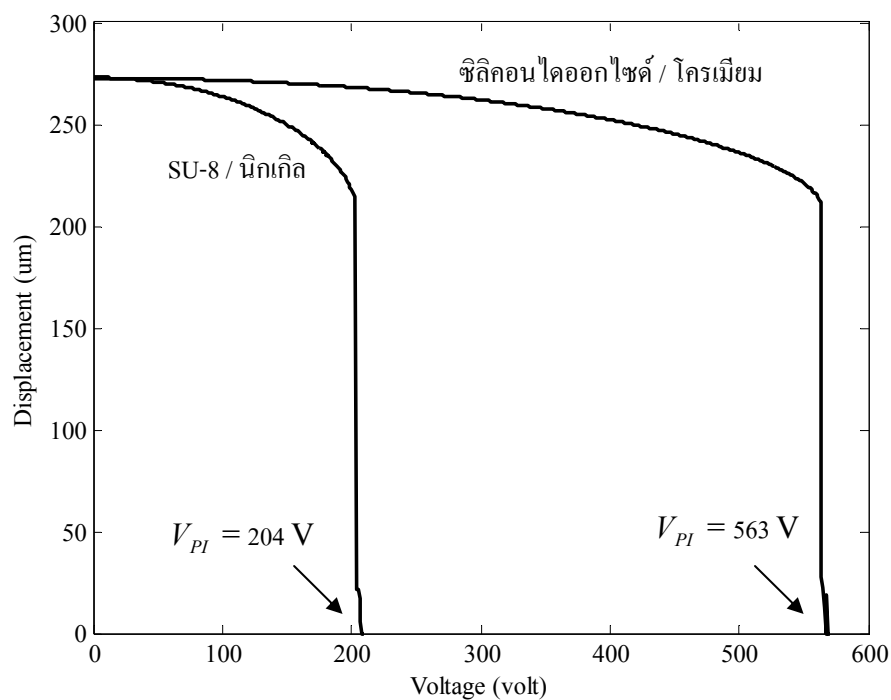
(ข)

รูปที่ 5.12 การลัดวงจรเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ก) บริเวณจุดต่อไฟฟ้าที่แผ่นคาน (ข) บริเวณจุดต่อไฟฟ้าที่ฐานรองนิกเกิล

5.4 สรุป

โครงสร้างพื้นฐานของไมโครวาล์วในงานวิจัยได้พัฒนามาจากไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระของ Haji-Babaei ซึ่งได้เปลี่ยนชั้นวัสดุหลักของแผ่นคานจากซิลิคอนไดออกไซด์มาเป็น วัสดุสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 เพื่อนำมาควบคุมการไหลของแก๊ส โดยทดสอบได้ระดับ แรงดันไฟฟ้าแบบติดเท่ากับ 200 โวลต์ ที่สามารถปิดช่องทางเดินแก๊สในสภาวะปกติได้ รวมทั้ง ประมาณอัตราการไหลของมวลแก๊สผ่านช่องทางเดินแก๊สขนาด $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ เมื่อมีแรงดันแก๊ส โนโตรเจนเข้าสู่ไมโครวาล์วเท่ากับ 69 kPa ซึ่งจะให้อัตราการไหลของมวลแก๊สสูงสุดของการไหล เร็วเท่ากับเสียงเท่ากับ $24.653 \mu\text{g}/\text{sec}$ และ $15.289 \mu\text{g}/\text{sec}$ ของการไหลเร็วกว่าเสียง สำหรับการ ทดสอบระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถดึงแผ่นคานที่ยกตัวเนื่องจากแรงดันแก๊สระดับดังกล่าว

ลงมาได้เท่ากับ 150 โวลต์ ก่อนการลัดวงจรที่จุดต่อทางไฟฟ้าของชิ้นงานและลวดเงิน ระดับแรงดันไฟฟ้าแบบคิที่ใช้ทดสอบกับไมโครวาล์วในสภาวะปกติที่สร้างจากชั้นวัสดุ SU-8 และ นิกเกิล เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ชั้นวัสดุซิลิคอนไดออกไซด์และโครเมียมเป็นโครงสร้างหลักของแผ่นคานแล้ว ได้ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 5.13 ด้วยการกำหนดระยะยกตัวของแผ่นปิดของไมโครวาล์วเช่นเดียวกันกับข้อมูลจากการทดลอง ชั้นวัสดุซิลิคอนไดออกไซด์/โครเมียม จะมีแรงดันไฟฟ้าแบบคิสูงถึง 563 โวลต์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่ามอดูลัสของยังของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่า 70 GPa ส่วนชั้น SU-8 มีค่าเพียง 4.5 GPa ดังนั้นการพัฒนาโครงสร้างไมโครวาล์วด้วยวัสดุชนิดใหม่จะช่วยลดระดับพลังงานในการขับร้าวลงได้มากด้วยการลดขนาดของแผ่นปิดเพื่อลดค่าความแข็งตึงของ โครงสร้างและต้องพัฒนากระบวนการสร้างและการทดสอบชิ้นงานให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าแบบคิของไมโครวาล์วที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีชั้นวัสดุต่างกันด้วยการกำหนดระยะยกตัวของแผ่นปิดของไมโครวาล์วเหนือผิวของฐานรองเช่นเดียวกันกับข้อมูลจากการทดลอง

บทที่ 6

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปงานวิจัย

ไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระที่ขับเคลื่อนด้วยแรงไฟฟ้าสถิตได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคซึ่งเป็นกระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาค โดยมีจุดมุ่งหมายในการนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส ในระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ โครงสร้างพื้นฐานได้พัฒนามาจากไมโครวาล์วชนิดแผ่นคานปลายอิสระของ Haji-Babaei ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นไดอิเล็กทริก โลหะโครเมียมเป็นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและช่องทางเดินแก๊สทะลุผ่านแผ่นซิลิคอนโดยกระบวนการสร้างจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูงและสารเคมีที่เป็นอันตราย อีกทั้งขนาดช่องทางเดินแก๊สที่สร้างขึ้นมีขนาดกว้างที่ฐานด้านล่างไม่สอดคล้องกับอะเรย์ของอักษรเบรลล์ที่ต้องจัดเรียงเป็นจุดอักษรเบรลล์ ดังนั้นการพัฒนากระบวนการสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างไมโครวาล์วแผ่นคานปลายอิสระจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาที่กล่าวในข้างต้นด้วยกระบวนการพื้นฐานในห้องปฏิบัติการโดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะถูกแทนที่ด้วยสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 ผ่านกระบวนการหมุนเคลือบเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นไดอิเล็กทริก ชั้นโลหะโครเมียมบนแผ่นคานจะเปลี่ยนเป็นชั้นโลหะซ็อนทับกัน 3 ชั้น ได้แก่ โครเมียม/ทองแดง และนิกเกิล โดยควบคุมขนาดความโค้งของแผ่นคานด้วยความหนาของชั้นนิกเกิลผ่านกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า สำหรับช่องทางเดินแก๊สแบบเดิมที่ต้องผ่านกระบวนการกัดซิลิคอนแบบเปียกซึ่งจะทำให้ช่องด้านล่างมีขนาดกว้างไม่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบแสดงผลอักษรเบรลล์ ดังนั้นช่องทางเดินแก๊สในงานวิจัยนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นพร้อมกับฐานรองนิกเกิลเพื่อลดพื้นที่ช่องทางเดินแก๊สผ่านฐานรอง เพิ่มความนำไฟฟ้าด้วยโลหะนิกเกิลและลดพลังงานขับเคลื่อน กระบวนการสร้างฐานรองนิกเกิลคือกระบวนการสร้างแบบชั้นหนาด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเป็นการสร้างโครงสร้างที่มีความสูงหรือหนามากเมื่อเทียบกับขนาดของวัสดุ โดยใช้เทคนิคการหล่อขึ้นรูปสารไวแสง และการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า เพื่อสร้างชั้นโลหะให้เต็มเบ้าหรือแบบ หลังจากนั้นจึงกำจัดแบบทิ้ง เหลือไว้แต่โครงสร้างของโลหะ

โครงสร้างแผ่นคานโค้งปลายอิสระได้ผ่านการศึกษาคือความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ควบคุมการไหลของแก๊ส โดยทดสอบสร้างโครงสร้างบนฐานรองกระจกซึ่งจะเกิดการโค้งตัวเนื่องจากความเค้นภายในและการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ หลังจากนั้นจึงเริ่มเข้าสู่กระบวนการพัฒนาช่องทางเดินแก๊สขึ้นมาพร้อมกับฐานรองนิกเกิลซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าด้านล่าง ด้วยกระบวนการ

สร้างลวดลายแม่พิมพ์หน้าด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เพื่อชูนิกเกิลด้วยไฟฟ้าขึ้นมาให้เต็มแม่แบบก่อนจะนำไปขัดให้ได้ระนาบ ซึ่งจะได้แผ่นฐานรองนิกเกิลมาเข้าสู่กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบร้อยสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดบวก AZ P4620 ต่อไป

กระบวนการสร้างสุดท้ายคือการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือการสร้างโครงสร้างแผ่นคานตามลำดับชั้นวัสดุและการสกัดชั้นวัสดุตามลำดับ โดยภายหลังการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราวทิ้ง ปลายแผ่นคานจะเกิดการโค้งตัวขึ้นมาประมาณ 273 μm และมีรัศมีส่วนโค้งที่คำนวณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประมาณ 1.93 มิลลิเมตร และมีความเค้นภายในชั้นวัสดุ SU-8 เท่ากับ 4.55 MPa สำหรับระดับแรงดันแนบติดของแผ่นปิดในสถานะปกติจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าประมาณ 204 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถดึงแผ่นคานลงมาปิดช่องทางเดินแก๊สได้เท่ากับ 200 โวลต์ ซึ่งโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สามารถทำนายแรงดันแนบติดและพฤติกรรมการเคลื่อนที่ได้ดี

การไหลของแก๊สในโตรเจนผ่านช่องทางเดินแก๊สมีค่าแรงดันเท่ากับ 69 kPa เป็นขนาดแรงดันแก๊สที่สามารถดันแผ่นปิดให้เคลื่อนที่ขึ้นได้ และเมื่อคำนวณหาอัตราการไหลสูงสุดของมวลแก๊สสำหรับการไหลแบบ sonic ภายใต้อัตราการไหลของแก๊สที่ 25 $\mu\text{g}/\text{sec}$ และ 15 $\mu\text{g}/\text{sec}$ สำหรับการไหลแบบ subsonic ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบการควบคุมการไหลของแก๊สพบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเริ่มดึงแผ่นคานให้เคลื่อนที่ลงมาได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 150 โวลต์ ก่อนการลัดวงจรที่จุดต่อทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานกับลวดเงินที่ใช้กาวเงินนำไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมต่อ โดยที่ระดับแรงดันแก๊สดังกล่าวมีค่ามากกว่าระดับแรงดันแก๊สที่ใช้ในระบบแสดงอักษรเบรลล์คือ 27.6 kPa ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำโครงสร้างดังกล่าวไปควบคุมการไหลของแก๊สในระบบแสดงอักษรเบรลล์ในการพัฒนาโครงสร้างการทำงานต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ในส่วนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระควรมีการทดสอบสร้างแผ่นคานที่ระดับการโค้งตัวเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ เมื่อแผ่นคานมีความยาว ความกว้าง และความหนาที่ขนาดต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมาณขนาดแผ่นคานที่เหมาะสมที่สุด และนำโครงสร้างที่ได้มาทดสอบการขับเร้าด้วยแรงไฟฟ้าสถิตก่อนการออกแบบสร้างบนช่องทางเดินแก๊ส และช่องทางเดินแก๊สที่สร้างขึ้นมาพร้อมกับฐานรองนิกเกิล ควรทดสอบอัตราการไหลของแก๊สที่ผ่านพื้นที่ขนาดต่างๆ นอกเหนือจากขนาดที่ออกแบบในงานวิจัยที่ $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดพื้นที่ทางออกของแก๊สที่สามารถนำผลการค้นจุดอักษรเบรลล์ให้สูงขึ้นในแต่ละครั้ง โดยเปรียบเทียบกับความรู้สึกรู้สึกจากการสัมผัส

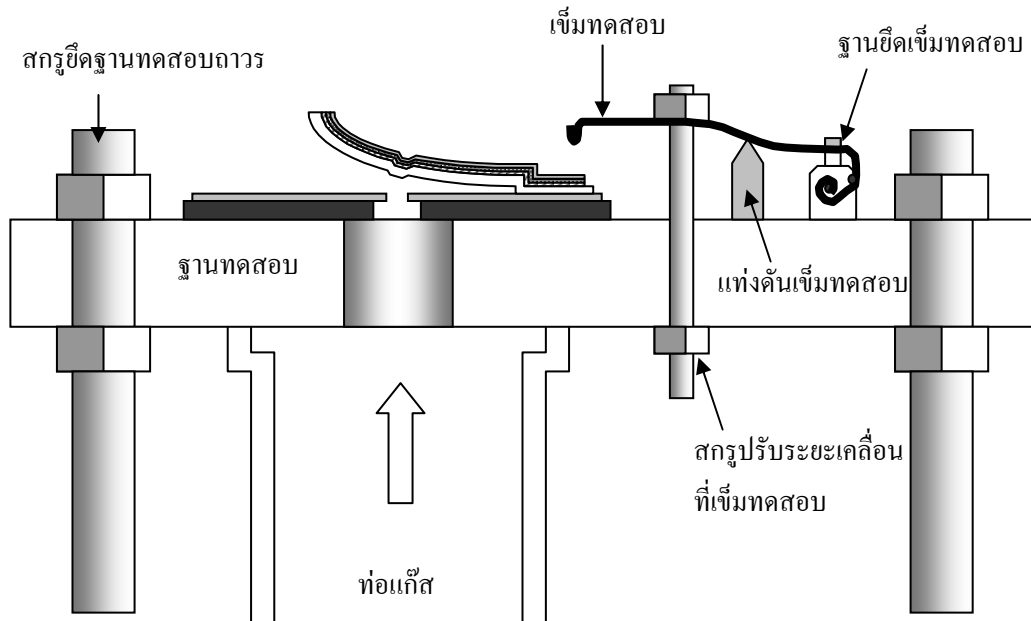
การขั้วการทำงานให้แผ่นปิดเคลื่อนที่ลงมา นอกเหนือจากพื้นที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าแล้ว ขนาดของช่องทางเดินแก๊สทางด้านล่างก็เป็นตัวแปรสำคัญเมื่อนำการทำงานทางกลจากแรงดันแก๊สและแรงไฟฟ้าสถิตจากแรงดันไฟฟ้ามาวิเคราะห์ร่วมกัน พื้นที่ช่องทางออกของแก๊สที่เล็กลงจะช่วยเพิ่มพื้นที่ระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าแบบติดลง แต่อัตราการไหลของแก๊สจะลดลงด้วย ในทางตรงกันข้าม พื้นที่ช่องทางเดินแก๊สมาก จะใช้แรงดันไฟฟ้าในการขั้วสูงขึ้น แต่จะมีอัตราการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเสนอแนะการหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่ขนาดช่องทางเดินแก๊สต่างๆ อัตราการไหลของแก๊สและแรงดันไฟฟ้าแบบติด เพื่อนำข้อมูลมาศึกษาให้ได้โครงสร้างไมโครวาล์วที่มีแรงดันแบบติดต่ำ ให้อัตราการไหลของแก๊สสูง แต่การศึกษาโครงสร้างช่องทางเดินแก๊สที่มีขนาดเล็กมากดังกล่าวสามารถไม่สามารถใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กและหนาหลายๆได้ ดังนั้น การสร้างแม่พิมพ์แบบขึ้นหน้าด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน จะช่วยสร้างแม่พิมพ์ของฐานนิกเกิลที่ให้ช่องทางเดินแก๊สขนาดเล็กได้ และส่งผลให้การศึกษาดังกล่าวจึงมีโอกาสประสบความสำเร็จสูง

ขั้นตอนการทำช่องทางเดินแก๊สให้เรียบ จากเดิมซึ่งใช้สารไวแสงโฟโตเรซิสชนิดบวก AZ P4620 ในการอุดช่องทางเดินแก๊ส ควรทำการศึกษาถึงการใช้มวล SU-8 ที่สร้างขึ้นเป็นแม่พิมพ์ของช่องทางเดินแก๊สให้คงค้างอยู่จะกว่าจะถึงขั้นตอนการสกัดชั้นวัสดุชั่วคราว และนำออกด้วยพลาสติกของออกซิเจน ซึ่งจะช่วยให้ผิวของช่องทางเดินแก๊สเรียบมากกว่าการขัดผิวของสารไวแสง AZ ให้เรียบเสมอ นิกเกิล ลดเวลาการสร้างและหมดปัญหาการอุดตันของตะกอนที่เกิดจากการขัดผิวในช่องทางเดินแก๊ส

การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควรสามารถประมาณแรงกระทำจากแรงดันแก๊สได้แผ่นปิดให้ยกตัวสูงขึ้น ซึ่งอาจจะประมาณแรงดันแก๊สที่ดันแผ่นปิดขึ้นเป็นค่าคงที่ของแรงค่าหนึ่งที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งจะทำให้แบบจำลองที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแผ่นคานเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ลงมาหรือได้รับแรงดันแก๊สให้เคลื่อนที่ขึ้นไปต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถวัดผลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำระหว่างการเคลื่อนที่ โดยเฉพาะช่วงที่มีแรงดันแก๊ส เพราะแผ่นคานจะมีการสั่นเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยอาจจะใช้การประมาณค่าความสูงของแผ่นคานจากระยะยกตัวทั้งหมด

ข้อเสนอแนะสุดท้ายที่สามารถเพิ่มความสำเร็จในการทดลองคือ การปรับปรุงการทดสอบการทำงานของไมโครวาล์ว โดยเริ่มตั้งแต่การสร้างชุดทดสอบถาวรที่สามารถรองรับการทดสอบชิ้นงานได้โดยหลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าด้วยกาวเงิน ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการลัดวงจรที่จุดต่อระหว่างลวดเงินและชิ้นงานได้ โครงสร้างของฐานทดสอบถาวรแสดงดังรูปที่ 6.1 ซึ่งประกอบไปด้วยเข็มทดสอบปลายมนที่สามารถปรับระยะเคลื่อนที่ลงได้ด้วยสกรูปรับระยะเคลื่อนที่ ซึ่งจะกด

ระดับความสูงของเข็มให้สัมผัสกับแผ่นคานพอดิและไม่ทำลายผิวหน้าของชั้นงาน โดยที่ฐานทดสอบสามารถรองรับชั้นงานใหม่ได้เสมอ ซึ่งตรงกลางฐานจะมีช่องแก๊สที่สามารถประกบแนบสนิทกับชั้นงาน รวมทั้งเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบแรงดันแก๊สเข้าและออกด้วยตัวตรวจรู้แรงดันแก๊ส



รูปที่ 6.1 แนวทางการพัฒนาชุดอุปกรณ์ทดสอบไมโครวาล์วที่ติดตั้ง

รายการอ้างอิง

- นิमित ชมนาวัง, สมศักดิ์ เขียวศรีวิกุล และสมเกียรติ สุภเดช. (2537). การศึกษาการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH. *วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 11 ฉบับที่ 1*: 54-59.
- วีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์. (2546). ตัวตรวจจับอัตราเร่งชนิดฟิล์มบางเพชรแบบตัวต้านทานเพียโซ. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2547). *สรุปการประชุมประจำปี 2547 นานาเทคโนโลยี ความท้าทายของประเทศไทย*. ปทุมธานี, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- Bassous, E., Taub, H.H., and Kuhn L. (1997). Ink jet printing nozzle arrays etched in silicon. **Applied Physics Letters**, Vol. 31, No. 2: 135-137.
- Benecke, W., and Riethmuller W. (1989). Applications of Silicon-Microactuators Bases on Bimorph Structures. **Micro Electro Mechanical Systems, Proceedings, 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'**: 116-120.
- Burger, J.F., Wekken, M.C., Berenschot, E., Holland, H.J., Ter Brake, H.J.M., Rogalla, H., Gardeniers, J.G.E., and Elwenspoek, M. (1999). High Pressure Check Valve for Application in a Miniature Cryogenic Sorption Cooler. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99. Twelfth IEEE International**: 183-188.
- Capanu, M., Boyd, IV, J.G., Hesketh, P.J. (2000). Design, Fabrication, and Testing of a Bistable Electromagnetically Actuated Microvalve. **Journal of Microelectromechanical Systems**. Vol. 9, Issue 2: 181-189.
- Carlen, E.T., and Mastrangelo, C.H. (2000). Paraffin Actuated surface Micromachined

Valves. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000.**

The Thirteenth Annual International: 381-385.

Chang, H.K., and Kim, Y.K., (2000). UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole. **Sensor and Actuator** : 342-350.

Chomnawang, N. (2002). **Three-Dimensional Micromachined On-chip Inductors for High Frequency Applications.** Ph.D. Dissertation, University of Louisiana State.

Chowdhury, S., Ahmadi, M., and Miller W.C., (2005). A closed-form model for the pull-in voltage of electrostatically actuated cantilever beams. **Journal of Micromechanics and Microengineering.** 15 No. 4 : 756-763.

Edmonds, B., Ernstberger, J., Ghosh, K., Malaugh, J., Nfodjo, D., Samyono, W., Xu, X., Dausch, D., Goodwin, S., and Smith, R.C., (2004). Electrostatic Operation and Curvature Modeling for a MEMS Flexible Film Actuator. **Statistical and Applied Mathematical Sciences Institute,** Technical Report#2004-4.

Erickson, D., and Li, D. (2003). Integrated microfluidic devices. **Analytica Chimica Acta,** Vol. 507 , Issue 1: 11-26.

Esashi, M., Shoji, S., and Nakano, A. (1989). Normally Close Microvalve and Micropump Fabricated on a Silicon Wafer. **Micro Electro Mechanical Systems, Proceedings, 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots':** 29-34.

Fedder, G.K. (1994). **Simulation of Microelectromechanical Systems.** Ph.D. Dissertation, University of California at Berkley.

Feynman, R.P. (1959). There's plenty of room at the bottom. **presented at the**

American Physical Society Meeting in Pasadena, CA, December 26,
reprinted in J. Microelectromechanical Systems, vol. 1, no. 1: 60-66.

Fujitsuka N., Hamaguchi K., Funabashi H., Kawasaki E., and Fukada T. (2003).
Silicon anisotropic etching without attacking aluminum with Si and
oxidizing agent dissolved in TMAH solution, **Sensor and Actuator A 114**:
510-515.

Gray, G.D., Morgan, M.J., and Kohl, P.A., (2004). Electrostatic actuators with
expanded tuning range due to biaxial intrinsic stress gradients, **Journal of
Microelectromechanical Systems**, vol. 13, Issue 1: 51-62

Grosjean, C., Yang, X., and Tai, Y.-C. (1999). A Practical Thermopneumatic Valve.
**Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99. Twelfth
IEEE International**: 147-152.

Haji-Babaei, J., Kwok, C.Y., and Huang, R.S. (1997). Integrable Active Microvalve
with Surface Micromachined Curled-Up Actuator. **Solid State Sensors and
Actuators**, vol 2: 833-836.

Henning, A.K. (1998). Microfluidic MEMS. **Aerospace Conference Proceedings,
IEEE**, vol. 1: 471-486.

Henning, A.K., Fitch, J., Hopkins, D., Lilly, L., Faeth, R., Falsken, E. and Zdeblick,
M. (1997). A Thermopneumatically Actuated Microvalve for Liquid
Expansion and Proportional Control. **Solid State Sensors and Actuators**,
vol. 2: 825-828.

Henning, A.K., (2003). Improved Gas Flow Model for Microvalves. **In Proceedings,
TRANSDUCERS '03**:1550-1553.

Hirono, M., Yanagisawa, K., Kuwano, H., and Nakano, S. (1997). Microvalve with

- Ultra-Low Leakage. **Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International**: 323-326.
- Huff, M.A., Mettner, M.S., Lober, T.A., and Schmidt, M.A. (1990). A Pressure-Balanced Electrostatically-Actuated Microvalve. **Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 4th Technical Digest**: 123-127.
- Huff, M.A., and Schmidt, M.A. (1992). Fabrication, Packing, and Testing of a Wafer-Bonded Microvalve. **Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5th Technical Digest**: 194-197.
- Jerman, H. (1991). Electrically-Activated, Normally-Closed Diaphragm Valves. **Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91**: 1045-1048.
- Judy, M.W., Cho, Y.H., Howe, R.T, and Pisano, A.P., (1991). Self-Adjusting Microstructures (SAMS). **Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '91, Proceedings. 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'**: 51-56
- Kohl, M., Dittmann, D., Quandt, E., Winzek, B., Miyazaki, S., and Allen, D.M. (1999). Shape memory microvalve based on thin films or rolled sheets. **Materials Science and Engineering A**, vol.273-275: 784-788.
- Kohl, M., Skrobanek, K.D., and Miyazaki, S. (1999). Development of stress-optimised shape memory microvalves. **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 72, Issue 3: 243-250.
- Koide, A., Sasaki, Y., Yoshimaru, Y., Miyake, R., and Terayama, T., (2000). Micromachined Dispenser with High Flow rate and High Resolution. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000. The**

Thirteenth Annual International: 424-428.

Legtenberg, R., Berenschot, E., Elwenspoek, M., and Fluitman, J., (1995).

Electrostatic curved electrode actuators. **Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '95, Proceedings:** 37.

Legtenberg, R., Gilbert, J., Senturia, S.D., and Elwenspoek, M. (1997). Electrostatic

curved electrode actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, Issue 3: 257-265.

Leow Cheah Wei, Mohammad, A.B., and Kassim, N.M. (2002). Analytical modeling

for determination of pull-in voltage for an electrostatic actuated MEMS cantilever beam, **Conference on Semiconductor Electronics**, Proceedings. ICSE 2002. *IEEE International:* 233-238.

Leung, Y.-S., Khaouf, M., Van Lintel, H.T.G., Haller, M., and Renaud, Ph. (2000).

Bubble Engineering for Biomedical Valving Application. **Conference On Microtechnologies in Medicine and Biology, 1st Annual International:** 390-393.

Lisec, T., Hoerschelmann, S., Quenzer, H.J., Wagner, B., and Benecke, W. (1994).

Thermally Driven Microvalve with Bucking Behaviour for Pneumatic Applications. **Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '94, Proceedings, IEEE:** 13-17.

Lishchynska, M., Cordero, N., Slattery, O., and O'Mahony C. (2005). Modelling

electrostatic behaviour of microcantilevers incorporating residual stress gradient and non-ideal anchors. **Journal of Micromechanics and Microengineering.** 15 No. 7 : s10-s14.

Meckes, A., Behrens, J., and Benecke, W. (1997). Electromagnetically Driven

- Microvalve Fabricated in Silicon. **Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97 Chicago, International**, vol 2: 821- 824.
- Young-Hoon Min, and Yong-Kweon Kim. (2000). *In situ* measurement of residual stress in micromachined thin films using a specimen with composite-layered cantilevers, **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 10 No. 3 : 314-321.
- Musolt, J., and Khol P., (2003). **Electrostatic actuator with intrinsic stress gradient**. United States Patent, Patent No: 6,625,004 B1.
- Neagu, C.R., Gardeniers, J.G.E., Elwenspoek, M., and Kelly, J.J. (1997). An Electrochemical Active Valve. **Electrochimica Acta**, vol. 42, Issues 20-22: 3367-3373.
- Nguyen N.-T., and Huang, X. (2001). Miniature valveless pumps based on printed circuit board technique. **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 88, issue 2: 104-111.
- Ohistein, T., Fukiura, T., Ridley, J., and Bonne U. (1990). Micromachined silicon microvalve. **Micro Electro Mechanical Systems, 'Proceedings, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots'**: 95-98
- Ohori, T., Shoji, S., Miura, K., and Yotumato, A. (1997). Tree-Way Microvalve for Blood Flow Control in Medical Micro Total Analysis Systems (μ TAS). **Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International**: 333-337.
- Osterberg, P.M., and Senturia, S.D., (1997). M-TEST: A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test

- Structures. **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol. 2, no. 2: 107-109.
- Pamidighantam, S., Puers, R., Baert, K., and Tilmans, H.A.C. (2002). Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed–fixed and fixed–free end conditions. **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 12 No. 4 : 458-464.
- Park, S., Ko, W.H., and Prael, J.M. (1988). A Constant Flow-Rate Microvalve Actuator based on Silicon and Micromaching Technology. **Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Technical Digest**: 136-139.
- Pattanakul R., Chomnawang N., Klaitabtim D. and Tuantranont A. (2004) Simulation of metallic MEMS electrostatic actuator for microvalve applications. **Proceedings of the 27th Electrical Engineering Conference**, vol.II: 293-296.
- Pattanakul R., Tuantranont A. and Chomnawang N. (2005). Design Optimization of Tethers in Electrostatic Actuating Pneumatic Microvalves. **Proceedings of the 2005 Electrical/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference**, vol. I: 387-390.
- Pattanakul, R., Atiwongsangtong, N., Muanghlua, R., Titiroongruang, W., Niemchareon, S., and Chomnawang, N. (2006). Fabrication of a Curled-Up SU-8/Metal Closure Plate for Electrostatic Microvalve. **Proceedings of the 21st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications**, Vol.III,: 485-488.
- Petersen, R. C. (2004). **Tactile display system**. US Patent No. 6,734,785.
- Popescu, D.S., Dascalu, D.C., Elwenspoek, M., and Lammerink, T. (1995). Silicon

- Active Microvalves using Buckled Membranes for Actuation. **Conference on Solid-State Sensors and Actuators**: vol. 2: 305 – 308.
- Pouramadi, F., Christed, L., Petersen, K., Mallon, J., and Bryzek, J. (1990). Variable-Flow Structure Fabricated with Silicon Fusion Bonding. **Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 4th Technical Digest**: 78-81.
- Reyes, D.R., Iossifidis, D., Auroux, P-A, and Manz, A. (2002). Micro Total Analysis System. 1. Introduction, Theory, and Technology. **Anal. Chem.** 74: 2623-2636.
- Reynaerts, D., Peirs, J., and Brussel, H.V., (1999). Shape memory micro-actuation for a gastro-intestinal intervention system. **Sensors and Actuators A: Physical**, vol.77, issue 2: 157-166.
- Rich, C.A., and Wise, K.D. (1999). An 8-Bit Microflow Controller Using Pneumatically-Actuated Microvalves. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99. Twelfth IEEE International**: 130-134.
- Rich, C.A., and Wise, K.D. (2003). A High-Flow Thermopneumatic Microvalve With Improved Efficiency and Integrated State Sensing. **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol. 12, issue 2: 201 – 208.
- Roberts, J., Slattery, O., and Kardos, D. (2000). Rotating-wheel braille display for continuous refreshable braille. **In Digest of Technical Papers, Society for Information Display International Symposium** , Vol. XXXI.: 1130–1133.
- Roberson, J.A., and Crowe, C.T., (1994). **Engineering Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, USA, 6th. Ed.
- Rosa, M.A., Bruyker, D.D., Volkel, A.R., Peeters, E., and Dunec J. (2004). A novel external electrode configuration for the electrostatic actuation of MEMS

- based devices, **Journal of Micromechanics and Microengineering**. 14 No. 4 : 446-451.
- Sato, K., and Shikida, S. (1992). Electrostatic Film Actuator with a Large Vertical Displacement. **Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '92, Proceedings**: 1-5.
- Senturia, S.D. (2004). **Microsystem Design**. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts.
- Shigley, J.E., and Mitchell, L.D., (1983). **Mechanical Engineering Design**. McGraw-Hill, New York.
- Shikida, M., Sato, K., and Harada, T. (1995). Micromachined S-shaped Actuator. **Symposium on Micro Machine and Human Science**: 197-172.
- Shoji, S., Der Schoot, B.V., De Rooij, N., and Esashi, M. (1991). Smallest Dead Volume Microvalves for Integrated Chemical Analyzing Systems. **Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91**: 1052-1055.
- Sim, D.Y., Kurabayashi, T., and Esashi, M. (1995). Bakable Silicon Pneumatic Microvalve. **Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Transducers '95**, vol. 2: 280 – 283.
- Smits, A.J., (2000). **A Physical introduction to Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, New York.
- Smith, L., and Hok, B. (1991). A Silicon Self-Aligned Non-Reverse Valve. **Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91**: 1049-1051.
- Terry S.C. (1975). **A gas chromatographic air analyser fabricated on silicon wafer**

- using integrated circuit technology.** PhD. Dissertation Stanford University.
- Timoshenko, S., (1925). Analysis of bi-metal thermostats. **Journal of the Optical Society of America**, 11, 233-255.
- Tretiakoff, O., and Tretiakoff, A. (1977). **Electromechanical transducer for relief display panel.** US Patent No. 4,044,350.
- Vandelli, N., Wroblewski, D., Velonis, M., and Bifano, T. (1998). Development of a MEMS Microvalve Array for Fluid Flow Control. **Journal of Micromechanical Systems**, vol. 7, Issue 4: 395-403.
- Van der Wijngaart, W., Thorsen, A., Stemme, G. (2005). A seat microvalve nozzle for optimal gas-flow capacity at large-controlled pressure. **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol. 14, Issue 2: 200-206.
- Vellekoop, M.J., Lubking, G.W., Sarro, P.M., and Venema, A. (1994). Integrated-circuit-compatible design and technology of acoustic-wave-based microsensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, vol. 44, Issue 3: 249-263.
- Wagner, B., Quenzer, H.J., Hoerschelmann, S., Lisek, T., and Juerss, M. (1996). Micromachined Bistable Valves for Implantable Drug Delivery Systems. **Engineering in Medicine and Biology Society**, vol.1: 254 – 255.
- Walter, M., Leonhardt, S., Schubert, H., and Aschoff, A. (1996). A Computer Aided Test Stand for Medical Microvalves. **Engineering in Medicine and Biology Society**, vol.1: 157-158.
- Wang, X.-Q., Lin, Q., and Tai, Y.-C. (1999). A Parylene Micro Check Valve. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99. Twelfth IEEE International**: 177-182.

- Wang, X.-Q., and Tai, Y.-C. (2000) A Normalt Closed In-Channel Micro Check Valve. **Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000. The Thirteenth Annual International**: 68-73.
- Wilcock, D.F., and Sandor G.N., (1967). Design of gas bearing, **Note supplemental to the RPI-MTI course on gas bearing design**, vol. 1: 14-18.
- Wiranto, G., Soegandi, T.M.S., Muljono, M., Widodo, S., and Hermida, I.D.P. (2000). The Design of a Miniature Injector for Microengineered GC System. **Conference on Semiconductor Electronics, Proceedings. ICSE 2000. IEEE International**: 85-89.
- Xiaohong Mu., Kahrizi, M., and Landsberger, L., (2003). Design & fabrication of out-of-plane electrostatic actuators for optical application. **Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE 2003**. vol. 1: 133-136.
- Yamamoto, A., Ishii, T., and Higuchi, T. (2003). Electrostatic Tactile Display for Presenting Surface Roughness Sensation. **Conference on Industrial Technology, IEEE International**, vol.2: 680 – 684.
- Yang, E.H., Han, S.W., Yang, S.S. (1996). Fabrication and testing of a pair of passive bivalvular microvalves composed of p+ silicon diaphragms. **Sensors and Actuators**, Volume 57, Issue 1: 75-78.
- Yang, P. (2004). **Electroactive polymer actuator braille cell and braille display**. US Patent No. 2004/0175676 (pending).
- Yang, X, Grosjean, C., and Tai, Y.-C. (1999). Design, Fabrication, and Testing of Micromachined Silicon Rubber Membrane Valves. **Journal of Microelectromechanical Systems**, vol. 8, issue 4,:393-402.
- Yobas, L., Huff, M.A., Lisy, F.J., and Durand, D.M. (2001). A novel bulk micromach-

ined electrostatic microvalve with a curved-compliant structure applicable for a pneumatic tactile display. **Journal of Micro electromechanical Systems**, Volume 10, Issue 2: 187 - 196.

Yobas, L., Durand, D.M., Skebe, G.G., Lisy, F.J., and Huff, M.A. (2003). A novel integrable microvalve for refreshable Braille display system. **Journal of Microelectromechanical Systems**, volume 12, issue 3 :252 – 263.

Zengerle, R. Richter, A. Sandmaier, H. (1992). A micro membrane pump with electrostatic actuation. **in Proceeding IEEE Micro Electro Mechanical Systems**: 19-24.

ภาคผนวก ก

กระบวนการสร้างแผนกานปลายอิสระบนฐานรองกระจก

กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจก

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างโครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนฐานรองกระจกด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1

- (ก) แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 1 นิ้ว × 1 นิ้ว ทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิล-แอลกอฮอล์ (IPA) และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (de-ionised water) หลังจากนั้นจึงเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และกำจัดความชื้นบนผิวกระจกที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 นาทีบนแผ่นความร้อน (hot plate) และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
- (ข) เคลือบอลูมิเนียมด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศซึ่งจะให้ความหนาประมาณ 0.5 μm
- (ค) นำชิ้นงานไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที และเคลือบสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดบวก AZ 1512 ด้วยการหมุนเคลือบด้วยความเร็วรอบ 500 rpm 5 วินาที และ 3000 rpm 30 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานไปอบในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที วางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- (ง) นำชิ้นงานไปถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตรีซิส เป็นเวลา 10 วินาที และนำไปลอกสารไวแสงโฟโตรีซิส ส่วนที่โดยฉายแสง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบในเตาอบ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที
- (จ) กัดชั้นอลูมิเนียมออกโดยใช้สารละลาย $[\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}]$ อัตราส่วน [16:1:1:2] ที่อุณหภูมิ 50-60°C เนื่องจากสารละลายกรดนี้ไม่กัดส่วนที่มีสารไวแสงโฟโตรีซิสเคลือบอยู่ ดังนั้นอลูมิเนียมที่อยู่ด้านล่างจะไม่ถูกกัด ซึ่งชั้นนี้จะถูกใช้เป็นส่วนวัสดุชั่วคราวให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นคานกับฐานรอง
- (ฉ) ล้างสารไวแสงโฟโตรีซิส AZ ออก ด้วยอะซิโตน และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง จากนั้นเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กำจัดความชื้นที่ผิวหน้าชิ้นงานด้วยอุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 5 นาที บนแผ่นทำความร้อน และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที
- (ช) เคลือบสารไวแสงโฟโตรีซิสชนิดลบ SU-8 2002 หนาประมาณ 2 μm ด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบแผ่นความ

- (ข) ร้อน (soft bake) ด้วยอุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 1 นาที และเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 95°C อีก 2 นาที เพื่อให้ตัวทำละลาย (solvent) ในสารไวแสงโฟโตริซิสระเหยออก ชั้นฟิล์มจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น วางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที หลังจากนั้นจึงถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิส เป็นเวลา 60 วินาที นำไปอบต่อบนแผ่นความร้อน (post exposure bake) ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 1 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C อีก 1 นาทีและปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
- (ฅ) ลอกสารไวแสงโฟโตริซิส SU-8 2002 ล้างด้วยไอโซโพรพิล-แอลกอฮอล์ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กำจัดความชื้น เพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นฟิล์มโดยนำไปอบแผ่นความร้อนด้วยอุณหภูมิ 150-200°C เป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง
- (ฉ) เคลือบโลหะโครเมียมลงบนสารไวแสงโฟโตริซิส SU-8 2002 ด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศและเคลือบโลหะทองแดงทับลงไปอีกด้วยกระบวนการเดียวกัน จะได้ความหนารวมประมาณ 0.2 μm
- (ค) กำจัดความชื้นโดยนำชิ้นงานไปอบในเตาอบอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที และเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ 1512 ด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 1000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที และอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที
- (ก) นำชิ้นงานไปถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิส เป็นเวลา 25 วินาที และนำไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิสส่วนที่โดนฉายแสง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบในเตาอบอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที
- (ข) สกัดชั้นทองแดงออกด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนผสม 1:1:20 ของ $[\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}]$ และเนื่องจากสารละลายนี้ไม่กัดส่วนที่มีสารไวแสงโฟโตริซิสเคลือบอยู่ ดังนั้นชั้นโลหะทองแดง/โครเมียมที่อยู่ด้านล่างก็จะไม่ถูกสกัดออก ตามด้วยการล้างชิ้นงานด้วยน้ำบริสุทธิ์
- (ฅ) สกัดชั้นโครเมียม ด้วยสารละลายที่มีอัตราส่วนผสม 1:3 ของ $[50\text{g NaOH}:100\text{ml H}_2\text{O}]:[30\text{g K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6:100\text{ml H}_2\text{O}]$ แผ่นปิดจะเกิดการโค้งตัวขึ้นเล็กน้อย และล้างชิ้นงานด้วยน้ำบริสุทธิ์
- (ฉ) สกัดชั้นอลูมิเนียมออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 24 % และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ นำชิ้นงานไปชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าลงบนผิวทองแดงด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 mA/cm^2 เป็นเวลา 5 นาที ล้างชิ้นงานด้วยน้ำบริสุทธิ์ และจุ่มในเมธิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อดึงน้ำที่อยู่ในชิ้นงานทั้งหมดออกไป ซึ่งจะส่งผลให้แผ่นปิดมีการม้วนตัวมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของเมธิลแอลกอฮอล์ต่ำทำให้โลหะที่อยู่บน SU-8 มีการหดตัวมากกว่า และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

ภาคผนวก ข

กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุดภาคบนฐานโลหะทองแดง

กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานโลหะทองแดง

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบน
ฐานโลหะทองแดง ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2

- (ก) เตรียมแผ่นวงจรพิมพ์หน้าเดียวชนิดแผ่นอีพอกซี ซึ่งสามารถป้องกันการดูดซึมของเหลวได้
- (ข) นำแผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าวไปเข้าเครื่องยิงเม็ดทราย เพื่อสร้างพื้นผิวของทองแดงให้มีความขรุขระเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิกเกิลและทองแดง และตัดแบ่งเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 นิ้ว \times 1.5 นิ้ว หลังจากนั้นจึงนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาทีเพื่อกำจัดฝุ่นละอองต่างๆ ล้างคราบไขมันด้วย ไตรคลอโรเอธิลีน อะซีโตน และจุ่มล้างน้ำบริสุทธิ์ อีก 3 ครั้ง หลังจากนั้นเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และกำจัดความชื้นบนผิวทองแดงด้วย อุณหภูมิ 90°C ในเตาอบ เป็นเวลา 30 นาที
- (ค) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 2010 ด้วยการหมุนเคลือบด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 2100 ด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที นำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที และทำการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชชนิดลบ SU-8 2100 อีกครั้งตามเงื่อนไขเดิม จะเห็นว่าในขั้นตอนนี้จะมีการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิชด้วยกันทั้งหมด 3 ครั้ง
- (ง) ถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิช เป็นเวลา 120 วินาที และนำไปอบในเตาอบ (post exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง และนำไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิชส่วนที่ไม่โดนฉายแสง ล้างด้วย IPA และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กำจัดความชื้นและเพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นฟิล์ม โดยนำไปอบบนแผ่นความร้อน (hard bake) ที่อุณหภูมิ 150-200 °C เป็นเวลา 5 นาที ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที

- (จ) ทำความสะอาดทองแดงด้วยสารละลาย H_2SO_4 5 % และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วจึงนำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส 5 mA/cm^2 เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง หรือจนกว่ามวลนิกเกิลจะสูงเกินกว่าผิว SU-8
- (ฉ) ขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 500 จนกระทั่งผิวของนิกเกิลและ SU-8 เรียบเสมอกัน เครื่องขัดจะกำหนดความเร็วงานขัดอยู่ที่ 300 rpm และความเร็วงานจับชิ้นงานอยู่ที่ 150 rpm แรงที่ใช้กดชิ้นงานอยู่ที่ 20 N และใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นระหว่างการขัดผิวชิ้นงาน
- (ช) ทำความสะอาดผิวชิ้นงานตามกระบวนการในข้อ (ข) และนำไปเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2100 อีก 2 ครั้ง ตามกระบวนการข้อ (ค) และ ผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีตามกระบวนการในข้อ (ง) ซึ่งจะได้แบบโครงสร้างชั้นที่ 2 ของฐานไมโครเว้า
- (ซ) นำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ตามกระบวนการในข้อ (จ)
- (ฌ) ขัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 500 จนกระทั่งผิวของนิกเกิลและ SU-8 เรียบเสมอกัน เครื่องขัดจะกำหนดความเร็วงานขัดอยู่ที่ 300 rpm และความเร็วงานจับชิ้นงานอยู่ที่ 150 rpm แรงที่ใช้กดชิ้นงานอยู่ที่ 20 N และใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นระหว่างการขัดผิวชิ้นงาน แล้วจึงขัดด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 1200 ตามเงื่อนไขเดียวกัน แต่จะใช้เวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการขัดมัน ซึ่งจะเริ่มจากการขัดด้วยผ้าขัดชนิด DP Mol, DP Nap และ OP Chem ด้วยผงขัดเพชรขนาด $3 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ และ $0.1 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ทั้ง 3 ขั้นตอนจะมีเงื่อนไขการขัดเดียวกัน คือ ใช้ความเร็วงานหมุนที่ 150 rpm และความเร็วงานจับชิ้นงานอยู่ที่ 150 rpm แรงที่ใช้กดชิ้นงานอยู่ที่ 20 N เป็นเวลา 10 นาที
- (ญ) สกัดทองแดงที่อยู่ชั้นล่างของนิกเกิลออกในสารละลาย $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ ที่อัตราส่วน 1ml:5ml:50ml ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ต่อ 1 ชิ้นงาน และจะได้แผ่นนิกเกิลที่มีก่อนมวล SU-8 ที่อุดช่องอากาศเอาไว้หลุดออกมาจากแผ่นวงจรพิมพ์
- (ฎ) นำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งถ้ารวมระยะเวลาทั้งหมดตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจนกระทั่งเย็นตัวลงจะใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมงจึงสามารถนำชิ้นงานออกมาได้ ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าว สามารถที่จะทำลายพันธะยึดเหนี่ยวของ SU-8 ได้ หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานมาทำความสะอาดตามกระบวนการในข้อ (ข) เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

ภาคผนวก ค

กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุดภาคบนฐานกราฟต์

กระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบนฐานกราฟไฟต์

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการสร้างช่องทางเดินแก๊สจุลภาคบน
ฐานกราฟไฟต์ ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2

- (ก) ทำความสะอาดแกรไฟต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ทั่วทั้งแผ่น ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง 5 นาที ทำการล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที
- (ข) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2100 ด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ด้วยความเร็ว 420 rpm นำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2100 ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ด้วยความเร็ว 420 rpm และนำไปอบในเตาอบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงทำการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2100 อีกครั้ง ตามเงื่อนไขเดิม ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะมีการเคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสทั้งหมด 3 ครั้ง
- (ค) ถ่ายแบบลวดลายโครงสร้างด้วยแสง UV ผ่านโฟโตมาสก์ลงบนสารไวแสงโฟโตริซิส เป็นเวลา 120 วินาที และนำไปอบในเตาอบ (post exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง นำไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิสส่วนที่ไม่โดนฉายแสง ล้างด้วย IPA และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน กำจัดความชื้นและเพิ่มความแข็งแรงให้ชั้นฟิล์มโดยนำไปอบบนแผ่นความร้อน (hard bake) ที่อุณหภูมิ 150-200°C เป็นเวลา 5 นาที หรือ ในเตาอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที และปิดเทปกาวใสเข้าที่ด้านล่างของฐานแกรไฟต์ เพื่อป้องกันนิกเกิลถูกชุบด้วยไฟฟ้าที่ด้านล่าง
- (ง) นำชิ้นงานไปชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแส 5 mA/cm² เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมงหรือจนกว่ามวลนิกเกิลจะสูงใกล้เคียงกับผิว SU-8

- (จ) นำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งถ้ารวมระยะเวลาทั้งหมดตั้งแต่อุณหภูมิเริ่มต้นจะกระทั่งเย็นตัวลงจะใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมงจึงสามารถนำชิ้นงานออกมาได้ โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถที่จะทำลายพันธะยึดเหนี่ยวของ SU-8 ได้
- (ฉ) ตัดแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 ส่วนและนำไปติดกับตัวจับยึดชิ้นงานด้วยเรซินที่อุณหภูมิ 140°C โดยให้ด้านที่เป็นนิกเกิลติดกับตัวจับยึดชิ้นงาน และขัดผิวหน้าแกรไฟต์ด้วยกระดาษทรายซิลิโคนคาร์ไบด์เบอร์ 1200 จนกระทั่งผิวของนิกเกิลปรากฏขึ้น เครื่องขัดจะกำหนดความเร็วงานขัดอยู่ที่ 150 rpm และความเร็วงานจับชิ้นงานอยู่ที่ 150 rpm แรงที่ใช้กดชิ้นงานอยู่ที่ 5 N และใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นระหว่างการขัดผิวชิ้นงาน จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการขัดมันซึ่งจะเริ่มจากการขัดด้วยผ้าขัดชนิด DP Mol และ DP Nap ด้วยผงขัดเพชรขนาด 3 μm และ 1 μm ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนจะมีเงื่อนไขการขัดเดียวกัน คือ ใช้ความเร็วงานหมุนที่ 150 rpm และความเร็วงานจับชิ้นงานอยู่ที่ 150 rpm แรงที่ใช้กดชิ้นงานอยู่ที่ 20 N เป็นเวลา 10 นาที ขั้นสุดท้ายเป็นการขัดผิวด้วยผ้าขัดชนิด DP Nap โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นแทนผงขัดเพชร
- (ช) นำชิ้นงานออกจากตัวจับยึดและล้างอะซิโตนให้สะอาด และทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่สูง 5 นาที ในน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบแห้งที่ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

ภาคผนวก ง

กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สอุตสาหกรรมให้เรียบ

กระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สจุลภาคให้เรียบ

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

แสดงรายละเอียดขั้นตอนและลำดับกระบวนการทำช่องทางเดินแก๊สจุลภาคให้เรียบ ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.3

- (ช) ประกอบติดฐานนิกเกิล และแผ่นทดสอบด้วยกาวเงินนำไฟฟ้า จัดเรียงช่องทางเดินแก๊สให้ตรงกับรูของฐานรองด้วยการมองผ่านแสง ภายหลังการประกอบเข้าด้วยกัน นำแผ่นกระจกมาวางทับเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเป่าช่องทางเดินแก๊สด้วยแก๊สไนโตรเจนจากทางด้านบน
- (ฅ) หยดสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ P4620 เข้าทางด้านล่างของแผ่นทดสอบ จุดสารไวแสงให้ไหลออกมาที่ผิวนิกเกิลด้วยท่อสายน้ำเกลือต่อกับปั๊มดูดอากาศ สารไวแสงโฟโตริซิสจะถูกดูดออกมาซึ่งสามารถสังเกตได้จากสีแดงของสารไวแสงโฟโตริซิส นำไปดูดอากาศภายในสารไวแสงออกในตู้สูญญากาศประมาณ 3 ชั่วโมง จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงแห้งสนิท และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที
- (ฉ) นำกระดาษทิชชูชุบอะซิโตนให้หมาด เช็ดสารไวแสงโฟโตริซิสด้านแผ่นวงจรพิมพ์ให้สะอาด
- (ค) ขัดผิวด้านนิกเกิลด้วยผ้าขัด DP Mol และผงขัดเพชรขนาด 3 μm ที่ความเร็ว 600 rpm จนสารไวแสงที่ผิวออกหมด และขัดด้วยผ้าขัด DP Nap และผงขัดเพชรขนาด 1 μm ที่ความเร็ว 150 rpm และทำความสะอาดผิวด้วยผ้าขัด DP Nap โดยใช้ น้ำสะอาดเป็นสารหล่อลื่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงโฟโตริซิสแข็งตัวมากที่สุด
- (ข) เตรียมผิวนิกเกิลก่อนนำไปเคลือบคูลูมิเนียมด้วยกระบวนการพลาสมาของออกซิเจน ที่ระดับความดัน 0.3 mbar 100 W เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดสารไวแสงโฟโตริซิสที่ตกค้างอยู่บนผิวนิกเกิลออกให้หมด

ภาคผนวก จ

กระบวนการสร้างแผนกานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส

กระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบนช่องทางเดินแก๊ส

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

แสดงรายละเอียดขั้นตอน และลำดับกระบวนการสร้างแผ่นคานปลายอิสระบน
ช่องทางเดินแก๊ส ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.4

- (ก) ทำความสะอาดผิววงเกิดด้วยพลาสมาของออกซิเจน ที่ความดัน 0.3 mbar 100 W เป็นเวลา 2 นาที และเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน
- (ข) เคลือบอลูมิเนียมซึ่งเป็นชั้นวัสดุชั่วคราวด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศโดยมีความหนาประมาณ 0.5 μm
- (ค) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ 1512 ที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 25 นาที แล้วจึงฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านมาสก์ เป็นเวลา 60 วินาที นำชิ้นงานไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิสส่วนที่โดนฉายแสงออก ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 25 นาที
- (ง) สกัดอลูมิเนียมในสารละลาย [$\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}$] ในอัตราส่วน [16:1:1:2] ที่อุณหภูมิ 40°C ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ล้างสารไวแสงออกในอะซิโตน และล้างน้ำบริสุทธิ์อีกครั้ง เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
- (จ) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดลบ SU-8 2002 ด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 500 rpm 5 วินาที และ 3000 rpm 30 วินาที จะได้ความหนาประมาณ 2 μm อบ (soft bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจะกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านมาสก์เป็นเวลา 60 วินาที และอบ (post exposure bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที นำชิ้นงานไปลอกสารไวแสงโฟโตริซิสส่วนที่ไม่โดนฉายแสงออก ล้างด้วย IPA เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบ (hard bake) ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที
- (ฉ) เคลือบชั้นโลหะโครเมียม 0.15 μm และชั้นโลหะอลูมิเนียม 0.1 μm ด้วยกระบวนการระเหยไอในสุญญากาศ ตามลำดับ
- (ช) เคลือบสารไวแสงโฟโตริซิสชนิดบวก AZ 1512 ด้วยการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และที่ 2500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 25

- นาที จากนั้นจึงฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่านมาสก์ เป็นเวลา 60 วินาที เพื่อสร้างเข้้าขึ้นรูปนิกเกิลบนแผ่นคาน นำชิ้นงานไปลอกสารไวแสงโฟโตริซีสส่วนที่โดนฉายแสงออกล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 25 นาที
- (ซ) ทำความสะอาดผิวทองแดงด้วยพลาสติกของออกซิเจน ที่ความดัน 0.3 mbar 100 W เป็นเวลา 1 นาที ทำความสะอาดผิวทองแดงอีกครั้งด้วยสารละลาย H_2SO_4 5% และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- (ฌ) ชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าลงบนผิวทองแดงที่อยู่บนแผ่นคาน ที่ความหนาแน่นกระแส 4.5 mA/cm² เป็นเวลา 3 นาที และล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- (ญ) ล้างสารไวแสงที่เคลือบผิวหน้าและที่อุดอยู่ในช่องทางเดินแก๊สออกในอะซิโตน โดยจุ่มชิ้นงานไว้ประมาณ 8 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- (ฎ) สกัดชั้นทองแดงออกในสารละลายที่มีอัตราส่วนผสม 1:1:20 ของ [$H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$] ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนและอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที
- (ฏ) นำชิ้นงานประกบกับแผ่นกระจก โดยให้ด้านแผ่นคานคว่ำหน้าลง และปิดรอบฐานด้วยเทปพอลิไมด์ ยกเว้นบริเวณรูทางเข้าของแก๊ส นำเข้าเครื่องพลาสติกของออกซิเจน ที่ความดัน 0.5 mbar 200 W เป็นเวลา 16 ชั่วโมงหรือจนกว่าสารไวแสงที่อุดช่องทางเดินแก๊สจะถูกกัดออกไปจนหมด หลังจากนั้นจึงนำเทปพอลิไมด์ออก
- (ฐ) สกัดชั้นโครเมียมในสารละลายที่มีอัตราส่วนผสม 1:3 ของ [50g NaOH:100ml H₂O] : [30g K₃Fe(CN)₆:100ml H₂O] ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- (ฑ) นำชิ้นงานประกบกับแผ่นกระจกอีกครั้ง โดยให้ด้านแผ่นคานคว่ำหน้าลง และปิดรอบฐานด้วยเทปพอลิไมด์ ยกเว้นบริเวณรูทางเข้าของแก๊ส นำเข้าเครื่องพลาสติกของออกซิเจน ที่ความดัน 0.5 mbar 200 W เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำเทปพอลิไมด์ออก
- (ท) สกัดชั้นออกซิเดียมออกในสารละลายกรด HF 24% ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 15 นาที ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ จุ่มชิ้นงานในเมทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 30 นาที
- (ฑ) วางชิ้นงานให้แห้งในอุณหภูมิห้อง และเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเข้าทางด้านล่าง เพื่อให้แก๊สดันแผ่นคานขึ้น และทำให้ได้แผ่นปิดแห้งสนิท
- (ณ) ต่อลวดเงินนำไฟฟ้าเข้ากับฐานรองนิกเกิลและแผ่นปิดด้วยกาวเงินนำไฟฟ้า นำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นในเตาอบจนถึงอุณหภูมิห้อง

ภาคผนวก จ

โปรแกรม **MATLAB** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โปรแกรม จำลองการโค้งตัวของแผ่นคานปลายอิสระเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ
โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

```
clear all
L = 1040e-6; % ความยาวของแผ่นคานปลายอิสระ
wbeam = 720e-6; % ความกว้างของแผ่นคานปลายอิสระ
tsu8 = 2e-6; % ความหนาของชั้นวัสดุ su-8
Esu8 = 4.5e9; % ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ su-8
tni = 0.5e-6; % ความหนาของชั้น โลหะนิกเกิล
Eni = 2.205e11; % ค่ามอดูลัสของยังของชั้น โลหะนิกเกิล
tg = 0.5e-6; % ระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองในระนาบปกติ
tbeam = tsu8+tni; % ความหนาของแผ่นคานปลายอิสระ
E1 = Eni; E2 = Esu8;
t1 = tni; t2 = tsu8;
m = E2/E1; n = t2/t1;
K = 1+4*m*n+6*m*n^2+4*m*n^3+m^2*n^4;
EIequiv = (E1*wbeam*t1^3)/(12*(1+m*n))*K;
% ความต้านทานแรงสมมูลของแผ่นคานที่เกิดจากการซ้อนทับ
% ของชั้นวัสดุ 2 ชนิด
sigma1 = 1e8; % ประมาณค่าความเค้นภายในของชั้น โลหะนิกเกิล
sigma2 = 0.9e8; % ประมาณค่าความเค้นภายในของชั้นวัสดุ su-8
dx = 10e-6; % ระยะห่างตามแนวความยาวแผ่นคาน
x = linspace(0,L,dx+1); % กำหนดจุดคำนวณตามแนวความยาวแผ่นคาน
zx = (sigma1-sigma2)/12 * (tbeam^2*wbeam)/EIequiv * x.^2/2;
% คำนวณระยะยกตัวของแผ่นคานตามตำแหน่งที่กำหนดไว้
gap = tg+zx; % บวกระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานเข้ากับระยะยกตัว
plot(x,gap,'k','LineWidth',3) % แสดงกราฟการคำนวณ โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการ
% ออกแบบสร้าง
grid
title('The height of beam vs. length of beam')
xlabel('Length of cantilever beam (m)')
ylabel('The height of beam with respect to the fixed end (m)'); figure(2)
```



```

B = t/2 + (E1*t1^3 + E2*t2^3)/(6*t) * (1/E1/t1 + 1/E2/t2);
% จำนวนตัวของสมการ (3-22)

invp = A/B;
% จำนวนส่วนกลับของรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน

zx(count,:) = (x.^2)/2*invp;
% จำนวนระยะเคลื่อนที่ขึ้นตามความยาวของแผ่นคาน

end

zx = zx+tg;
% บวกระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานเข้ากับระยะยกตัว

plot(x,zx,'k','LineWidth',2.5);
% แสดงกราฟการคำนวณโดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำการออกแบบ

grid

title('The height of the beam vs. length of beam')

xlabel('Length of cantilever beam (m)')

ylabel('The hight of the beam with respect to the ground plane (m)')

x_normallize = x/L;
% ทำผลเฉลยตามแกน x ให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

y_normallize = zx/max(zx(count,:));
% ทำผลเฉลยตามแกน y ให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

figure(2)

plot(x_normallize,y_normallize,'k','LineWidth',2.5)
% แสดงกราฟผลเฉลยที่ทำเป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

grid

axis([0 1.1 -0.1 1.1])

title('Normalize the height of the beam vs. length of beam')

xlabel('Length of cantilever beam')

ylabel('The hight of the beam with respect to the ground plane')

*****

โปรแกรมจำลองการโค้งตัวของแผ่นคานปลายอิสระที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความ
เค้นภายในชั้นวัสดุเมื่อชั้นโลหะนิกเกิลมีค่าเปลี่ยนแปลง
โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

*****

clear all

alpha1 = 13.3e-6;
% ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของ โลหะนิกเกิล
% = 13.3 ppm/K

E1 = 4.5e9;
% ค่ามอดูลัสของยังของชั้น โลหะนิกเกิล

sigma1 = 1e6;
% ประมาณค่าความเค้นภายในของชั้น โลหะนิกเกิล = 1 MPa

alpha2 = 50e-6;
% ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเหตุความร้อนของชั้นวัสดุ
% su-8 = 50 ppm/K

E2 = 4.5e9;
% ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ su-8

```

```

t2 = 2e-6; % ความหนาของชั้นวัสดุ su-8
sigma2 = 0.9e6; % ประมาณค่าความเค้นภายในของชั้นวัสดุ su-8 = 0.9 MPa

L = 1040e-6; % ความยาวของแผ่นคานปลายอิสระ
tg = 0.5e-6; % ระยะห่างระหว่างแผ่นปิดกับฐานรองในระนาบปกติ
% ที่ไม่มีการโค้งตัวขึ้น
dT = 5; % กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
count = 0; % กำหนดค่าเริ่มต้นของการนับจำนวนรอบคำนวณ
dt = 1e-6; % กำหนดช่วงความหนาของชั้นโลหะนิกเกิลที่จะนำมาคำนวณ
% ในแต่ละรอบการคำนวณ

dx = 1e-6; % ช่วงคำนวณตามระยะห่างตามแนวยาวของแผ่นคาน
x = linspace(0,L,L/dx+1); % กำหนดจุดคำนวณตามแนวความยาวแผ่นคาน
for t1 = 1e-6:dt:5e-6 % เริ่มการคำนวณ
    t = t1+t2; % ความหนาของแผ่นคานปลายอิสระ
    count = count+1;
    A = (alpha2-alpha1)*dT - sigma1/E1 + sigma2/E2;
    % คำนวณตัวเศษของสมการ (3-22)
    B = t/2 + (E1*t1^3 + E2*t2^3)/(6*t) * (1/E1/t1 + 1/E2/t2);
    % คำนวณตัวส่วนของสมการ (3-22)
    invp = A/B; % คำนวณส่วนกลับของรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน
    % โค้งปลายอิสระ
    zx(count,:) = tg+(x.^2)/2*invp(count);
    % คำนวณระยะเคลื่อนที่ขึ้นตามความยาวของแผ่นคาน
    % โค้งปลายอิสระ
end
figure(1)
plot(x,zx,'k','LineWidth',2.5) % แสดงผลการยกตัวของแผ่นคานปลายอิสระ
grid
title('Varidation of thickness of the nickel layer vs. radius of curvature')
xlabel('Length of cantilever beam (m)')
ylabel('The hight of the beam with respect to the ground plane (m)')
figure(2)
plot([1e-6:dx:5e-6],1./invp,'k','LineWidth',3)
% แสดงรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาชั้นนิกเกิล
grid

```

```

title('Varidation of thickness of the bottom layer vs. radius of curvature')
xlabel('Thickness of nickel layer')
ylabel('Radius of curvature')

*****

โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก
เปลี่ยนแปลง
โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549
*****

clear all
L = 1040e-6; % ความยาวของแผ่นคานปลายอิสระ
wbeam = 720e-6; % ความกว้างของแผ่นคาน
A = L*wbeam; % พื้นที่ตัวนำไฟฟ้าด้านบน
Gt = 5; % กำหนดจำนวนระดับความหนาชั้นไดอิเล็กทริก
eo = 8.854e-12; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สัมบูรณ์
er = 3.5; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นวัสดุ SU-8
for g = 0:1:Gt-1
    gair = (Gt-g)*1e-6; % ระยะช่องอากาศเปลี่ยนแปลงเมื่อชั้น ไดอิเล็กทริกหนาขึ้น
    gdi = g*1e-6; % ความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริก
    C2 = er*eo*A/gdi; % ความจุไฟฟ้าคงที่ของชั้น ไดอิเล็กทริก
    C1o = eo*A/gair; % ความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามระยะช่องอากาศ
    Co = inv(1/C1o+1/C2); % ความจุไฟฟ้ารวม
    count = 1;
    zt = []; xt = [];
    for z=0:0.01e-6:gair % ปรับเปลี่ยนระยะช่องอากาศในระบบ
        C1 = eo*A/(gair-z); % คำนวณความจุไฟฟ้าที่เกิดจากช่องอากาศที่เปลี่ยนไป
        C = inv(1/C1+1/C2); % คำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวม
        x = Co*sqrt(z)/(C*sqrt(gair)); % ทำผลเฉลยของแรงดันไฟฟ้าเป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับ
        % แรงดันไฟฟ้าที่ใช้เมื่อไม่มีการเปลี่ยนระยะช่องอากาศ
        yt = z/Gt/1e-6; % ทำผลเฉลยระยะเคลื่อนที่ให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกับระยะ
        % ช่องอากาศในสภาวะปกติ
        zt(count) = yt; % บันทึกระยะเคลื่อนที่
        xt(count) = x; % บันทึกแรงดันไฟฟ้า
        count = count+1;
    end
    maxp = find(xt == max(xt)); % หาแรงดันไฟฟ้าสูงสุดก่อนการเกิดแถบดัดยึด

```

```

plot(xt(1:maxp),-zt(1:maxp),'k','LineWidth',2);
hold on
plot(xt(maxp:length(xt)),-zt(maxp:length(xt)),'-k','LineWidth',2)
end
grid
xlabel('Voltage')
ylabel('Displacements')
axis([0 0.6 -1.1 0.1])

*****
โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นคานเมื่อไม่มีการโค้งตัวขึ้น
โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549
*****

clear all
L = 1040e-6; % ความยาวของแผ่นคาน
wbeam = 720e-6; % ความกว้างของแผ่นคาน
tsu8 = 2e-6; % ความหนาของชั้นวัสดุ SU-8
Esu8 = 4.5e9; % ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ SU-8
tni = 0.5e-6; % ความหนาของชั้นโลหะนิกเกิล
Eni = 2.205e11; % ค่ามอดูลัสของยังของโลหะนิกเกิล
tg = 0.5e-6; % ความสูงของช่องอากาศ
tbeam = tsu8+tni; % ความหนาของแผ่นคาน
m = Esu8/Eni;
n = tsu8/tni;
K = 1+4*m*n+6*m*n^2+4*m*n^3+m^2*n^4;
ELequiv = (Eni*wbeam*tni^3)/(12*(1+m*n))*K;
% ความต้านแรงสมมูลของแผ่นคาน
A = L*wbeam; % พื้นที่ของตัวนำไฟฟ้าด้านบน
k = 48*ELequiv/L^3; % ความแข็งดิ่งของแผ่นคาน
eo = 8.854e-12; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สัมบูรณ์
er = 3.5; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นวัสดุ SU-8
go = tg+tsu8; % ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและล่าง
C2 = er*eo*A/tsu8; % ความจุไฟฟ้าคงที่จากชั้นไดอิเล็กทริก
count = 1;
Vpi = sqrt(8*k* (go+tsu8/er)^3 /27/eo/A);

```

```

% คำนวณแรงดันแบบติดยึด
for z=0:0.01e-6:tg % แปลงค่าระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน
    C1 = eo*A/(tg-z); % คำนวณความจุไฟฟ้าของช่องอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป
    C = C1*C2/(C1+C2); % คำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวม
    v(count) = sqrt(1*k*z*eo*A)/C;% บันทึกค่าแรงดันที่เกิดขึ้นที่ระยะเคลื่อนที่ต่างๆ
    dis(count) = z; % บันทึกระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน
    count = count+1;
end
maxp = find(v == max(v)); % ตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้
plot(Vpi/max(v)*v(1:maxp),-dis(1:maxp),'k','LineWidth',2);
% แสดงผลการจำลองสถานการณ์

hold on
plot(Vpi/max(v)*v(maxp:length(v)),-dis(maxp:length(v)),'-k','LineWidth',2)
axis([0 Vpi+0.1 -tg-2e-7 0])
grid
xlabel('Voltage (volt)')
ylabel('Displacement (m)')
legend('stable','unstable',2);
fprintf('Pull-in voltage Displacement\n')
fprintf('%d %d',Vpi,dis(maxp))

```

โปรแกรมจำลองคู่ควบกล-ไฟฟ้าของแผ่นคานโค้งปลายอิสระ

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนกุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

```

clear all;
d = 100; % กำหนดจำนวนโนดตามความยาวแผ่นคาน
N = d+4; % เพิ่มจุดในการคำนวณด้านละ 2 จุด
Z = 10; % จำนวนรอบการทำซ้ำสูงสุด
L = 1040e-6; % ความยาวของแผ่นคาน
w = 720e-6; % ความกว้างของแผ่นคาน
t = 2e-6; % ความหนาของแผ่นคาน
g = 0.5e-6; % ความสูงของช่องอากาศ
E = 4.5e9; % ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ SU-8
dsdy = 0.3e12; % ความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ

```

```

tip = d+2;
e = 8.8541878e-12; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สัมบูรณ์
er = 3.5; % ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นวัสดุ su8
tsu8 = 2e-6; % ความหนาของชั้นวัสดุ su8
h = L/(d-1);
w1 = w;
I = t^3/36 * (w^2+4*w*w1+w1^2)/(w+w1); % คำนวณ โมเมนต์
k = 2*E*t^3/(3*L^4); % ค่าความแข็งดึงของแผ่นคาน
y = g*ones(N,1); % ระยะความสูงในระนาบปกติของแผ่นคานปลายปล่อย
y_old = y; % เก็บระยะเคลื่อนที่ได้เปรียบเทียบกับค่าวนรอบต่อไป
r = zeros(N,1); % เตรียมเมตริกซ์ระยะการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้น
A = zeros(N,N); % เตรียมเมตริกซ์ค่าความแข็งดึง
C = zeros(N,1); % เตรียมเมตริกซ์ผลเฉลยของสมการ
y4p = zeros(N,1); % เตรียมเมตริกซ์ผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับ 4
con = zeros(N,1); % เตรียมเมตริกซ์ผลเฉลยระยะเคลื่อนที่ได้
if dsdy ~= 0 % ถ้ามีความเค้นในแผ่นคาน
    Radius = E/dsdy; % คำนวณรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน
    for i = 1:N
        con(i) = Radius - sign(Radius)*(Radius^2-((i-3)*h)^2)^0.5;
        % คำนวณระดับการยกตัวเริ่มต้นตามยาวของแผ่นคาน
    end
else % ถ้าไม่มีความเค้นภายใน
    con = zeros(N,1); % ไม่มีระยะยกตัวเริ่มต้น
end
A(1,3) = 1; % เมตริกซ์ค่าความแข็งดึง
A(2,2) = -1;
A(2,4) = 1;
A(N-1,N-3) = 1;
A(N-1,N-2) = -2;
A(N-1,N-1) = 1;
A(N,N-4) = -1;
A(N,N-3) = 2;
A(N,N-1) = -2;
A(N,N) = 1;

```

```

Vt = input('Enter voltage: ');           % ป้อนแรงดันไฟฟ้าทดสอบ
dv = 1;                                  % ระดับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้า
count_v = 0;
x = linspace(0,L,L/h+1);
for V = 0:dv:Vt                            % เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับทดสอบ
    count_v = count_v+1;
    b = -e*V^2*w*h/(2*E*I);                % แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำ
    c = 0.65*b/w/h;                        % แรงไฟฟ้าสถิตจากสนามไฟฟ้ารั่วไหล
    phi = 0;
    count = 0;
    r(tip) = 1;
    y = y_old;
    while abs(r(tip)/y(tip)) > 1e-5        % กระบวนการทำซ้ำ
        for i=3:N-2                        % จำนวนเมตริกซ์แข็งตั้ง
            y4p(i) = (y(i-2)-4*y(i-1)+6*y(i)-4*y(i+1)+y(i+2))/h^4;
            A(i,i-2) = 1;
            A(i,i-1) = -4;
            A(i,i) = 6+2*h^4/(y(i)+con(i)+tsu8/er)*(y4p(i)-c/(2*(y(i)+con(i)+tsu8/er)));
            A(i,i+1) = -4;
            A(i,i+2) = 1;
            C(i) = h^4*(b/(y(i)+con(i)+tsu8/er)^2-y4p(i)+c/(y(i)+con(i)+tsu8/er));
        end
        r=A\C;                             % หาผลเฉลยของระยะเคลื่อนที่
        if count > Z                        % ตรวจสอบรอบการทำซ้ำสูงสุด
            y=y+(r/(count)^0.5);
        else
            y=y+r;
        end
        count = count + 1;
    end
    y=(y+con);                             % ระยะเคลื่อนที่ใหม่
    yy = y(3:length(y)-2);
    if min(yy) < 0                          % ตรวจสอบการแนบติดกับฐานรอง
        fy = find(yy < 0);
        yy(fy) = 0;
    end
end

```

```

ystore(count_v,:) = 1e6*y;           % บันทึกแรงดันไฟฟ้าที่ใช้คำนวณ
ytip(count_v) = 1e6*y(N-2);         % บันทึกระยะเคลื่อนที่
end
figure(1)
plot(1e6*x',ystore,'-k','LineWidth',2);
xlabel('Length of beam (um)');
ylabel('Displacement (um)');
figure(2)
plot(0:dv:Vt,ytip,'-k','LineWidth',2)
xlabel('Voltage (volt)');
ylabel('Displacement (um)');
Maximun_gap = max(ystore(1,:))
Error = r(tip)/y(tip)

```

โปรแกรมจำลองอัตราไหลของมวลแก๊ส

โดย นายรุ่งเรือง พัฒนากุล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2549

```

clear all; close all
p1 = 110e3;           % แรงดันแก๊สขาเข้า
p2 = 104.1e3;        % แรงดันแก๊สขาออก
r = 1.4;             % อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
R = 0.287;          % ค่าคงที่ของแก๊สสัมพัทธ์ต่อน้ำหนักโมเลกุล
T = 298.15;         % อุณหภูมิ (K)
Vcritical = (2/(r+1))^(r/(r+1)); % ค่าวิกฤตในการเลือกรูปแบบการไหล

%*****
% โปรแกรมจำลองการแปรผันตรงของสัมประสิทธิ์การสูญเสียและอัตราการไหลของมวลแก๊ส
%*****

A = (70e-6)^2;      % พื้นที่ทางออกของช่องทางเดินแก๊ส
Ci = [0:0.1:1];    % สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
if p2/p1 < Vcritical % ตรวจสอบการไหลแบบ sonic
    m = A*p1*sqrt(r/R*T*(2/(r+1))^(r+1)/(r-1));
    % คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊สแบบ sonic
    msonic = m*Ci; % เมื่อพิจารณาร่วมกับสัมประสิทธิ์การสูญเสีย
    plot(Ci,msonic,'k')

```



```

title('Mass flow rate to discharge coefficient of sonic flow')
elseif p2/p1 >= Vcritical          % ตรวจสอบการไหลแบบ subsonic
    m = A*p1*sqrt(2*r/(r-1)/R/T*( (p2/p1)^(2/r)-(p2/p1)^((r+1)/r) ));
                                     % คำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic
    msubsonic = m*Ci;                % เมื่อพิจารณาพร้อมกับสัมประสิทธิ์การสูญเสีย
    plot(Ci,msubsonic,'k')
    title('Mass flow rate to discharge coefficient of subsonic flow')
end
xlabel('Discharge of coefficient')
ylabel('Mass flow rate (g/sec)')

%*****
% โปรแกรมจำลองอัตราการไหลของมวลแก๊สเมื่อความสูงของแผ่นปิดเปลี่ยนแปลงที่สัมประสิทธิ์
% การสูญเสียระดับต่างๆ เมื่อกำหนดขนาดช่องทางเดินแก๊สเท่ากับ 70 μm × 70 μm
%*****

L = 70e-6;                          % ความกว้างของช่องทางเดินแก๊ส
h = [0:0.1e-6:L];                    % ความสูงของแผ่นปิดเมื่อเคลื่อนที่ขึ้นเท่ากับระยะความกว้าง
                                     % ของช่องทางเดินแก๊ส

hs = h;
s = find(h > L/4);                   % หาระยะความสูงที่ทำให้พื้นที่ไหลออกของแก๊สได้แผ่นปิด
                                     % เท่ากับพื้นที่ช่องทางออกของแก๊ส
hs(s) = L/4;                          % กำหนดให้ระยะดังกล่าวมีค่าคงที่
A = 4*L*hs;                           % พื้นที่ไหลออกของแก๊สได้แผ่นปิดคงที่ไม่ขึ้นกับความสูงของ
                                     % แผ่นปิด

figure; hold on
if p2/p1 < Vcritical                  % ตรวจสอบการไหลแบบ sonic
    m = p1*sqrt(r/R/T*(2/(r+1))^((r+1)/(r-1)));
                                     % คำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊สแบบ sonic
    title('Mass flow rate to Actuator stroke of sonic flow')
elseif p2/p1 >= Vcritical            % ตรวจสอบการไหลแบบ sonic
    m = p1*sqrt(2*r/(r-1)/R/T*( (p2/p1)^(2/r)-(p2/p1)^((r+1)/r) ));
                                     % คำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic
    title('Mass flow rate to Actuator stroke of subsonic flow')
end
for Ci=0:0.2:1                        % ตรวจสอบการไหลที่สัมประสิทธิ์การสูญเสียค่าต่างๆ
    mflow = Ci*m*A;                   % คำนวณอัตราการไหลของมวลแก๊ส

```

```

    plot(h,mflow,'k')
end
xlabel('Actuator stroke,g (um)')
ylabel('Mass flow rate (g/sec)')

%*****
% โปรแกรมจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันสัมบูรณ์จากแหล่งจ่ายกับอัตราการไหลของ
% มวลแก๊ส เมื่อพิจารณาพื้นที่ทางออกของแก๊สที่ขนาดต่างๆ
%*****

ps = [0.001 0.01 0.1 1 10 100 1000]; % แรงดันขาเข้า
Le = 1e-6*[5 10 25 50 70 100];      % ช่องทางเดินแก๊สที่ขนาดต่างๆ
for i = 1:length(Le)
    mi(i,:) = Le(i)^2*ps*sqrt(r/R/T*(2/(r+1))^(r+1)/(r-1));
                                                % คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊ส
end
figure
loglog(ps,mi(1,:),'-ok'); hold on
loglog(ps,mi(2,:),'-xk')
loglog(ps,mi(3,:),'-*k')
loglog(ps,mi(4,:),'-sk')
loglog(ps,mi(5,:),'-dk')
loglog(ps,mi(6,:),'-vk')
legend('Ao = 5 um x 5 um','Ao = 10 um x 10 um','Ao = 25 um x 25 um', ...
       'Ao = 50 um x 50 um','Ao = 70 um x 70 um','Ao = 100 um x 100 um',6)
xlabel('Input pressure (Pa)')
ylabel('Mass flow rate (g/sec)')
title('Input pressure to Mass flow rate for sonic flow')

%*****
% โปรแกรมจำลองการไหลที่ได้รับการปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุง
%*****

ro = 0.13; % อัตราส่วนเริ่มเปลี่ยนจากช่วง seat-controlled เข้าสู่ช่วง
           % transition
n = 0.12; % ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันเลขชี้กำลังที่ได้จากการปรับเส้น
           % โคนิ่งด้วยข้อมูลจากผลการทดลอง ด้วยวิธีดอดอยเชิงเส้น
W = 4*L; % เส้นรอบนอกของช่องทางออกแก๊ส

```

```

A = L^2; % พื้นที่ช่องทางออกแก๊สจากช่องทางเดินจุลภาค
Dh = 4*A/W; % the hydraulic diameter
z = [0:0.1e-6:1.5*L]; % ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นปิด
rt = z/Dh; % อัตราส่วนระหว่างความสูงแผ่นปิดและ hydraulic
% diameter
Aeff = zeros(size(rt)); % พื้นที่ทางออกของแก๊สใต้แผ่นปิด
a1 = find(rt < ro); % กำหนดช่วง seat-controlled
a2 = find(rt >= ro & rt <= 1); % กำหนดช่วง transition
a3 = find(rt > 1); % กำหนดช่วง orifice-controlled
Aeff(a1) = W*z(a1); % พื้นที่ทางออกของแก๊สใต้แผ่นปิดช่วง seat-controlled
Aeff(a2) = W*Dh*ro+(A-W*Dh*ro)*(1-exp(-(rt(a2)-ro)/n));
% พื้นที่ทางออกของแก๊สใต้แผ่นปิดช่วง transition
Aeff(a3) = A; % พื้นที่ทางออกของแก๊สใต้แผ่นปิดช่วง orifice-
% controlled
Anoim = W*z; % พื้นที่ทางออกแก๊สตามความระยะแผ่นปิดของแบบจำลองที่
% ไม่ได้ปรับปรุง
a4 = find(Anoim > A); % กำหนดช่วง orifice-controlled ของแบบจำลองที่ไม่ได้
% ปรับปรุง
Anoim(a4) = A; % พื้นที่ทางออกแก๊สตามของแบบจำลองที่ไม่ได้ปรับปรุง
figure; hold on
if p2/p1 < Vcritical % ตรวจสอบการไหลแบบ sonic
m = Aeff*p1*sqrt(r/R/T*(2/(r+1))^(r+1)/(r-1));
% คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic ของ
% แบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว
mn = Anoim*p1*sqrt(r/R/T*(2/(r+1))^(r+1)/(r-1));
% คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic ของ
% แบบจำลองที่ไม่ได้ปรับปรุง

title('Mass flow rate to Actuator stroke of sonic flow')
elseif p2/p1 >= Vcritical % ตรวจสอบการไหลแบบ sonic
m = Aeff*p1*sqrt(2*r/(r-1)/R/T*((p2/p1)^(2/r)-(p2/p1)^((r+1)/r)));
% คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic ของ
% แบบจำลองที่ปรับปรุงแล้ว
mn = Anoim*p1*sqrt(2*r/(r-1)/R/T*((p2/p1)^(2/r)-(p2/p1)^((r+1)/r)));
% คำนวณอัตราไหลของมวลแก๊สแบบ subsonic ของ
% แบบจำลองที่ไม่ได้ปรับปรุง

```

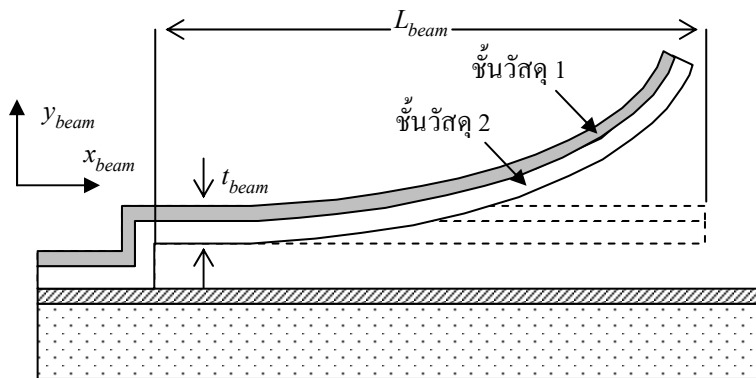
```
title('Mass flow rate to Actuator stroke of subsonic flow')  
end  
plot(rt,m,'-k') % improve flow model  
plot(rt,mn,'-k') % not improve flow model  
legend('Improve Flow Model','No Improve Flow Model',2)  
rro = find(rt >= ro);  
rr1 = find(rt >= 1);  
plot(ro,[0:0.1e-6:m(rro(1))],'-k')  
plot(1,[0:0.1e-6:m(rr1(1))],'-k')  
xlabel('g/D_i_n_l_e_t')  
ylabel('Mass flow rate (g/sec)')
```

ภาคผนวก ข

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระที่โค้งขึ้นเนื่องจาก
ความเค้นภายในชั้นวัสดุ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นปลายอิสระที่โค้งขึ้นเนื่องจากความเค้นภายในชั้นวัสดุ

แผ่นคาน โค้งปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติ สามารถจำลองพฤติกรรมการโค้งในสภาวะเริ่มต้นด้วยความเค้นภายใน (Musolf, and Khol, 2003) แผ่นคานจะถูกตั้งสมมติฐานว่า ถูกยึดที่ปลายด้านหนึ่ง และปล่อยปลายอีกด้าน ดังรูปที่ ข.1 และให้ความโค้งของแผ่นคานสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น รวมทั้งเกิดความเค้นเชิงเส้นภายในแผ่น โดยความเค้นสามารถแบ่งได้ 2 ส่วน ดังสมการ (ข-1) และแรงสุทธิบนเอลิเมนต์ของแผ่นคานในพื้นที่ขนาด $w_{beam} \cdot dy_{beam}$ ดังสมการที่ (ข-2) พิจารณา



รูปที่ ข.1 แผ่นคาน โค้งปลายอิสระที่โค้งตัวขึ้นจากระนาบปกติ

$$Stress = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right) + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}}\right) \cdot y_{beam} \quad (ข-1)$$

$$dF = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}}\right) y_{beam} \cdot w_{beam} \cdot dy_{beam} \quad (ข-2)$$

- เมื่อ $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}}\right) \cdot y_{beam}$ คือ ความเค้นที่ทำให้แผ่นคาน โค้งตัวออกจากระนาบปกติ
- $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)$ คือ ความเค้นปกติตามระนาบความยาวของแผ่นคาน
- y_{beam} คือ ระยะตามความหนาของแผ่นคาน
- w_{beam} คือ ความกว้างของแผ่นคาน
- t_{beam} คือ ความหนาของแผ่นคาน

σ_1 คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 1

σ_2 คือ ความเค้นของชั้นวัสดุ 2

โมเมนต์รอบแกนผ่านกึ่งกลางระนาบของแผ่นคาน คือ

$$dM = dF \cdot y_{beam} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}} \right) \cdot y_{beam} \cdot w_{beam} \cdot dy_{beam} \cdot y_{beam} \quad (\text{ข-3})$$

โมเมนต์สุทธิบนภาคตัดขวางของแผ่นคานสามารถหาได้จากการหาปริพันธ์สมการ (ข-3) ตลอดความหนาของแผ่นคาน จะได้ดังสมการ (ข-4)

$$\int_{-t/2}^{-t/2} dM = \int_{-t/2}^{-t/2} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t_{beam}} \right) \cdot y_{beam}^2 \cdot w_{beam} \cdot dy_{beam} \quad (\text{ข-4})$$

โมเมนต์สุทธิ M_{net} บนแผ่นคาน จะพิจารณาจากความสมมาตรภายในภาคตัดขวางของแผ่นคาน โดยทำการหาปริพันธ์จากสมการ (ข-4) ได้โมเมนต์สุทธิบนแผ่นคานดังสมการที่ (ข-5)

$$M_{net} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{12} \right) \cdot t_{beam}^2 \cdot w_{beam} \quad (\text{ข-5})$$

สมการความต้านแรงสมมูล $(EI)_{equiv}$ ของแผ่นคานที่เกิดจากการซ้อนทับชั้นวัสดุ 2 ชนิด คำนวณได้จากสมการที่ (ข-6) (Shigley, and Mitchell, 1983)

$$(EI)_{equiv} = \frac{E_1 \cdot w_{beam} \cdot t_1^3}{12(1 + m \cdot n)} \cdot K \quad (\text{ข-6})$$

เมื่อ $K = 1 + 4m \cdot n + 6m \cdot n^2 + 4m \cdot n^3 + m^2 \cdot n^4$

$$m = \frac{E_2}{E_1}, \quad n = \frac{t_2}{t_1}$$

E_1 คือ โมดูลัสของยังในชั้นวัสดุ 1

E_2 คือ โมดูลัสของยัง ของชั้นวัสดุ 2

t_1 คือ ความหนาของชั้นวัสดุ 1

t_2 คือ ความหนาของชั้นวัสดุ 2

สำหรับแผ่นคานที่ถูกยึดที่ปลายด้านหนึ่งและมีโมเมนต์กระทำที่ปลายอีกด้าน สมการความโค้งของโครงสร้างที่เกิดจากการซ้อนทับวัสดุ 2 ชนิด แสดงในสมการที่ (ซ-7)

$$(EI)_{equiv} \frac{d^2 z_{beam}}{dx_{beam}^2} = M_{net} \quad (\text{ซ-7})$$

เมื่อ z_{beam} คือ ความสูงของแผ่นคานเมื่อเทียบกับจุดปลายที่ถูกยึดที่ $x_{beam} = 0$

สำหรับแผ่นคานที่ถูกยึดที่ปลายด้านหนึ่ง เงื่อนไขขอบที่ใช้ในการแก้สมการเชิงผลต่างในสมการ (ซ-7) คือ ไม่มีการเคลื่อนที่ที่จุดยึดแผ่นคาน สมการที่ (ซ-8) และความชันที่จุดเดียวกันเท่ากับศูนย์ สมการที่ (ซ-9)

$$z_{beam}(x_{beam} = 0) = 0 \quad (\text{ซ-8})$$

$$\frac{dz_{beam}(x_{beam} = 0)}{dx_{beam}} = 0 \quad (\text{ซ-9})$$

ความสูงของแผ่นคานเมื่อเทียบกับจุดปลายที่ถูกยึดที่ $x_{beam} = 0$ ในสภาวะเริ่มต้น สามารถหาได้จากการแก้สมการเชิงผลต่างในสมการ (ซ-7) ด้วยการหาปริพันธ์อันดับ 2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x_{beam} ตามความยาวแผ่นคาน โดยใช้เงื่อนไขขอบในสมการ (ซ-8) และ (ซ-9) ซึ่งผลการหาปริพันธ์อันดับ 2 คือสมการที่ (ซ-10)

$$z_{beam}(x_{beam}) = \frac{M_{net}}{(EI)_{equiv}} \frac{x_{beam}^2}{2} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{12} \right) \cdot \frac{t_{beam}^2 \cdot w_{beam}}{(EI)_{equiv}} \cdot \frac{x_{beam}^2}{2} \quad (\text{ซ-10})$$

ภาคผนวก ข

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระที่แปรตามการ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นภายใน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานปลายอิสระที่แปรตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นภายใน

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแผ่นคานสามารถสร้างได้จากคุณสมบัติของวัสดุ 2 ชนิดได้แก่ความเค้นภายในชั้นวัสดุและวัสดุมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิแตกต่างกัน โครงสร้างแผ่นคานที่ซ้อนทับกันจะมีความยาวของแผ่นคานไม่เท่ากันและส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างออกจากระนาบปกติในทิศทางบวก (โค้งตัวขึ้น) หรือในทิศทางลบ (โค้งตัวลง) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

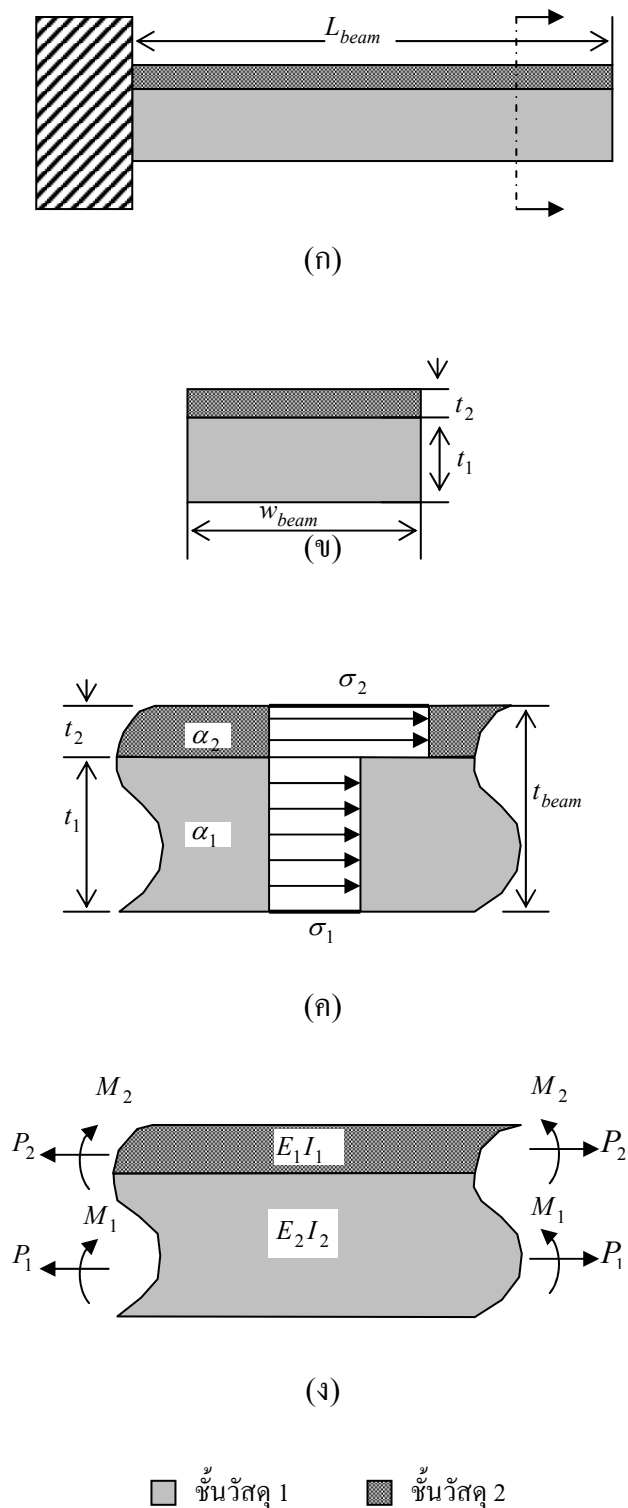
สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างนำเสนอโดย Timoshenko, (1925) และ Judy, Cho, Howe, and Pisano, (1991) โดยกำหนดสถานะเริ่มต้นของแผ่นคานอยู่ในระนาบปกติและมีความยาวคานเท่ากับ L_{beam} ดังรูปที่ ซ.1 (ก) แผ่นคานประกอบด้วยชั้นวัสดุ 2 ชนิดที่มีความหนาของชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 เท่ากับ t_1 และ t_2 ตามลำดับ และมีความกว้างของแผ่นคานเท่ากับ w_{beam} ดังรูปที่ ซ.1 (ข) ความเค้นค้ำและสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิในชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 เท่ากับ σ_1, α_1 และ σ_2, α_2 ตามลำดับ โดยทิศทางความเค้นที่แสดงในรูปที่ ซ.1 (ค) ทั้งหมดเป็นทิศทางบวกของความเค้นดึง และถ้าพิจารณาในทิศตรงข้ามจะเป็นความเค้นอัดที่เกิดขึ้น รูปที่ ซ.1 (ง) แสดงถึงแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อชั้นวัสดุ 1 และ 2 เนื่องจากความเค้นค้ำภายในชั้นวัสดุเป็น P_1, M_1 และ P_2, M_2 ตามลำดับ

สมมติให้แผ่นคานอยู่ในระนาบปกติที่อุณหภูมิห้อง ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำบนแผ่นคานและมีเฉพาแรงที่เกิดขึ้นจากความเค้นค้ำ P_1 และ P_2 กระทำผ่านกึ่งกลางของแต่ละภาคตัดขวางอยู่ในทิศทางบวกดังรูปที่ ซ.1 (ง) แรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเท่ากับแรงลัพธ์สมมูลที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ P และโมเมนต์สมมูล M ที่เกิดจากผิวสัมผัสของชั้นวัสดุทั้ง 2 ชนิด ซึ่งก็คือผลรวมของโมเมนต์ M_1 และ M_2 (Timoshenko)

$$P = P_1 = P_2 \quad (\text{ซ-1})$$

$$M = M_1 + M_2 = \frac{t_{beam} \cdot P}{2} \quad (\text{ซ-2})$$

เมื่อ P คือ แรงลัพธ์สมมูลที่เกิดขึ้นในแผ่นคาน P_1 คือ แรงกระทำผ่านกึ่งกลางภาคตัดขวางของชั้นวัสดุ 1 P_2 คือ แรงกระทำผ่านกึ่งกลางภาคตัดขวางของชั้นวัสดุ 2 M โมเมนต์



รูปที่ ๕.1 โครงสร้างและแรงกระทำกับชั้นวัสดุของแผ่นคาน (ก) โครงสร้างของแผ่นคานด้านข้าง (ข) ภาควัดขวางด้านหน้า (ค) การกระจายความเค้นภายใน (ง) แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับชั้นวัสดุ

สมมูลที่เกิดจากผิวสัมผัสของชั้นวัสดุทั้ง 2 ชนิด M_1 คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ 1 M_2 คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ 2

โดยที่

$$M_1 = \frac{E_1 I_1}{\rho} \quad (\text{ซ-3})$$

$$M_2 = \frac{E_2 I_2}{\rho} \quad (\text{ซ-4})$$

$$I_1 = \frac{w_{beam} \cdot t_1^3}{12} \quad (\text{ซ-5})$$

$$I_2 = \frac{w_{beam} \cdot t_2^3}{12} \quad (\text{ซ-6})$$

$$t_{beam} = t_1 + t_2 \quad (\text{ซ-7})$$

เมื่อ E_1 คือ ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ 1 E_2 คือ ค่ามอดูลัสของยังของชั้นวัสดุ 2 I_1 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในชั้นวัสดุ 1 I_2 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในชั้นวัสดุ 2 ρ คือ รัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานในสภาวะโค้งตัว

Timoshenko นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายถึงพฤติกรรมของตัวควบคุมอุณหภูมิ (Thermostats) ซึ่งประกอบด้วยชั้นวัสดุซ้อนทับกัน 2 ชั้น ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามอุณหภูมิต่างกันทำให้เกิดความเค้นภายในขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ส่งผลให้เกิดการโค้งตัวของแผ่นคานออกจากระนาบปกติ ความเค้นในแต่ละชั้นวัสดุประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบ ส่วนแรกคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ส่วนที่สองคือ แรงตามแกนของแผ่นคาน (P_{axis}) และส่วนที่สามคือ ส่วนโค้งของแผ่นคาน (ρ) ผลรวมของส่วนประกอบทั้ง 3 ในชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 แสดงดังสมการที่ (ซ-8)

$$\alpha_1(\Delta T) + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w} + \frac{t_1}{2\rho} = \alpha_2(\Delta T) - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (\text{ซ-8})$$

Judy นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายรัศมีส่วนโค้งของแผ่นคานที่ปรับการโค้งตัวออกจากระนาบปกติภายหลังการกัดชั้นวัสดุคั้นเพื่อให้โครงสร้างเป็นอิสระ แผ่นคานประกอบด้วย การซ้อนทับกันของชั้นวัสดุ 2 ชนิด ภายใต้เงื่อนไขความชันระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุในสถานะปกติเป็นศูนย์ ความเค้นในแต่ละชั้นวัสดุประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกคือ ความเค้นดงค้ำ (σ_1 และ σ_2) ส่วนที่สองคือ แรงตามแกนของแผ่นคาน (P_{axis}) และส่วนที่สามคือ ส่วนโค้งของแผ่นคาน (ρ) ผลรวมของส่วนประกอบทั้ง 3 ในชั้นวัสดุ 1 และชั้นวัสดุ 2 แสดงดังสมการที่ (ซ-9) โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแกนและส่วนโค้งของแผ่นคาน แสดงดังสมการที่ (ซ-10)

$$\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w_{beam}} + \frac{t_1}{2\rho} = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (\text{ซ-9})$$

$$P_{axis} = \frac{2(M_1 + M_2)}{t_{beam}} = \frac{2}{\rho \cdot t_{beam}} (E_1 I_1 + E_2 I_2) \quad (\text{ซ-10})$$

Edmonds, *et al.*, (2004) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผ่นคานโค้ง โดยการรวมสมการ (ซ-8) และ (ซ-9) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (ซ-11)

$$\alpha_1(\Delta T) + \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{P_{axis}}{E_1 \cdot t_1 \cdot w_{beam}} + \frac{t_1}{2\rho} = \alpha_2(\Delta T) + \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{P_{axis}}{E_2 \cdot t_2 \cdot w_{beam}} - \frac{t_2}{2\rho} \quad (\text{ซ-11})$$

รัศมีส่วนโค้งของแผ่นคาน (ρ) ในสถานะเริ่มต้นที่แสดงในเทอมของความเค้นภายใน ค่ามอดูลัสของยังและมีติของโครงสร้างได้จากการจัดรูปสมการที่ (ซ-11) ซึ่งจะได้ส่วนกลับของรัศมีส่วนโค้ง ดังแสดงในสมการ (ซ-12) และถ้าระนาบของแผ่นคานในสถานะเริ่มต้นไม่อยู่ในระนาบปกติหรือมีรัศมีส่วนโค้งเริ่มต้น ρ_0 จะได้รัศมีส่วนโค้งที่เปลี่ยนไปดังสมการที่ (ซ-13)

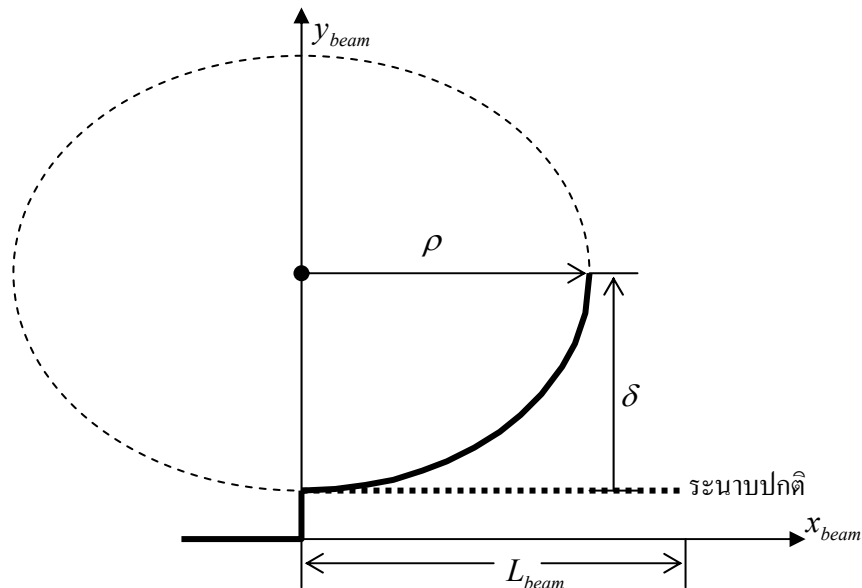
$$\frac{1}{\rho} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T - \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}}{\frac{t_{beam}}{2} + \frac{E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3}{6t_{beam}} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \quad (\text{ซ-12})$$

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T - \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2}}{\frac{t_{beam}}{2} + \frac{E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3}{6t_{beam}} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \quad (\text{ซ-13})$$

ระยะขกตัวที่ปลายแผ่นคานและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นคานที่เปลี่ยนไปจากสภาวะเดิมตามความยาวคาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้จากสมการ (ซ-14) (Mu, 2003) และ (ซ-15) (Mosolf, 2003) ตามลำดับ โดยแสดงรูปแบบทางเรขาคณิตที่แสดงพฤติกรรมของแผ่นคานโค้งดังรูปที่ ซ.2

$$\delta = \rho \left(1 - \cos \frac{L_{beam}}{\rho} \right) \quad (\text{ซ-14})$$

$$c(x_{beam}) = \frac{x_{beam}^2}{2} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (\text{ซ-15})$$



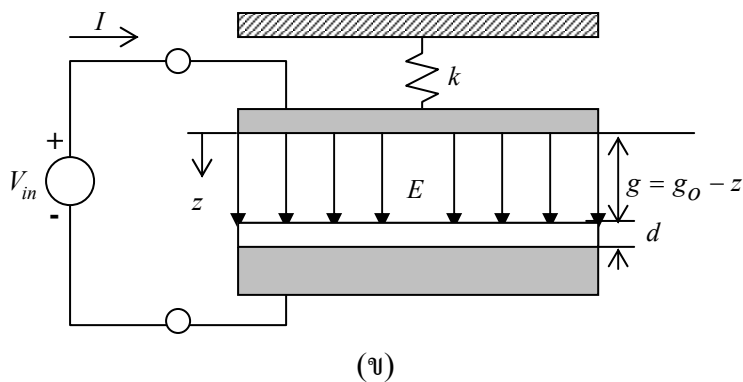
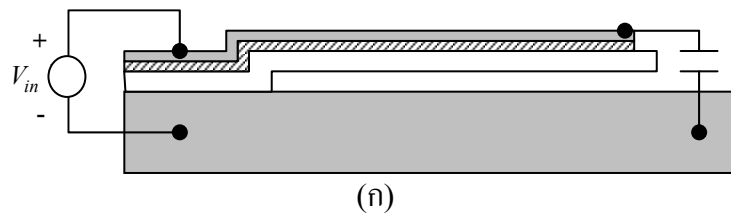
รูปที่ ซ.2 รูปแบบทางเรขาคณิตที่ใช้แสดงพฤติกรรมของแผ่นคาน โค้ง

ภาคผนวก ฅ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนาน

ไมโครวาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าสถิตชนิดแผ่นคานโค้งมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนตัวเก็บประจุ ที่ประกอบด้วยแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนาน และมีชั้นไดอิเล็กทริกวางกั้นระหว่างตัวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ ฅ.1



■ นิกเกิล □ SU-8 ▨ โครเมียม/ทองแดง

รูปที่ ฅ.1 แบบจำลอง 1 มิติ ของแผ่นคานปลายอิสระ (ก) โครงสร้างแผ่นคานปลายอิสระในระนาบปกติ (ข) โครงสร้างแผ่นตัวนำไฟฟ้าคู่ขนาน

ในการวิเคราะห์นี้ ค่าความจุไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าภายนอกแผ่นสมมติเป็นศูนย์ไม่พิจารณา และการสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุถือว่าสมบูรณ์ ในระบบนี้สมมติด้วยว่าโครงสร้างตัวเก็บประจุวางอยู่ในสุญญากาศปราศจากแรงทางกลจากภายนอกกระทำกับตัวนำไฟฟ้าด้านบน รวมทั้งสมมติให้แรงดึงกลับของแผ่นคานเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับระยะเคลื่อนที่ เมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้า (E) ขึ้นระหว่างแผ่นตัวนำส่งผลให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิต (F_e) ขึ้น แผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนซึ่งถูกแขวนลอยในอากาศด้วยโครงสร้างที่มีค่าความแข็งตึง (k) จะ

เคลื่อนที่ลงมาตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเป็นระยะทาง (z) การหาแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเริ่มจากการพิจารณาประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ (Senturia, 2001) ดังสมการที่ (ฅ-1)

$$Q = V.C = \frac{VA\varepsilon}{g} \quad (\text{ฅ-1})$$

เมื่อ Q คือ ประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่ขนานกัน

ε คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กทริก ($\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o$)

g คือ ระยะช่องอากาศระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า

ค่าความจุระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ค่าความจุไฟฟ้าแปรค่าได้ (C_1) ซึ่งเกิดจากช่องอากาศที่เปลี่ยนไปตามระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำด้านบน และค่าความจุไฟฟ้าคงที่ (C_2) ซึ่งเกิดจากชั้นไดอิเล็กทริก ดังสมการที่ (ฅ-2) และ (ฅ-3) ตามลำดับ

$$C_1 = \frac{\varepsilon_o A}{g} \quad (\text{ฅ-2})$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_o A}{d} \quad (\text{ฅ-3})$$

เมื่อ C_1 คือ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นอากาศ

C_2 คือ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นไดอิเล็กทริก

ε_o คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สัมบูรณ์ เท่ากับ $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของชั้นไดอิเล็กทริก

d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการ (ฅ-4) ดังนั้น ประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ฅ-5) และนำค่าประจุไฟฟ้าบนแผ่นตัวเก็บประจุมาคำนวณแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าได้ดังสมการ (ฅ-6)

แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงดึงกลับหรือแรงทางกลของแผ่นคาน (F_s) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนดังสมการ (ฅ-9)

โดยที่ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแผ่น ดังสมการที่ (ฉ-10)

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 A}{g + \frac{d}{\epsilon_r}} \quad (\text{ฉ-4})$$

$$Q = V \cdot C = V \cdot \frac{\epsilon_0 A}{g + \frac{d}{\epsilon_r}} \quad (\text{ฉ-5})$$

$$F_e = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 A} = \frac{V^2 C^2}{2\epsilon_0 A} = \frac{V^2}{2\epsilon_0 A} \left(\frac{\epsilon_0 A}{g + \frac{d}{\epsilon_r}} \right)^2 = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2 \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} \quad (\text{ฉ-6})$$

$$F_s = F_e \quad (\text{ฉ-7})$$

$$k \cdot z = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2 \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} \quad (\text{ฉ-8})$$

$$z = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2k \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} \quad (\text{ฉ-9})$$

$$g = g_0 - z = g_0 - \frac{\epsilon_0 A V^2}{2k \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} \quad (\text{ฉ-10})$$

เมื่อ F_e คือ แรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า

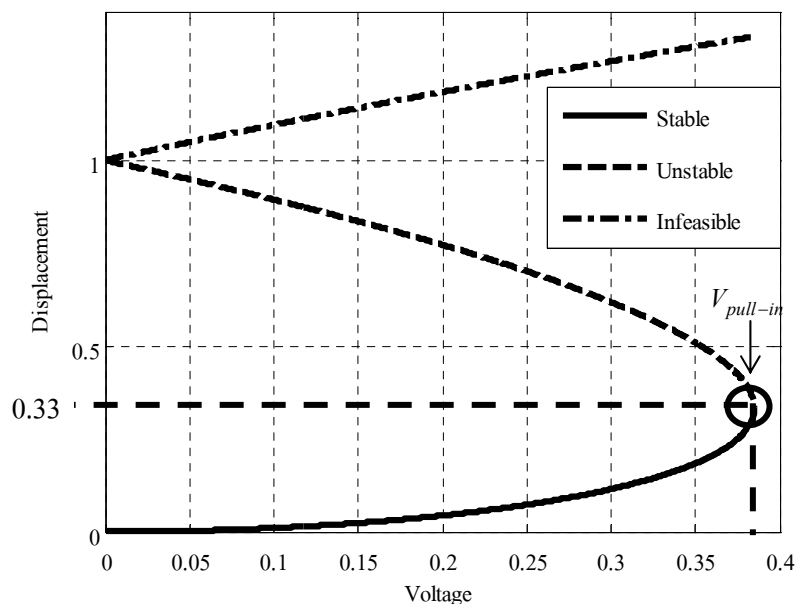
z คือ ระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน

k คือ ค่าความแข็งดึงของโครงสร้าง

จัดรูปสมการที่ (ฉ-10) จะได้สมการพหุนามกำลัง 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน ดังสมการที่ (ฉ-11) และผลเฉลยได้ดังรูปที่ (ฉ.2)

$$z^3 - 2\left(g_0 + \frac{d}{\epsilon_r}\right)z^2 + \left(g_0^2 + 2g_0 \frac{d}{\epsilon_r} + \frac{d^2}{\epsilon_r^2}\right)z - \frac{\epsilon_0 AV^2}{2k} = 0 \quad (\text{ฉ-11})$$

ผลเฉลยของสมการพหุนามกำลัง 3 ที่ได้จากสมการ (ฉ-11) จะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันกับระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในสถานะเริ่มต้น (g_0) ซึ่งเป็นสถานะปกติที่ไม่มีการเบนตัวของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบเมื่อแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนไม่มีการเคลื่อนที่ $V(z=0)$ โดยที่ผลเฉลยจะมีอยู่ 3 คำตอบในระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยชุดผลเฉลยในช่วงเสถียรภาพ (stable) ผลเฉลยในช่วงขาดเสถียรภาพ (unstable) และผลเฉลยในช่วงที่เป็นไปไม่ได้ในระบบที่กำลังพิจารณา (infeasible) ดังแสดงในรูปที่ ฉ.2



รูปที่ ฉ.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเคลื่อนที่ของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบน เมื่อไม่พิจารณาความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก โดยทำผลเฉลยให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

ผลเฉลยในช่วงเสถียรภาพ คือช่วงเคลื่อนที่ลงของแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนเมื่อได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าในช่วง $0 - 0.33$ ของระยะห่างทั้งหมด เป็นช่วงที่สามารถควบคุมพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแผ่นปิดได้ตามขนาดอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ในทางกายภาพสามารถอธิบายได้ว่า เป็นช่วงที่แรงทางกลหรือแรงจากค่าความแข็งดึงจากโครงสร้างแผ่นปิดมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า โดยที่แรงทั้ง 2 จะมีขนาดเท่ากันที่ระยะเสถียรภาพสุดท้ายที่ 0.33 ของระยะห่างทั้งหมด ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้ จึงเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของแผ่นปิดเพื่อข้ามเข้าไปสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ ซึ่งเป็นช่วงที่อินพุตไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมหรือการควบคุมใดๆต่อแผ่นปิด

ผลเฉลยในช่วงขาดเสถียรภาพ คือระยะประมาณ 2 ใน 3 ของระยะห่างทั้งหมด ภายหลังจากช่วงเสถียรภาพ เป็นช่วงที่ไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดได้ ในทางกายภาพจะเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงทางกลของแผ่นปิดเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตจะมีค่ามากที่ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำมีค่าน้อยๆ ตามสมการ (3-31) ส่งผลให้แผ่นปิดเคลื่อนตัวลงมาแนบสนิทกับฐานทันที และจะไม่กลับเข้าสู่ช่วงเสถียรภาพถ้าไม่ลดระดับอินพุตระหว่างแผ่นตัวนำ

ผลเฉลยในช่วงที่เป็นไปไม่ได้ในระบบที่กำลังพิจารณา คือค่าการเคลื่อนที่ที่อยู่นอกขอบเขตของระยะห่างทั้งหมดระหว่างแผ่นตัวนำ ซึ่งไม่ได้ระบุถึงพฤติกรรมใดๆของแผ่นปิด

จากสมการ (ฅ-12) สมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ของแผ่นปิดและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้า คือ

$$V = \sqrt{\frac{2kz}{\epsilon_0 A}} \left(g_0 - z + \frac{d}{\epsilon_r} \right) \quad (\text{ฅ-12})$$

ระยะเคลื่อนที่สุดท้ายก่อนเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ สามารถหาได้จาก 2 เงื่อนไข คือ แรงสุทธิที่กระทำต่อแผ่นตัวนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ (F_{net}) และอนุพันธ์ของแรงสุทธิ ($\frac{\partial F_{net}}{\partial g}$) ระหว่างแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและฐานต้องเท่ากับศูนย์ (Senturia, 2001) โดยสมการแรงสุทธิแสดงดังสมการที่ (ฅ-13) ซึ่งเมื่อนำ มาหาอนุพันธ์จะได้ดังสมการที่ (ฅ-14) ภายหลังจากจัดรูปสมการของระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำจะได้ดังสมการที่ (ฅ-15)

$$F_{net} = -F_e + F_s = -\frac{\epsilon_0 AV^2}{2\left(g + \frac{d}{\epsilon_r}\right)^2} + k(g_o - g) = 0 \quad (\text{ฅ-13})$$

$$\delta F_{net} = \frac{\partial F_{net}}{\partial g} \Big|_V \delta g = -\frac{\epsilon_0 AV^2}{2} \left(-2 \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^{-3} \right) - k = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2 \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^3} - k = 0 \quad (\text{ฅ-14})$$

$$\left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right) = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2k \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} \quad (\text{ฅ-15})$$

จาก $g = g_o - z$ แทนค่า z จากสมการ (ฅ-9) และ $\left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)$ จากสมการ (ฅ-15)

จะได้สมการความสัมพันธ์ของระยะห่างของช่องอากาศระยะสุดท้ายก่อนการแนบติดกับฐานรองตั้งสมการที่ (ฅ-16)

$$g = g_o - \frac{\epsilon_0 AV^2}{2k \left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)^2} = g_o - \frac{\left(g + \frac{d}{\epsilon_r} \right)}{2}$$

$$g = \frac{2}{3} g_o - \frac{d}{3\epsilon_r} \quad (\text{ฅ-16})$$

ดังนั้นระยะเคลื่อนที่ลงของแผ่นปิดก่อนการเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพหรือก่อนการแนบติดฐานรองแสดงดังสมการที่ (ฅ-17)

$$z = g_o - g = g_o - \left(\frac{2}{3} g_o - \frac{d}{3\epsilon_r} \right)$$

$$z = \frac{1}{3}g_o + \frac{d}{3\varepsilon_r} \quad (\text{ฉ-17})$$

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดเริ่มเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงขาดเสถียรภาพ (V_{pi}) สามารถคำนวณได้จาก การแทนค่าสมการ (ฉ-16) และ (ฉ-17) ลงในสมการ (ฉ-12)

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{2k\left(\frac{1}{3}g_o + \frac{d}{3\varepsilon_r}\right)}{\varepsilon_0 A} \left(\left(\frac{2}{3}g_o - \frac{d}{3\varepsilon_r} \right) + \frac{d}{\varepsilon_r} \right)}$$

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{2k}{3\varepsilon_0 A} \left(g_o + \frac{d}{\varepsilon_r} \right) \cdot \frac{2}{3} \left(g_o + \frac{d}{\varepsilon_r} \right)}$$

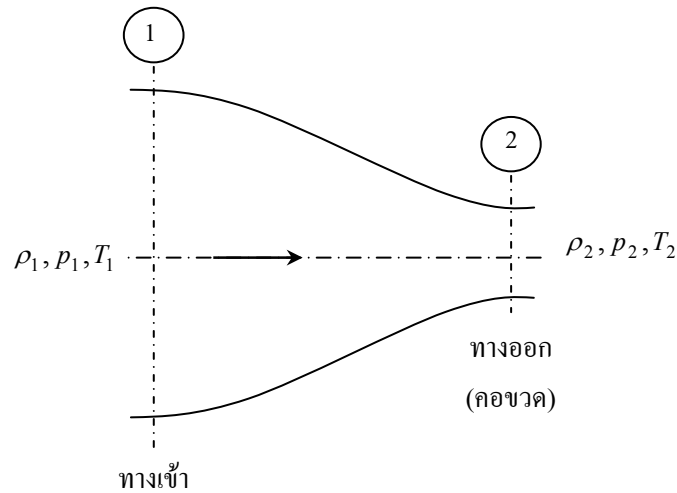
$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8k}{27\varepsilon_0 A} \left(g_o + \frac{d}{\varepsilon_r} \right)^3} \quad (\text{ฉ-18})$$

สมการแรงดันไฟฟ้าแบบติดตั้งที่แสดงในสมการที่ (ฉ-18) เป็นการประมาณในสถานะที่แผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนและล่างวางตัวขนานกัน และไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้ประมาณแรงดันไฟฟ้าแบบติดของไมโครวาล์วได้ระดับหนึ่ง แต่ถ้าแผ่นคานมีการโค้งตัวขึ้นต้องใช้แบบจำลองที่สามารถประมาณระยะยกตัวและแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นตามความสูงที่ระดับต่างๆ ในการดึงแผ่นคานลงมาแบบติดกับฐานรองได้

ภาคผนวก ๓

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณอัตราภาษีของมวลผ่านท่อ
สอบเข้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณอัตราการไหลของมวลผ่านท่อสอบเข้า



รูปที่ ๑.๑ การไหลของของไหลแบบอัดตัวได้ผ่านท่อสอบเข้า

อัตราการไหลของมวลผ่านท่อในสถานะต่อเนื่อง สำหรับการไหลใน 1 มิติของของไหลแบบอัดตัวได้จะมีค่าคงที่ คือ

$$m_o = \rho A_o \dot{V} = \rho Q = constant \quad (\text{กฎ-1})$$

เมื่อ m_o คือ อัตราการไหลของมวล ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส A_o คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ \dot{V} คือ ความเร็วการไหลของของไหล และ Q คือ อัตราการไหลของปริมาตร ขณะที่ $Q = A_o \dot{V}$

จากรูปที่ ๑.๑ สมการพลังงานสำหรับการไหลในภาวะคงตัว 1 มิติของของไหลแบบอัดตัวได้ เมื่อไหลผ่านท่อลูเข้า คือ

$$h_1 + \frac{\dot{V}_1^2}{2} + q_H = h_2 + \frac{\dot{V}_2^2}{2} \quad (\text{กฎ-2})$$

เมื่อ q_H ปฏิบัติการความร้อนต่อมวลหนึ่งหน่วย \dot{V}_1 ความเร็วของของไหลของตอนที่ 1 \dot{V}_2 ความเร็วของของไหลของตอนที่ 2 h_1 ความจุความร้อน (enthalpy) ของตอนที่ 1 และ h_2 ความจุความร้อน

ของตอนที่ 2

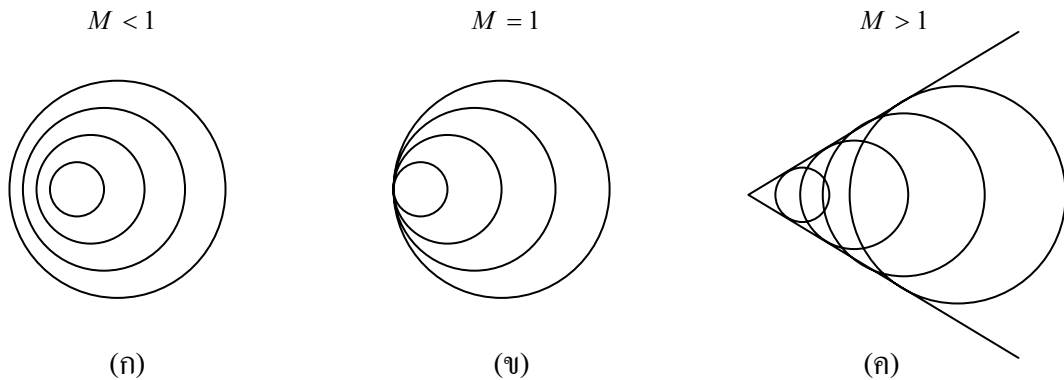
ในการศึกษาการไหลของของไหลแบบอัดตัวได้ว่าเป็นแบบใด เราจะเปรียบเทียบความเร็วของของไหล \dot{V} กับความเร็วเสียง c โดยตัวพารามิเตอร์สำคัญในการบอกว่าการไหลเป็นแบบใดคือ Mach number, M ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของของไหลกับความเร็วเสียง

$$M = \frac{\dot{V}}{c} \quad (\text{ญ-3})$$

ถ้า $M < 1$ การไหลจะเป็นแบบ *subsonic* คือ มีความเร็วการไหลต่ำกว่าความเร็วเสียง

ถ้า $M = 1$ การไหลจะเป็นแบบ *sonic* คือ มีความเร็วการไหลเท่ากับความเร็วเสียง

ถ้า $M > 1$ การไหลจะเป็นแบบ *supersonic* คือ มีความเร็วการไหลสูงกว่าความเร็วเสียง



รูปที่ ญ.2 รูปแบบคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด (ก) $\dot{V} < c$ *subsonic* (ข) $\dot{V} = c$ *sonic* (ค) $\dot{V} > c$ *supersonic*

ถ้าการส่งผ่านความร้อนมีค่าเป็นศูนย์ ($q_H = 0$) จะเป็นการไหลแบบแอดิแอดิแบติก (*adiabatic*) ดังนั้นสมการพลังงานในสมการที่ (ญ-2) จะเขียนได้เป็น

$$h_1 + \frac{\dot{V}_1^2}{2} = h_2 + \frac{\dot{V}_2^2}{2} \quad (\text{ญ-4})$$

เนื่องจาก ค่าความต่างของค่าความจุความร้อน $\Delta h = h_1 - h_2 = c_p \Delta T$ และจากสมการที่ (ญ-4) จะได้การไหลแบบแอดิแอดิแบติก

$$\dot{V}_2^2 - \dot{V}_1^2 = 2(h_1 - h_2) = 2c_p(T_1 - T_2) \quad (\text{ญ-5})$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะที่แรงดันคงที่ $c_p = \gamma R / (\gamma - 1)$

R คือ ค่าคงที่สัมพัทธ์ต่อน้ำหนักโมเลกุล (Universal gas constant/molecular weight, J/g-K)

γ คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของแก๊ส

T_1 คือ อุณหภูมิของตอนที่ 1

T_2 คือ อุณหภูมิของตอนที่ 2

แทนค่าความร้อนจำเพาะที่แรงดันคงที่ลงในสมการที่ (ญ-5) จะได้สมการที่ (ญ-6) และแทนค่า $\rho v = RT$ สำหรับแก๊สอุดมคติ สมการที่ (ญ-6) จะได้สมการที่ (ญ-7)

$$\dot{V}_2^2 - \dot{V}_1^2 = \frac{2\gamma R}{\gamma - 1}(T_1 - T_2) = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}(RT_1 - RT_2) \quad (\text{ญ-6})$$

$$\dot{V}_2^2 - \dot{V}_1^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}(\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2) \quad (\text{ญ-7})$$

หรือ

$$\dot{V}_2^2 - \dot{V}_1^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}(\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2) = \frac{2\gamma}{\gamma - 1}RT_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (\text{ญ-8})$$

การไหลแบบแอดิเยกแบติก (การถ่ายโอนความร้อนเป็นศูนย์, $q_H = 0$) ซึ่งมีการเสียดทานน้อย (หรือเป็นอุดมคติ) จะเป็นการไหลแบบเอนโทรปีเท่า (ความจุความร้อนคงที่) การไหลดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นในธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม สามารถพิจารณาการไหลผ่านท่อปลายสอบเข้า (nozzle) หรือการไหลในกระแสดิสระของของไหลในระยะทางสั้นๆเป็นการไหลแบบเอนโทรปีเท่าได้ เนื่องจากมีการถ่ายโอนความร้อนและการเสียดทานของไหลน้อย ความสัมพันธ์ของเอนโทรปีเท่าสำหรับความหนาแน่นและแรงดันจะอ้างอิงเงื่อนไขหยุดนิ่ง (stagnation condition) (Smits, 2000)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma-1} \quad (\text{ญ-9})$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (\text{ญ-10})$$

$$RT = \frac{p}{\rho} \quad (\text{ญ-11})$$

แทนลงในสมการที่ (ญ-8)

$$\frac{\dot{V}_2^2 - \dot{V}_1^2}{2} = \frac{p_1}{\rho_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{p_2}{\rho_2} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (\text{ญ-12})$$

การไหลผ่านท่อหรือรูที่มีพื้นที่ลู่เข้าดังรูปที่ ญ.1 เราจะพิจารณาเป็นการไหล 1 มิติและสมมติให้เป็นการไหลแบบเอนโทรปีเท่า เนื่องจากโอกาสในการถ่ายโอนความร้อนระหว่างตอน 1 และ 2 ผลของการเสียดทานมีค่าน้อย ถ้าไม่พิจารณาความเร็วที่ทางเข้า จากสมการที่ (ญ-12) จะได้

$$\frac{\dot{V}_2^2}{2} = \frac{p_1}{\rho_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{p_2}{\rho_2} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (\text{ญ-13})$$

และความเร็วเสียงที่ทางออกตอนที่ 2 คือ $c_2 = \sqrt{\gamma p_2 / \rho_2}$ แทนลงในสมการที่ (ญ-13) จะได้สมการที่ (ญ-14)

$$\left(\frac{\dot{V}_2}{c_2} \right)^2 = M_2^2 = \frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (\text{ญ-14})$$

เมื่อ M_2 คือ Mach number ของตอนที่ 2

สังเกตได้ว่าความเร็วในการไหลที่คอขวด (throat) ของตอนที่ 2 ในรูปที่ ญ.1 จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน p_1/p_2 ถ้าความแตกต่างแรงดันระหว่าง p_1 และแรงดัน p_2 มีมากพอ ความเร็วของไหล

ที่เท่ากับความเร็วเสียงจะเกิดขึ้นที่ตอนที่ 2 โดยที่รูปแบบการไหลที่ทางออกเป็นไปได้ 2 แบบคือ แบบ *subsonic* และ *sonic*

สมมติให้การไหลที่ทางออกเป็นแบบ *sonic* นั่นคือ $M_2 = 1$ แทนลงในสมการที่ (ญ-14) จะได้อัตราส่วนแรงดันวิกฤต (critical pressure ratio)

$$\frac{p_2^*}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (\text{ญ-15})$$

เมื่อ p_2^* คือ แรงดันแก๊สที่ทางออกเมื่อเกิดการไหลแบบ *sonic*, $M_2 = 1$

อัตราส่วนแรงดันวิกฤตที่ทางออกจะเกิดขึ้นเมื่อความต่างแรงดันระหว่าง p_1 และ p_2 มากพอที่จะสร้างความเร็ว *sonic* ที่ทางออกคอดขวด ถ้าความเร็วที่ทางออกเป็น *subsonic* อัตราส่วน p_1/p_2 จะมากกว่าสมการที่ (ญ-15)

อัตราการไหลของมวลผ่านท่อในรูปที่ ญ.1 สามารถหาได้จากการแทน V_2 จากสมการที่ (ญ-13) ลงในสมการที่ (ญ-1) คือ $m_o = \rho_2 A_2 \dot{V}_2$ โดยใช้ความสัมพันธ์ของเอนโทรปีเท่าระหว่างแรงดัน p และความหนาแน่น ρ จากสมการที่ (ญ-9) และ (ญ-10)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{\gamma - 1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{ญ-16})$$

และจากสมการที่ (ญ-13) จัดรูปสมการจะได้สมการที่ (ญ-17) ดังนั้นแทนค่า $m_o = \rho_2 A_2 \dot{V}_2$ ลงในสมการที่ (ญ-17) จะได้สมการที่ (ญ-18)

$$\dot{V}_2 = \sqrt{\frac{p_1}{\rho_1} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (\text{ญ-17})$$

$$m_o = \left(\rho_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right) A_2 \sqrt{\frac{p_1}{\rho_1} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$$m_o = A_2 \rho_1 \sqrt{\frac{p_1}{\rho_1} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

$$m_o = A_2 \sqrt{p_1 \rho_1 \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (\text{ญ-18})$$

$$\text{เมื่อ } \rho_1 = \frac{p_1}{RT_1}$$

ดังนั้นสมการที่ (ญ-18) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลแบบ *subsonic*

$$m_{\text{subsonic}} = A_2 p_1 \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (\text{ญ-19})$$

สมการนี้จะเหมาะสมตรงเท่าที่ $p_2/p_1 > p_2^*/p_1$ ที่ให้ในสมการที่ (ญ-15) ดังนั้นเงื่อนไขจะนำมาประยุกต์ใช้ที่การไหลเป็นแบบ *subsonic* ที่คอขวด เพื่อหาอัตราการไหลผ่านสูงสุดที่คอขวดเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลแบบ *sonic* ($M_2 = 1$) โดยอัตราการไหลสูงสุดหาได้จากการแทน $p_2/p_1 = p_2^*/p_1 = (2/(\gamma+1))^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ ลงในสมการที่ (ญ-19) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลแบบ *sonic* ดังสมการที่ (ญ-20) ในทางปฏิบัติการคำนวณอัตราการไหลของมวลเราจะใช้สมการที่ (ญ-19) และ (ญ-20) ที่คูณด้วยสัมประสิทธิ์การสูญเสีย C_i ดังสมการที่ (ญ-21)

$$m_{sonic} = A_2 p_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{ญ-20})$$

$$\dot{m} = C_i \rho_2 A_2 V_2 \quad (\text{ญ-21})$$

ดังนั้นสมการที่(ญ-19) และ (ญ-20) จะแสดงดังสมการที่ (ญ-22) และ (ญ-23) ตามลำดับ

$$m_{subsonic} = C_i A_2 p_1 \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)RT_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (\text{ญ-22})$$

$$m_{sonic} = C_i A_2 p_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{ญ-23})$$

จากแบบจำลองข้างต้น สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Discharge coefficient), C_i เป็นผลของการสูญเสียแรงดันที่ไม่สามารถคำนวณได้อย่างแน่ชัด ตามนิยามสัมประสิทธิ์การสูญเสียคืออัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลจากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งค่าทางทฤษฎีจะมากกว่าจากการทดลองเสมอ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่างของไมโครวาล์วและแรงดันแก๊สที่เข้าสู่ช่องทางเดินแก๊ส

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. R. Pattanakul, N. Chomnawang, D. Klaitabtim, and A. Tuantranont, "Simulation of metallic MEMS electrostatic actuator for microvalve applications" Proceedings of the 27th Electrical Engineering Conference, Vol.II, pp.293-296, November 11-12, 2004.

2. R. Pattanakul, A. Tuantranont, and N. Chomnawang, "Design Optimization of Tethers in Electrostatic Actuating Pneumatic Microvalves" Proceedings of the 2005 Electrical/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology International Conference, Vol. I, pp. 387-390, May 12-13, 2005.

3. R. Pattanakul, N. Atiwongsangtong, R. Muanghlua, W. Titiroongruang, S. Niemchareon, and N. Chomnawang, "Fabrication of a Curled-Up SU-8/Metal Closure Plate for Electrostatic Microvalve" Proceedings of the 21st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Vol.III, pp. 485-488., July 10 - 13, 2006.

ประวัติผู้เขียน

นายรุ่งเรือง พัฒนากุล เกิดเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ ฉะเชิงเทรา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2546 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัย ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ทั้งการออกแบบและสร้างด้วยกระบวนการผลิตชิ้นส่วน จุลภาค และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ ดังรายชื่อที่ปรากฏใน ภาคผนวก ก. ปัจจุบันเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจในการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน มาพัฒนากระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (x-ray LIGA) ให้กับระบบแสดงผล อักษรเบรลล์และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการทำงานของระบบกลไฟฟ้าจุลภาค