



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์

โดย ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ และคณะ

กรกฎาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับไมโครแอคชูเอเตอร์

ผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

บทคัดย่อ	1
Abstract.....	2
Executive Summary	3
บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ไมโครแอดชัวเอเตอร์สำหรับการควบคุมการไหล.....	7
1.2 อุปกรณ์เซ็นเซอร์.....	8
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและโครงสร้างของรายงาน.....	11
บทที่ 2 อุปกรณ์เซ็นเซอร์และแพลตฟอร์ม.....	18
2.1 พารามิเตอร์ของแพลตฟอร์ม.....	18
2.2 กระบวนการสร้างแพลตฟอร์ม.....	20
2.3 การทดลองวัดการตอบสนองของแพลตฟอร์ม.....	21
2.4 อุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยแพลตฟอร์ม.....	23
2.5 สรุปผลการศึกษา.....	25
บทที่ 3 พารามิเตอร์ของแพลตฟอร์ม.....	36
3.1 กระบวนการสร้างแพลตฟอร์มใหม่.....	36
3.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์แพลตฟอร์ม.....	37
3.3 สรุปผลการศึกษา.....	39
บทที่ 4 ไมโครแอดชัวเอเตอร์แบบไดอะแฟรม.....	46
4.1 พารามิเตอร์ของไดอะแฟรมแพลตฟอร์ม.....	46
4.2 กระบวนการสร้างไดอะแฟรม.....	48
4.3 สรุปผลการศึกษา.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาโดยรวม.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	57
ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย.....	60

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5080238

ชื่อโครงการ : การพัฒนาอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์

ชื่อนักวิจัย : ดร. อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address : alongkorn.p@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : กรกฎาคม 2550 – มิถุนายน 2552

บทคัดย่อ :

ในการศึกษานี้ ไมโครแอคชูเอเตอร์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปร่างของแฟลปได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต และทำการวัดความเร็วที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ดังกล่าว สำหรับการศึกษาต่อเนื่องจากงานในส่วนนี้ ได้มีการตรวจสอบผลของขนาดกว้างและยาวของแฟลปต่อการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response และแอคชูเอเตอร์ประเภทเดียวกันนี้ในรูปร่างของแผ่นไดอะแฟรมได้ถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งหากมีสมรรถนะที่สูงกว่าแฟลปแล้ว ไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์จะถูกนำไปใช้แทนแฟลปแอคชูเอเตอร์ในอนาคต ในการศึกษาส่วนแรก แฟลปโพลีอีไมด์ซึ่งประกอบด้วยขดลวดทองแดงถูกออกแบบและสร้างขึ้นมา หลังจากนั้นจึงได้ทำการวัดสมรรถนะในเชิงการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response ซึ่งพบว่า โดยการขับเคลื่อนด้วยแอคชูเอเตอร์ขนาดความกว้าง 3 มม. และความยาวในช่วง 6-7 มม. ที่มีระยะกระดกที่ปลายในช่วง 250-450 μm และความถี่เรโซแนนซ์ในช่วง 460-1,000 Hz อุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตจะมีความเร็วเจ็ต 0.8 เมตรต่อวินาทีที่ระยะ 2 มม. จากรูออร์ฟิซขนาด 0.5 มม. เมื่อใช้ความถี่ในการขับแอคชูเอเตอร์ซึ่งประมาณเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ 600 Hz สาเหตุที่ความเร็วเจ็ตค่อนข้างต่ำทั้งนี้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในหนึ่งรอบการขับสูง น่าจะเป็นผลของช่องว่างระหว่างแฟลปและผนังควาิตี้ที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้เกิดการไหลวนบางส่วนภายในควาิตี้ การศึกษาในส่วนต่อไปเพื่อศึกษาผลของขนาดความกว้างและยาวของแฟลปต่อการตอบสนอง ซึ่งในงานนี้เลือกความยาวเท่ากับ 8 มม.และเปลี่ยนความกว้างจาก 3, 4, และ 5 มม. และอีกส่วนเลือกความกว้างเท่ากับ 4 มม.และเปลี่ยนความยาวจาก 6, 7, และ 8 มม. โดยผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนขนาดความยาวจะส่งผลต่อทั้งระยะกระดกและความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลปมาก ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนขนาดความกว้างจะมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ระยะกระดกที่ความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลปเหล่านี้ก็ไม่ต่างกันมากนัก ทำให้เชื่อว่าถึงแม้จะหาพารามิเตอร์ของแอคชูเอเตอร์ที่เหมาะสมที่เจ็ตจะมีความเร็วสูงที่สุดแล้ว ความเร็วเจ็ตก็จะไม่เพิ่มขึ้นจากการศึกษาในส่วนแรกมากนัก ดังนั้น แอคชูเอเตอร์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปร่างไดอะแฟรมจึงถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้ซอฟต์แวร์ FEM ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของไดอะแฟรมเพื่อออกแบบให้ระยะโก่งตัวของไดอะแฟรมมีค่ามาก และในขณะเดียวกัน วิธีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการสร้างไดอะแฟรมก็กำลังดำเนินการอยู่ จากการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่า ด้วยข้อมูลที่มีอยู่ การใช้แฟลปแอคชูเอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนซินเทติกส์เจ็ตยังไม่สามารถเพิ่มความเร็วของเจ็ตจากการใช้ไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ได้ โดยผลการศึกษาที่มีขนาดความเร็วเจ็ตใกล้เคียงกันกับงานในอดีตที่ใช้ไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ โดยปัจจัยที่อาจจะส่งผลทำให้ความเร็วเจ็ตไม่สูงในการศึกษานี้ คือช่องว่างระหว่างแฟลปและผนังของควาิตี้ที่ค่อนข้างใหญ่ อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ซินเทติกส์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ก็อาจจะนำไปใช้งานทางวิศวกรรมสำหรับการไหลที่มีเรโนลด์นัมเบอร์ต่ำ ๆ ได้

คำหลัก : อุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต, ไมโครแอคชูเอเตอร์, แม่เหล็กไฟฟ้า, การควบคุมการไหล

Abstract

Project Code : MRG5080238

Project Title : Development of synthetic jet by microactuator

Investigator : Dr. Alongkorn Pimpin, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

E-mail Address : alongkorn.p@chula.ac.th

Project Period : July 2007 – June 2009

Abstract:

We have developed micro electromagnetic flap actuators as a driving mechanism of synthetic jet generator, and the jet velocity issuing from the synthetic jet generator is examined. In order to further development, the effects of flap dimensions on the static and dynamic responses are investigated, and another micro electromagnetic actuator in diaphragm configuration is designed and fabricated, if it is feasible, to replace the flap actuator in the future. In the first part of our study, the polyimide flaps with micro copper coil are designed, fabricated, and then tested for their static and dynamic responses. The flap actuator with tip deflection of about 250-450 μm and resonant frequency of about 460-1,000 Hz is then employed as a driving mechanism of a synthetic jet generator. Although the flap actuator has quite large sweeping volume, we found that the maximum issued jet velocity is quite slow of about 0.8 m/s at 2 mm downstream from the orifice when driven at about flap's resonant frequency of 600 Hz. This drawback might be a result of gap between flap and cavity wall is still relatively large. Next, the effects of flap dimensions on its responses are investigated. A set of structures with fixed length of 8 mm and width equal to 3, 4, 5 mm, and fixed width of 4 mm and length equal to 6, 7, 8 mm, are fabricated and examined. Within the range of the flap dimensions experimented, it is found that a small change in length significantly affects both static and dynamic responses while a change in width has relatively slight effects. Moreover, the deflection at resonant frequency of these flap dimensions is almost the same thus significantly enhancing the jet velocity from that found in the first part might be impossible within this range of flap dimensions. To enhance the jet velocity, the electromagnetic diaphragm actuator with large out-of-plane is developed. FEM software is used to preliminary examine the effect of dimensions on the static deflection, and the development of new fabrication processes for diaphragm actuator is still ongoing. In conclusion, we found that, despite of its more robustness, the employment of a micro flap actuator instead of a micro diaphragm actuator as the driving mechanism of synthetic jet generator does not significantly enhance the jet velocity. We found that, when we compare the jet velocity with that reported in past study with diaphragm actuator, the same order of magnitude of jet velocity is realized. However, with this order of magnitude of jet velocity, the developed synthetic jet generator might be able to be employed in low Reynolds number flows.

Keywords : Synthetic jet, Microactuator, Electromagnetic, Flow control.

Executive summary

1. ความเป็นมาของงานวิจัย

การพัฒนาการควบคุมการไหลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในศตวรรษที่ 1900 พร้อมไปกับการพัฒนาเครื่องบินที่มีสมรรถนะสูง หลังจากนั้น เมื่อเข้าสู่ช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมากมายทำให้นักวิจัยส่วนหนึ่งจึงเริ่มให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์พลังงาน หนึ่งใน การอนุรักษ์พลังงานคือการควบคุมการไหล โดยในช่วงแรกการควบคุมการไหลยังไม่ซับซ้อนนักและมีการนำไปใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น การลด separation ของยานพาหนะทั้งทางบก น้ำ และอากาศ การลดความดันตกคร่อมในระบบท่อขนาดใหญ่ การเพิ่มการผสมของสารเคมี 2 ชนิด และการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักรในอุตสาหกรรม จนกระทั่งภาวะขาดแคลนพลังงานอย่างหนักที่เกิดขึ้นทั่วโลกในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้เกิดการพัฒนาการควบคุมการไหลที่มีความทันสมัยมากขึ้นในหลาย ๆ ด้าน ทั้งการพัฒนาทฤษฎีการควบคุมที่ดีขึ้น การพัฒนาเครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และการพัฒนาเทคโนโลยี MEMS (Micro Electromechanical Systems) เพื่อทำให้สมรรถนะของการควบคุมการไหลดีขึ้น โดยนำไมโครเซ็นเซอร์และไมโครแอคชูเอเตอร์มาผนวกเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงขึ้นมาใช้ในงานควบคุมการไหล โดยในทั้งสามส่วนที่ได้กล่าวมานั้นไมโครแอคชูเอเตอร์เป็นส่วนที่ยังไม่พัฒนาไปมากนัก และถึงแม้จะมีการพัฒนาไมโครแอคชูเอเตอร์แบบต่าง ๆ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาบ้าง การนำไมโครแอคชูเอเตอร์ไปใช้งานวิศวกรรมจริงยังมีน้อยมาก สาเหตุหนึ่งคืออุปกรณ์เหล่านี้ทำจากวัสดุที่เปราะบางทำให้ไมโครแอคชูเอเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถทนทานต่อสภาวะการไหลที่รุนแรง และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีความทนทานและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานวิศวกรรมจริงในรูปแบบของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต โดยไมโครแอคชูเอเตอร์ไม่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง แต่ก็ยังสามารถกระตุ้นการไหลได้ นอกจากนั้นแล้วความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต เช่น ความถี่ขับเคลื่อน เป็นต้น ต่อความเร็วเจ็ตที่เกิดขึ้นก็ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของความถี่ขับเคลื่อนด้วย ตลอดจนศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานจริงทางวิศวกรรม โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคือ ความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นในการออกแบบอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตขนาดเล็กด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบไมโครแอคชูเอเตอร์ในลักษณะอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตขนาดเล็กที่มีสมรรถนะสูงขึ้นและควบคุมการไหลได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

2. วัตถุประสงค์

การพัฒนาอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

2.1 ออกแบบและผลิตแฟลปแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า และทดลองใช้แฟลปกับอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต พร้อมทั้งตรวจสอบความเร็วเจ็ตที่เกิดขึ้น

2.2 ศึกษาผลของขนาดความกว้าง และความยาวของแฟลป ต่อระยะกระดกและความถี่เรโซแนนซ์

2.3 ออกแบบและผลิตไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษานี้ประกอบด้วย 3 วัตถุประสงค์ย่อยดังที่กล่าวไปแล้ว โดยในวัตถุประสงค์ทั้งหมดจะแบ่งงานเป็น 3 ส่วนหลักคือ การออกแบบและการผลิตไมโครแอคชูเอเตอร์และอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ด การวัดสมรรถนะของไมโครแอคชูเอเตอร์ และการวัดความเร็วเจ็ตที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ต โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบจะใช้โมเดลคณิตศาสตร์หรือโปรแกรม FEM ในกรณีที่รูปร่างซับซ้อน เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และพัฒนาเทคนิคการผลิตแบบ Micro fabrication เพื่อสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ตามที่ต้องการไว้ หรือหากมีข้อจำกัดในเรื่องเทคนิคการสร้างก็จะช่วยให้มีข้อมูลเกี่ยวกับข้อจำกัดดังกล่าว

3.2 เมื่อนำแอคชูเอเตอร์มาทดสอบจะพิจารณา 2 สมรรถนะหลักคือ ระยะกระดกและความถี่เรโซแนนซ์ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพร่วมกับ Capacitance probe

3.3 เมื่อติดตั้งไมโครแอคชูเอเตอร์กับโครงสร้างของอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ตแล้ว จะวัดความเร็วเจ็ตด้วย Hot-wire anemometer ที่ตำแหน่ง downstream จากปากเจ็ต เมื่อขับเคลื่อนแอคชูเอเตอร์ที่ความถี่ต่าง ๆ

4. ผลการทดลอง

การศึกษาจะแบ่งเป็น 3 ส่วนสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ย่อย ในการศึกษาส่วนแรก อุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ตได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้ไมโครแฟลบบแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยฐานแฟลบบทำจากโพลีอีไมด์และมีขดลวดทองแดงกว้าง 280 μm อยู่ด้านบน และทำการศึกษาการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response ของแฟลบบจากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าตรงขนาด 1 A แฟลบบที่มีความกว้างและยาว 3 และ 6 ม.ม. มีระยะกระดกของปลายแฟลบบเท่ากับ 0.25 ม.ม. ในขณะที่แฟลบบขนาดความกว้างและยาว 3 และ 7 ม.ม. มีระยะกระดกเท่ากับ 0.45 ม.ม. โดยแฟลบบทั้งสองมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 1,000 และ 460 Hz ตามลำดับ ในการศึกษาแฟลบบแอคชูเอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปติดตั้งเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ตที่มีขนาดรูออร์ฟิสเท่ากับ 0.5 ม.ม. และจากการทดลองพบว่าความเร็วเจ็ตที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาดขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนและมีค่าสูงสุด 0.8 m/s ที่ระยะ 2 ม.ม. จากกึ่งกลางของรูออร์ฟิส เมื่อใช้ความถี่ในการขับเคลื่อนประมาณ 600 Hz โดยอาจจะเป็นผลของระยะห่างระหว่างขอบแฟลบบและผนังคาร์ดิมีขนาดค่อนข้างใหญ่

สำหรับการศึกษาในส่วนถัดไปมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความกว้างและความยาวแฟลบบในช่วงแอคชูเอเตอร์ประมาณ 3-8 ม.ม. ต่อการตอบสนอง static และ dynamic response โดยในการศึกษา static response เราจะพิจารณาระยะกระดกของปลายแฟลบบเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษา dynamic response จะพิจารณาขนาดของความถี่เรโซแนนซ์และระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้น โดยทำการสร้างแอคชูเอเตอร์ขึ้นมาทั้งหมด 5 ขนาด มีความกว้างและความยาว ดังนี้ 4x6, 4x7, 4x8,

3x8, และ 5x8 มม. เมื่อนำเอาแอคชูเอเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทดสอบ พบว่า สำหรับการตอบสนอง static response ในกรณีความกว้างคงที่ค่าหนึ่ง การเพิ่มความยาวเพลบจะทำให้ระยะกระดกสูงขึ้นค่อนข้างมาก แต่สำหรับความยาวคงที่แล้ว ระยะกระดกจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและจะระยะสูงสุดเกิดขึ้นที่ความกว้างที่เหมาะสมค่าหนึ่ง สาเหตุมาจากการเพิ่มความกว้างจะส่งผลในสองลักษณะต่อระยะกระดกดังนี้ การเพิ่มความกว้างจะทำให้มีแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำต่อเพลบสูงขึ้นและมีผลทำให้ระยะกระดกสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความกว้างจะทำให้ขนาด moment of inertia ของเพลบมากขึ้นและส่งผลทำให้ระยะกระดกลดลง ในการทดสอบ dynamic response พบว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวเพลบจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความถี่เรโซแนนซ์ของเพลบมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเพลบ โดยเพลบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง แต่การเปลี่ยนแปลงขนาดนี้จะส่งผลต่อระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์น้อยมาก

เมื่อพิจารณาจากงานสองส่วนแรก ซึ่งพบว่าเมื่อใช้เพลบเป็นตัวขับเคลื่อนอุปกรณ์ซีเทติกส์เจ็ตที่เกิดขึ้นจะมีความเร็วไม่สูงมากนัก และเมื่อทำการศึกษาถึงผลของความกว้างและยาวของเพลบด้วยแล้วยังพบว่า ระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ก็จะได้แตกต่างกันสำหรับขนาดของเพลบในออเดอร์ใกล้เคียงกันนี้ ดังนั้นหากยังไม่ไปแก้ไขปัญหาเรื่องการรั่วไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างขอบเพลบและผนังคาร์ติดจ์แล้ว ไม่ว่าจะใช้เพลบแอคชูเอเตอร์ขนาดใด ๆ ในออเดอร์ใกล้เคียงกันนี้แล้ว ก็น่าจะทำให้เกิดเจ็ตที่มีความเร็วใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามปัญหาการลดช่องว่างดังกล่าวจะต้องใช้เทคโนโลยีการประกอบขั้นสูงมาก จึงอาจจะไม่ใช่วิธีง่ายนักในการดำเนินการแก้ไขปัญหานี้ ดังนั้นอีกวิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มความเร็วของเจ็ตได้คือ การเปลี่ยนจากเพลบมาเป็นไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ โดยยังยึดหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ เนื่องจากมีขนาดของแรงมาก ความหนาแน่นสูงและโครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการศึกษาในส่วนสุดท้ายจึงทำการออกแบบเบื้องต้นและการสร้างไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการออกแบบมีเป้าหมายหลักคือ ไดอะแฟรมที่มีระยะโก่งตัวสูงและในการใช้โปรแกรม FEM คำนวณและวิเคราะห์ผล สำหรับการสร้างตัวต้นแบบของแอคชูเอเตอร์ได้ดำเนินการไปบางส่วนแล้ว โดยใช้หลักการสร้างที่จะสามารถลอกไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ออกจาก substrate ได้ ในขณะนี้อยู่ระหว่างการดำเนินงานซึ่งได้ทดสอบและสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างบางส่วนได้แล้ว

เมื่อมาพิจารณาเรื่องการนำไปใช้งานจริง พารามิเตอร์หลักที่สำคัญอันหนึ่งคือความเร็วเจ็ต ซึ่งจากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ยังมีความเร็วค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม มีผลการศึกษาในการนำอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตความเร็วต่ำไปใช้งานในระบบท่อลำเลียงของเหลวระดับจุลภาคบ้างแล้ว เช่น Mautner (2004) และหากวิเคราะห์ผลการคำนวณจากงานดังกล่าว โดยสมมติให้ท่อมีขนาด 1 มม. และของเหลวเป็นน้ำแล้ว ความเร็วของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่สร้างเจ็ตได้ด้วยความเร็วมากกว่า 0.05 เมตรต่อวินาทีก็ถือว่าเพียงพอแล้วในการช่วยเพิ่มการผสมในระดับจุลภาคได้ ซึ่งความเร็วในระดับนั้นต่ำกว่าความเร็วเจ็ตที่สร้างขึ้นมาได้ในการศึกษานี้ค่อนข้างมาก จึงอาจกล่าวได้ว่า งานทางวิศวกรรมที่อาจจะนำอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้ได้ก็อาจจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในงานที่มีเรโนลด์นัมเบอร์ต่ำ หรือเป็นการไหลในระดับจุลภาคเท่านั้น

บทที่ 1

บทนำ

การควบคุมการไหลคือ การเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลแบบธรรมชาติให้เป็นไปตามที่ต้องการ ประโยชน์ของการใช้การควบคุมการไหลในงานทางวิศวกรรม ได้แก่ การลดแรงเสียดทานบนยานพาหนะ การเพิ่มหรือลดการผสมระหว่างสาร 2 ชนิด การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อน และ การลดการฟุ้งกระจายของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อม เป็นต้น

การพัฒนาวิธีการควบคุมการไหลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในศตวรรษที่ 1900 พร้อมๆไปกับการพัฒนาเครื่องบินที่มีสมรรถนะและความเร็วที่สูงขึ้น หลังจากนั้น เมื่อเข้าสู่ช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมากมายและนักวิจัยส่วนหนึ่งจึงเริ่มให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์พลังงาน หนึ่งใน การอนุรักษ์พลังงานคือการควบคุมการไหล โดยในช่วงแรกการควบคุมการไหลยังไม่ซับซ้อนนักและมีการนำไปใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น ใช้กับยานพาหนะทั้งทางบก น้ำ และอากาศ ใช้ในระบบท่อขนาดใหญ่ และเครื่องจักรในอุตสาหกรรม (Hough 1980) อย่างไรก็ตาม ภาวะขาดแคลนพลังงานที่เกิดขึ้นทั่วโลกในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการควบคุมการไหลหลาย ๆ ด้าน ทั้งการพัฒนาทฤษฎีการควบคุมที่ดีขึ้น การพัฒนาเครื่องมือที่มีความซับซ้อนมากขึ้น และการพัฒนาเทคโนโลยี MEMS (Micro Electromechanical Systems) เพื่อช่วยให้สมรรถนะของการควบคุมการไหลดีขึ้น (Moin & Bewley 1994, Gad-el-hak 1996, และ Kasagi 1998) และการควบคุมการไหลที่ใช้ไมโครเซ็นเซอร์และไมโครแอคชูเอเตอร์ผนวกเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงชันก็มีการศึกษากันอย่างมากเช่นกัน

การควบคุมการไหลแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การควบคุมแบบ passive และ active การควบคุมการไหลแบบ passive มีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเพื่อสร้างการควบคุมแต่จะอาศัยพลังงานของระบบเองในการควบคุม ตัวอย่างเช่น การใช้วอเทกซ์เจเนอเรเตอร์เพื่อลดการเกิด separation การใช้ vane เพื่อสร้างการไหลแบบหมุนวนช่วยเพิ่มการผสม การใช้ทุ่นซีเมนต์ที่ขยาดึงทะเลเพื่อทำลายโครงสร้างของคลื่นขนาดใหญ่ เป็นต้น แต่การควบคุมจะเกิดขึ้นตลอดเวลาไม่ขึ้นกับลักษณะการไหลในขณะนั้น ซึ่งอาจจะเกิดผลเสียมากกว่าผลดีในบางครั้ง ตัวอย่างเช่น การใช้สปอยเลอร์ในรถยนต์ซึ่งช่วยให้การขับเคลื่อนมีเสถียรภาพมากขึ้นในช่วงที่มีความเร็วสูง แต่ในขณะที่มีความเร็วต่ำนั้นจะเพิ่มแรงต้านอากาศพลศาสตร์ขึ้น ทำให้การควบคุมการไหลแบบ passive น่าจะเหมาะสมกับการไหลที่มีลักษณะการไหลค่อนข้างคงที่

สำหรับการควบคุมการไหลแบบ active นั้น จะต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกมาสร้างการควบคุม ตัวอย่างเช่น การใช้ลำโพงกระตุ้นเพื่อควบคุมการผสมของเจ็ดกับอากาศโดยรอบ การใช้ wall jet เพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของใบพัด การใช้ suction เพื่อลดการเกิด separation เป็นต้น การควบคุมแบบ active มีข้อดีคือ ระบบสามารถเลือกจะเปิดหรือปิดการควบคุมเมื่อใดก็ได้ตามความต้องการ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียที่สำคัญคือ การใช้พลังงานจากภายนอก ในบางครั้งพบว่า มีการ

ใช้พลังงานภายนอกมากกว่าพลังงานที่สามารถลดการสูญเสียได้จากการควบคุม เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมมีขนาดใหญ่และใช้พลังงานมากในการทำงาน เช่น การใช้ wall jet จะต้องมีการไหลของไหล วาล์วอัดโนมิตี และคอมเพรสเซอร์ ซึ่งใช้พลังงานมากและยังมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

การไหลที่พบมากในงานวิศวกรรมคือ shear flow ได้แก่ การไหลจำพวก jet, wake และ shear layer การไหลเหล่านี้มีคุณสมบัติคือ non-linearity, inherent instability, และ coherent structure ซึ่งเป็นกุญแจที่สำคัญสำหรับการควบคุมการไหล Ho & Huerre (1984) พบว่าการกระตุ้นการไหลที่ตำแหน่งและความถี่ที่เหมาะสมด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการไหลได้อย่างมาก รูปภาพที่ 1.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเจ็ต เมื่อมีการควบคุมโดยใช้ลำโพงกระตุ้นการไหลที่ความถี่ธรรมชาติของเจ็ต จากรูปพบว่าโครงสร้างของเจ็ตเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก และเมื่อนำเจ็ตนี้ไปใช้ในงานทางวิศวกรรม ความสามารถของเจ็ต เช่น การถ่ายเทความร้อนหรือการผสมสารเคมี ก็มีโอกาสจะเปลี่ยนแปลงไปมากเช่นเดียวกัน

ตัวอย่างต่อไปนี้เป็น การประมาณขนาดและความถี่ของการทำงานของระบบที่เหมาะสมสำหรับควบคุม separation ของ laminar boundary layer โดยสมการที่พัฒนาขึ้นโดย Hong (2006) เพื่อประมาณค่าความถี่ของความไม่เสถียรภาพที่มีอัตราการขยายตัว (Amplification rate) สูงสุดในโหมด T-S wave ใน laminar boundary layer เป็นดังนี้

$$f = 3.2 \frac{U^2}{\nu} (Re_{\delta^*})^{-2/3} \quad (1.1)$$

โดย f คือความถี่ของความไม่เสถียรภาพ, U คือความเร็วของการไหล, ν คือ kinematics viscosity และ Re_{δ^*} คือ Reynolds number ที่ขึ้นกับ displacement thickness ณ ตำแหน่งนั้น

รูปที่ 1.2 แสดงค่าความถี่กับ displacement thickness ที่ประมาณด้วยสมการที่ (1.1) สภาพการไหลที่เลือกมาคือ laminar boundary บนแผ่นเรียบที่ตำแหน่ง 0.5 และ 1 เมตรจาก leading edge เปรียบเทียบระหว่างของไหลที่เป็นน้ำและอากาศซึ่งมีความเร็วอยู่ในช่วง 0.1-3 เมตรต่อวินาที จากรูปความถี่ที่จะถูกขยายสูงสุดมีค่าประมาณสูงกว่า 100 Hz และ displacement thickness มีขนาดเล็กกว่า 0.02 เมตรสำหรับทุก ๆ การไหลที่กำหนด สำหรับแอคชูเอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมการไหลนี้ควรจะสามารถสร้างการกระตุ้นด้วยความถี่เท่ากับที่คำนวณจากสมการที่ (1.1) ซึ่งมีค่าสูงกว่า 100 Hz ขึ้นไป และถ้าขนาดที่เหมาะสมถูกสมมติให้มีแอคชูเอเตอร์เดียวกับ displacement thickness เพื่อการควบคุมที่ตำแหน่งที่ต้องการได้แล้ว ขนาดของแอคชูเอเตอร์ก็ควรมีขนาดเล็กกว่า 0.02 เมตร ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงและขนาดที่เล็กมาก ถ้าเทียบกับสมรรถนะและขนาดของแอคชูเอเตอร์ที่ใช้กันทั่วไปในงานทางวิศวกรรม

1.1 ไมโครแอคชูเอเตอร์สำหรับการควบคุมการไหล

ด้วยสาเหตุที่กล่าวถึงในส่วนที่แล้ว การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กหรือไมโครแอคชูเอเตอร์จึงเป็นที่สนใจของนักวิจัยตลอดช่วง 10 ปีที่ผ่านมา นอกจากจะมีขนาดเล็ก สามารถตอบสนองได้ด้วยความถี่สูง และใช้พลังงานน้อยแล้ว มันยังมีราคาถูกและความเที่ยงตรงในการผลิตสูง โดยการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนทางกลระดับไมโครสเกลหรือเทคโนโลยี MEMS ในช่วงทศวรรษที่

ผ่านมา (Madou 1997, and Kovacs 1998) ทำให้เกิดการพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แบบใหม่ ๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมการไหล

ในช่วงต้น การพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมการไหลในบริเวณใกล้เคียงผนังมาก ๆ โดยมีการพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) และแบบ pneumatic ขึ้นมาแทนที่จะใช้ไมโครแอกชูเอเตอร์แบบ electrostatic ที่มีการใช้งานแพร่หลายมากในอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เนื่องจากไมโครแอกชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบ pneumatic มีระยะเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับพื้น (out-of-plane deformation) ที่สูงมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับแอกชูเอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการไหล

Tsao et al. (1994) พัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์สำหรับงานควบคุมการไหลโดยใช้หลักการแม่เหล็กไฟฟ้า โดยประกอบด้วยแผ่นแฟลปที่มีขดลวดนำไฟฟ้าอยู่ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งไมโครแอกชูเอเตอร์แบบนี้จะเกิดความร้อนที่ผิวของขดลวดมากทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์แบบนี้ใช้พลังงานค่อนข้างสูง โดยในภายหลัง ไมโครแอกชูเอเตอร์ในลักษณะเดียวกันนี้ได้นำมาใช้งานในการควบคุมการผสมของเจ็ดอากาศและเจ็ดเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังแสดงการติดตั้งไมโครแอกชูเอเตอร์แบบแฟลปเพื่อกระตุ้นการไหลที่ปากเจ็ดในรูปที่ 1.4 (Suzuki et al. 2004)

หลังจากนั้นไมโครแอกชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบแฟลปก็ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วยการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยร่วมกับวัสดุ permalloy ที่มีสมบัติเป็นแม่เหล็กถาวร และ Liu et al. (1999) ได้นำไมโครแอกชูเอเตอร์ที่ได้พัฒนานี้ไปใช้ควบคุม separation ของการไหลบนปีกเครื่องบินขนาดเล็ก

ในช่วงกลางทศวรรษที่ 90 นักวิจัยกลุ่มเดียวกันนี้ได้เริ่มพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แบบ pneumatic ขึ้นมา ดังในรูปที่ 1.5 (Grosjean et al. 1998) โดยทำจากวัสดุจำพวก elastomer ซึ่งมันจะขยายตัวเมื่อมีความดันจากภายนอก เช่น จากคอมเพรสเซอร์มากระตุ้น อย่างไรก็ตามแอกชูเอเตอร์ประเภทนี้ต้องมีระบบท่อจากแหล่งกำเนิดความดันและวาล์วจำนวนมาก ทำให้ระบบมีขนาดใหญ่และมีความถี่การตอบสนองต่ำ ด้วยสาเหตุนี้ Yang et al. (1998) จึงได้พัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แบบ thermopneumatic ขึ้นมา ซึ่งใช้คุณสมบัติของสารบางอย่างที่จะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมาสร้างการเคลื่อนที่ ซึ่งไมโครแอกชูเอเตอร์แบบนี้จะใช้พลังงานเทียบเท่ากับไมโครแอกชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าแต่มีความถี่ของการตอบสนองที่ช้ากว่า

1.2 อุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต

ถึงแม้จะมีการพัฒนาไมโครแอกชูเอเตอร์แบบต่าง ๆ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การนำไมโครแอกชูเอเตอร์ไปใช้งานวิศวกรรมจริง ๆ ยังมีน้อยมาก สาเหตุหนึ่งคือ อุปกรณ์เหล่านี้ทำจากวัสดุที่เปราะบางทำให้ไมโครแอกชูเอเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถทนทานต่อสภาวะการไหลที่รุนแรง และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้

แนวทางหนึ่งในการใช้งานไมโครแอกชูเอเตอร์สำหรับงานควบคุมการไหลคือ การใช้งานในรูปแบบอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต (Synthetic jet generator) โดยแอกชูเอเตอร์ในรูปแบบนี้มีการวิจัยมากในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาและแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดีสำหรับงานควบคุมการไหลแบบต่าง ๆ

เช่น การควบคุมทิศทางของเจ็ตหลัก (Smith & Glezer 2002), การควบคุม separation (Amitay et al. 2001), และการควบคุมการถ่ายเทความร้อน (Mahalingam et al. 2004) เป็นต้น โครงสร้างประกอบด้วยแอคชูเอเตอร์ที่ติดตั้งในควาวิตี (cavity) ที่มีรูออริฟิส (orifice) ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 1.6 หลักการทำงานคือ เมื่อแอคชูเอเตอร์เคลื่อนที่ลง อากาศจากภายนอกควาวิตีจะถูกดูดเข้าภายในผ่านรูออริฟิสด้านบน และเมื่อแอคชูเอเตอร์เคลื่อนที่ขึ้น อากาศจะถูกอัดออกมาทำให้เกิดการกระตุกต่อการไหลภายนอกได้ แอคชูเอเตอร์ในรูปแบบซินเทติกส์เจ็ตไม่จำเป็นต้องมีระบบอัดความดันและระบบท่อของไหลเหมือนกับแอคชูเอเตอร์แบบ pneumatic ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม แอคชูเอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่ใช้งานในยุคแรกมีขนาดใหญ่ เช่น ลูกสูบ ลำโพง และแผ่นโลหะที่ติด PZT เป็นต้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.7ก-ข ซึ่งขนาดของตัวขับเคลื่อนนี้เป็นข้อจำกัดหนึ่งในการลดขนาดของระบบควบคุมการไหลที่เป็นแบบซินเทติกส์เจ็ตลง

ถึงแม้จะมีความพยายามในทศวรรษที่ผ่านมาที่จะสร้างอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตให้มีขนาดเล็กลง แต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จนัก เช่น Coe et al. (2006) สร้างอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตแบบ pneumatic ที่มีขนาดเล็กลง โดยใช้ไมโครวาล์วที่สร้างด้วยเทคโนโลยี MEMS ในการเปิดปิดท่อของไหล ทำให้ความถี่ตอบสนองของอุปกรณ์สูงขึ้น แต่ก็ยังต้องการปั๊มคอมเพรสเซอร์เพื่อป้อนอากาศให้กับระบบอยู่ดี Tesar et al. (2006) สร้างอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่ไม่ต้องมีตัวขับเคลื่อน แม้ว่าการออกแบบนี้จะทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้มาก แต่ยังใช้ปั๊มคอมเพรสเซอร์เพื่อป้อนอากาศให้กับระบบ ซึ่งเป็นปัญหาเดียวกับงานของ Coe et al. (2006)

นอกจากวิธีการในรูปแบบอุปกรณ์ซินเทติกส์แล้ว ก็ยังมีการนำไมโครแอคชูเอเตอร์ไปใช้งานในรูปแบบอื่น ๆ ที่ไม่ต้องสัมผัสกับการไหลภายนอกโดยตรงอีก เช่น มีการใช้ความตึงผิวไฟฟ้าที่สูงมาก ๆ สร้างพลาสมาเพื่อทำให้เจ็ตของอากาศก่อตัวขึ้นบนผนัง โดย Moreau (2007) อย่างไรก็ตาม ความตึงผิวที่ใช้ต้องมีขนาดสูงมาก ๆ หรือมีการใช้ไมโครแอคชูเอเตอร์แบบ Piezoelectric เป็นวาล์วเปิดปิดท่อลำเลียงก๊าซความดันสูงโดย Li et al. (2004) อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็ต้องมีระบบท่อลำเลียงก๊าซมาสู่อแอคชูเอเตอร์

ดังนั้น การใช้งานในรูปแบบซินเทติกส์เจ็ตก็น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสมในเมื่อเทคโนโลยีใหม่ยังไม่เกิดขึ้นมา ข้อดีของการใช้งานไมโครแอคชูเอเตอร์ในรูปแบบซินเทติกส์เจ็ตคือ ไมโครแอคชูเอเตอร์ไม่สัมผัสกับการไหลโดยตรงจึงช่วยลดการเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังนั้นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่ขับเคลื่อนด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างมากสำหรับพัฒนาเทคนิคของการควบคุมการไหลที่ทันสมัย

ผลการทดลองและผลการคำนวณในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา เช่น Lee et al. (2003) และ Mallinson et al. (2004) แสดงให้เห็นว่าความเร็วของเจ็ตที่ออกจากรูเปิดของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตนั้น นอกจากจะขึ้นกับขนาดของควาวิตี ขนาดรูออริฟิส และระยะขับเคลื่อน (volume displacement) ของแอคชูเอเตอร์แล้ว ยังขึ้นกับความถี่ของการขับเคลื่อนแอคชูเอเตอร์ (driving frequency) ด้วย ดังนั้นสำหรับขนาดของควาวิตีและรูออริฟิสคงที่หนึ่ง ๆ ความเร็วของเจ็ตจะขึ้นกับสมรรถนะของแอคชูเอเตอร์เท่านั้นคือ ระยะขับเคลื่อนและความถี่ของการทำงาน ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองมักจะแปรผกผันกันสำหรับแอคชูเอเตอร์ทั่วไป

รูปที่ 1.8 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านระยะขับเคลื่อนและความถี่ของไมโครแอคชูเอเตอร์แบบต่าง ๆ โดยสมรรถนะในด้านระยะขับเคลื่อนจะแสดงในเทอม deformation ratio ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะขับเคลื่อนต่อขนาดของแอคชูเอเตอร์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าแอคชูเอเตอร์แบบ piezoelectric และแบบ electrostatic มีความถี่ของการทำงานสูงมาก แต่มี deformation ratio ต่ำ ในขณะที่แอคชูเอเตอร์แบบ electrochemical แบบ electrothermal แบบ pneumatic และแบบ SMA มี deformation ratio สูง แต่มีความถี่ของการทำงานต่ำ ทำให้แอคชูเอเตอร์เหล่านี้ไม่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการไหลแบบทั่ว ๆ ไป จากกราฟมีหลักการของแอคชูเอเตอร์เพียง 3 แบบเท่านั้นที่มีทั้งสมรรถนะที่ดีในเรื่องของระยะขับเคลื่อนและตอบสนองความถี่สูงได้คือ แอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้า แบบ electrostrictive และแบบ magnetostrictive ถึงแม้แอคชูเอเตอร์แบบ electrostrictive และแบบ magnetostrictive จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ขั้นตอนการผลิตซับซ้อนและวัสดุที่ใช้เปราะบางมาก เช่น วัสดุจำพวก elastomer (เช่น Pimpin et al. 2004) ดังนั้นแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอันหนึ่ง เพราะแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้ามีการใช้งานแพร่หลาย มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีความทนทานสูง

อย่างไรก็ตาม แอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้าเองก็มีหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 1.9ก-ค เช่น แบบฟลอป/คาน (Tsao et al. 1994, และ Zhang et al. 2006) แบบแผ่นไดอะแฟรม (Kloo & Liu 2001) แบบจานหมุน (Jia et al. 2007) และแบบคั่นชัก (Nitu et al. 2005) เป็นต้น ซึ่งรูปแบบที่น่าจะเหมาะสมสำหรับเป็นตัวขับเคลื่อนอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตคือ แบบฟลอป/คานและแบบแผ่นไดอะแฟรม เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าแบบอื่น ๆ ที่ระยะขับเคลื่อนเท่ากัน และถ้าเปรียบเทียบระหว่างรูปร่างทั้งสองแบบแล้ว แอคชูเอเตอร์แบบแผ่นไดอะแฟรมจะสร้างได้ยากกว่าและมีความทนทานต่ำกว่า เนื่องจากใช้วัสดุจำพวก elastomer เป็นหลัก ดังนั้นแอคชูเอเตอร์ในรูปแบบฟลอป/คานจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางหนึ่งสำหรับใช้กับอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาถึงรูปแบบของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่ขับเคลื่อนด้วยฟลอปแอคชูเอเตอร์เลย

นอกจากความสำคัญจะอยู่ที่การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์แล้ว การศึกษาเรื่องผลของขนาดของควาร์ตและรูออร์ฟิสกับความถี่ของการขับเคลื่อนต่อความเร็วของเจ็ตของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตก็มีความสำคัญด้วย เพราะความเร็วของเจ็ตควบคุมจะมีผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมการไหลอย่างมาก ถ้าความเร็วหรือโมเมนตัมของเจ็ตต่ำเกินไปผลการกระตุ้นที่จะส่งถึงการไหลจะน้อยและการเปลี่ยนแปลงการไหลจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนั้นแล้วลักษณะการเกิดซินเทติกส์เจ็ตเองก็มีความซับซ้อนและขึ้นกับพารามิเตอร์เหล่านี้อย่างยิ่ง ได้กล่าวไว้แล้ว การศึกษาส่วนหนึ่งพบว่าถึงแม้จะทำให้ระยะเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์ตัวขับเคลื่อนมีขนาดคงที่ ความเร็วหรือการเกิดซินเทติกส์เจ็ตเองก็จะขึ้นกับความถี่ในการขับเคลื่อนด้วย เช่น Lee et al. (2003) พบว่าความเร็วเจ็ตจะเกิดสูงสุดที่ความถี่การขับเคลื่อนที่มีค่าเกือบ 1.4 เท่าของความถี่ที่แอคชูเอเตอร์มีระยะเคลื่อนที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่ผ่านมากการศึกษาในเรื่องนี้ยังมีน้อยมาก เช่น Chaudhari et al. (2009) ศึกษาเกี่ยวกับผลของความถี่ในการขับเคลื่อนไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์และขนาดของควาร์ตต่อความเร็วเจ็ตที่เกิดขึ้น โดยความเร็วเจ็ตสูงจะเกิดที่ 2 ค่าความถี่ โดย

ความถี่แรกตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของไดอะแฟรมและความถี่ที่สองจะตรงกับความถี่ Helmholtz ของคาร์ดี

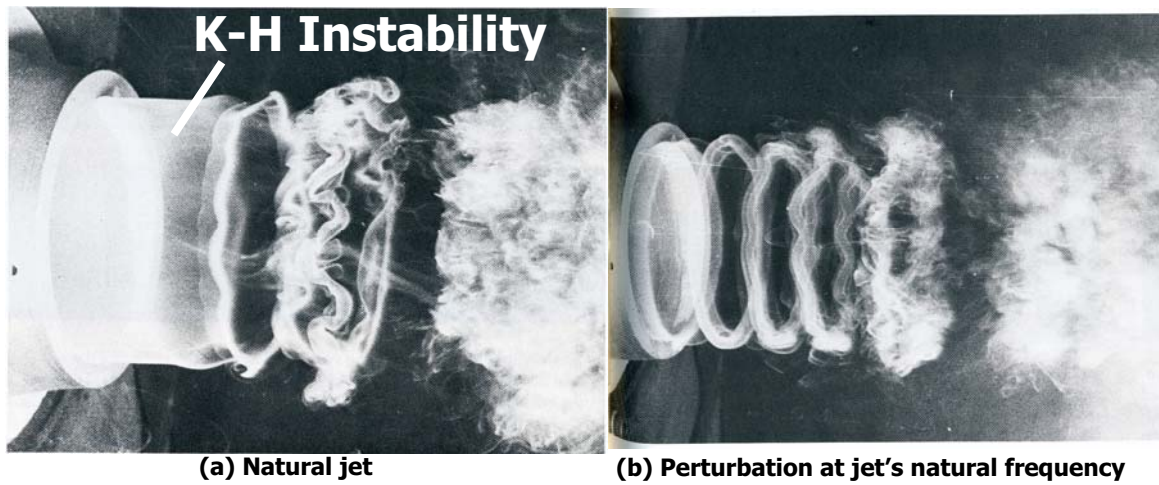
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยและโครงสร้างของรายงาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ การออกแบบแอกซ์เอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนและทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ตที่ขับเคลื่อนด้วยแอกซ์เอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบแฟลปและแบบไดอะแฟรม เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงและหาแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต

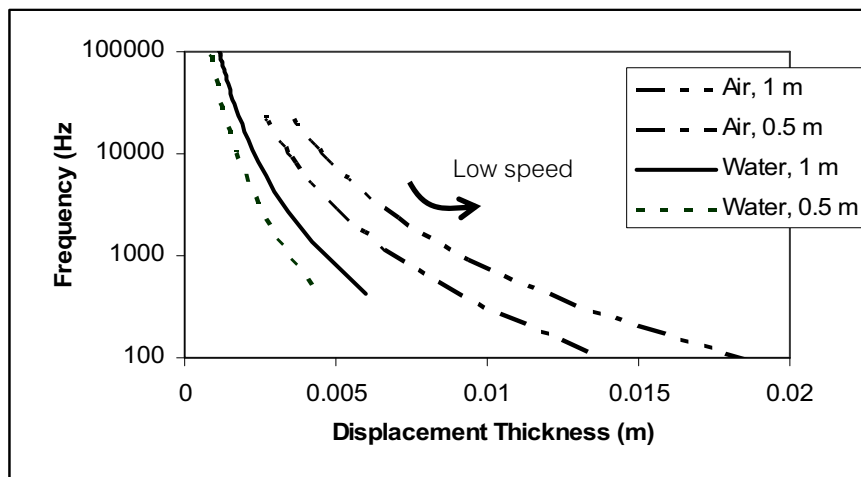
การดำเนินงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แฟลปแอกซ์เอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ต โดยศึกษาการตอบสนองของแฟลปแอกซ์เอเตอร์ด้วยโมเดลคณิตศาสตร์ แล้วหาพารามิเตอร์ของแฟลปที่ทำให้เกิดระยะกระดกและความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลปสูงเพื่อนำไปทดลองสร้างจริง หลังจากสร้างได้แล้วจะทำการวัดการตอบสนองของแฟลปด้วยการทดลองแล้วจึงนำไปทดลองติดตั้งในคาร์ดี และทดลองวัดความเร็วของเจ็ตที่เกิดขึ้น โดยเนื้อหาในส่วนนี้จะแสดงไว้ในบทที่ 2 ของรายงาน

สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ของแฟลปต่อการตอบสนอง ทั้ง dynamic และ static response โดยการลองสร้างแฟลปแอกซ์เอเตอร์ที่มีความกว้างและความยาวต่าง ๆ แล้วทำการวัดการตอบสนองทั้งสองส่วนและนำมาเปรียบเทียบกัน โดยเนื้อหาจะอยู่ในบทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้

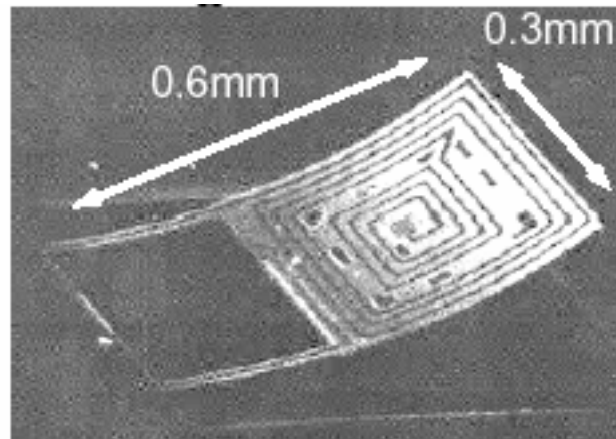
งานวิจัยในส่วนที่สามจะแสดงไว้ในบทที่ 4 ของรายงาน เป็นการศึกษาหาแนวทางในการสร้างแอกซ์เอเตอร์แบบไดอะแฟรมเพื่อใช้แทนที่แฟลปแอกซ์เอเตอร์ โดยการออกแบบด้วย FEM ซอฟต์แวร์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อระยะโก่งของไดอะแฟรม และกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของไดอะแฟรมสำหรับลองสร้างจริง และทดลองหาวิธีการสร้างแอกซ์เอเตอร์จริงเพื่อมาทดสอบ สำหรับในบทที่ 5 จะเป็นบทสรุปการศึกษาของชุดวิจัยนี้



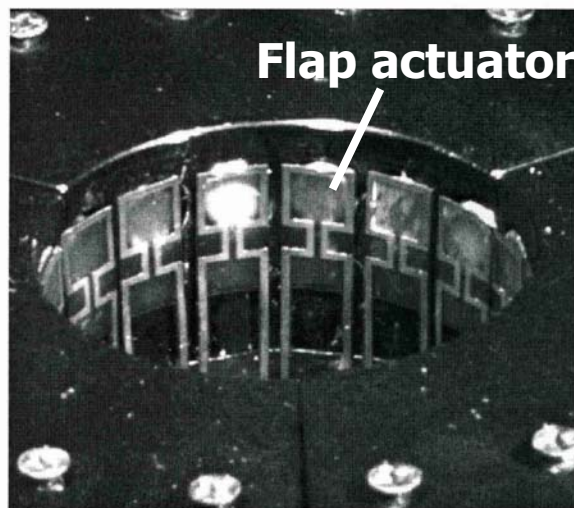
รูปที่ 1.1 ภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจ็ตด้วยการกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติ (Fiedler et al.)



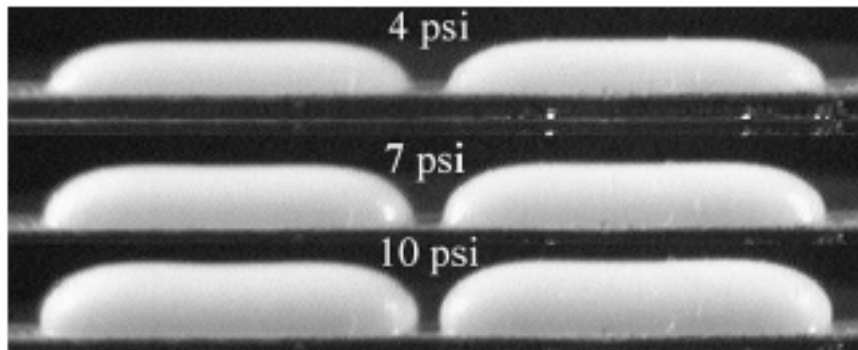
รูปที่ 1.2 Displacement Thickness และความถี่ที่มีการขยายสูงที่สุดที่ระยะ downstream 0.5 และ 1 เมตร สำหรับ Laminar boundary layer ที่มีความเร็ว 0.1-3 m/s (คำนวณจากสมการที่ 1.1)



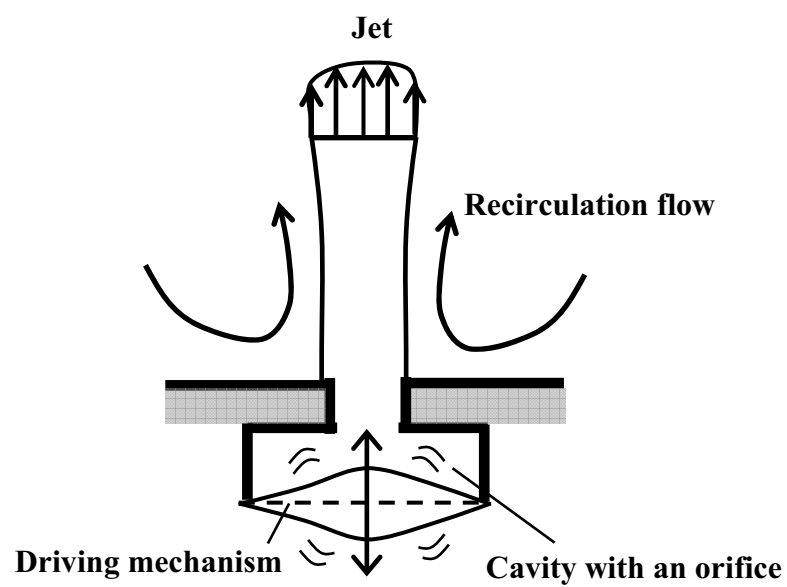
รูปที่ 1.3 ไมโครแอคชูเอเตอร์แบบแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นแรกที่พัฒนาโดย Tsao et al. (1994) มีขนาด 0.3×0.6 มม.² และมีระยะการเคลื่อนที่ประมาณ 0.2 มม.



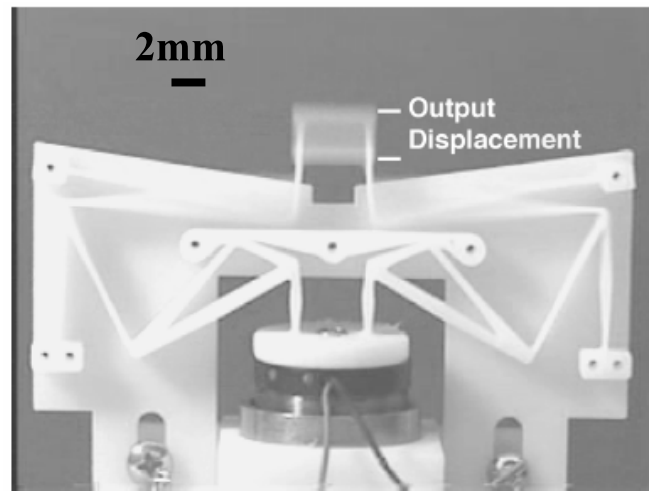
รูปที่ 1.4 การติดตั้งไมโครแฟลปแอคชูเอเตอร์ที่ปากทางออกเจ็ด (Suzuki et al. 2004) ในตอนหลังได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มการผสมระหว่างอากาศกับก๊าซมีเทนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้



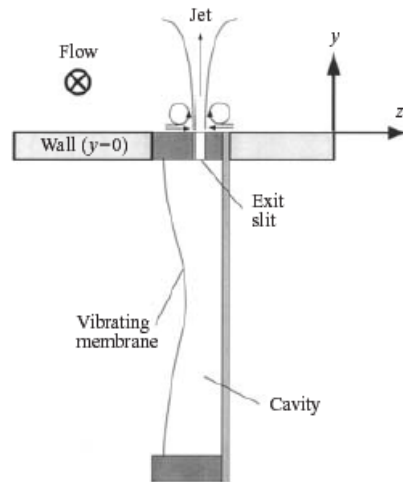
รูปที่ 1.5 ไมโครแอคชูเอเตอร์แบบ pneumatic ขนาด 8.6×3 มม.² ที่ back pressure ต่างๆ โดยที่ความดัน 10 psi ทำให้เกิดระยะเคลื่อนที่ 2 มม. (Grosjean et al.1998)



รูปที่ 1.6 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงกลที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนติดตั้งใน cavity ที่มี orifice อยู่ด้านบน

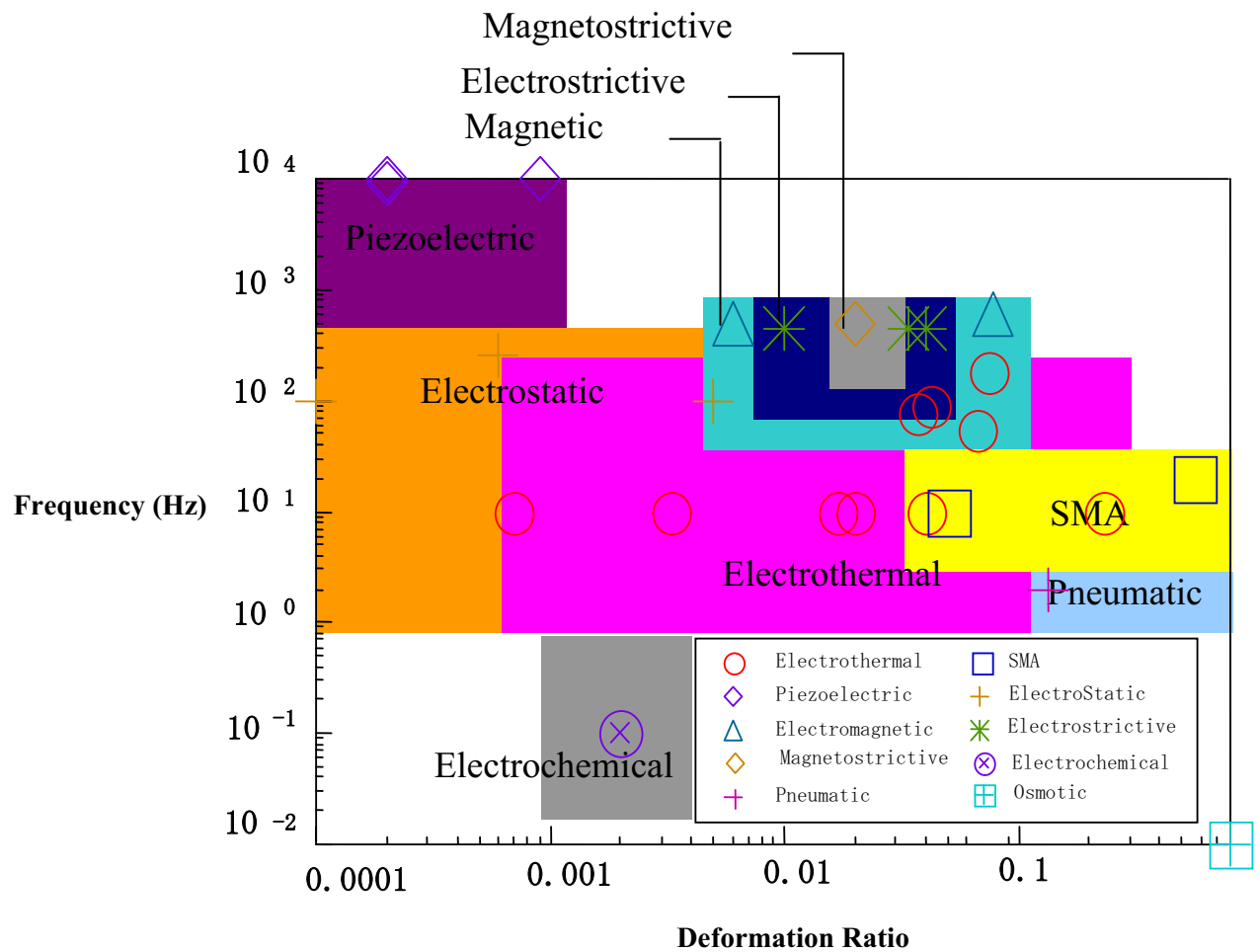


(ก) กลไกที่ซับซ้อนของ Osborn et al. (2004)

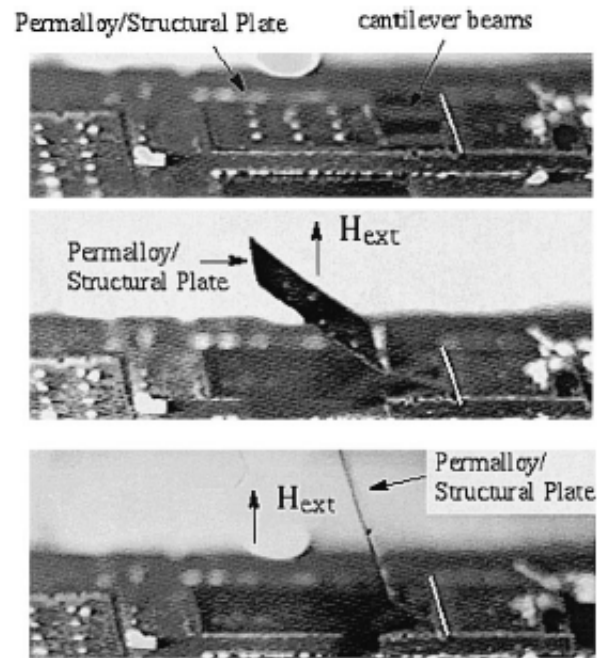


(ข) ไดอะแกรมแสดงแอคชูเอเตอร์ของที่ทำจากแผ่นโลหะและ PZT ของ Rathnasingham and Breuer (2002)

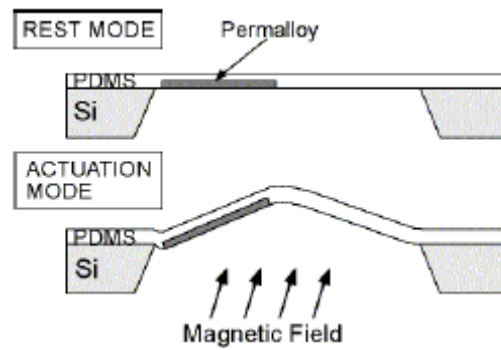
รูปที่ 1.7ก-ข รูปแบบต่าง ๆ ของอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต



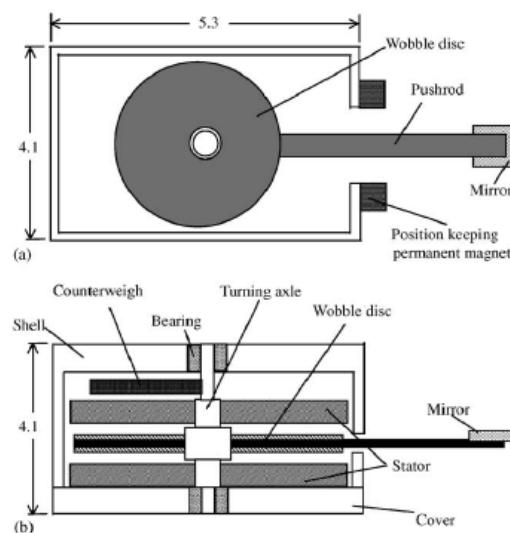
รูปที่ 1.8 กราฟเปรียบเทียบความถี่ของการทำงานและระยะเคลื่อนที่ของไมโครแอคชูเอเตอร์แบบต่างๆ



(ก) ภาพแสดงลำดับการทำงานของแอคชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบคานของ Liu et al. (1999)



(ข) ไดอะแกรมของแอคชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบไดอะแฟรมของ Kloo & Liu (2001)



(ค) ไดอะแกรมของแอคชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบจานหมุนของ Jia et al. (2007)

รูปที่ 1.9 ภาพแสดงแอคชูเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบต่างๆ

บทที่ 2

อุปกรณ์เซ็นเซอร์และแฟลชแอคชูเอเตอร์

จากการศึกษาวิจัยในอดีต พารามิเตอร์ของคาร์ดีและแอคชูเอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์เซ็นเซอร์หลายอย่างจะมีผลอย่างมากต่อความเร็วที่เกิดขึ้น (Chaudhari et al., 2009) และโดยทั่วไปแล้ว ระยะขับเคลื่อนของแอคชูเอเตอร์และความถี่ในการเคลื่อนที่ของแอคชูเอเตอร์น่าจะมีผลโดยตรงต่อความเร็วที่เกิดขึ้น ดังนั้นในส่วนแรก เราจะต้องหาความสัมพันธ์ว่าขนาดของแฟลชเท่าใดจึงจะทำให้การตอบสนองทั้ง static และ dynamic response ที่น่าจะเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน หลังจากได้พารามิเตอร์ตัวแทนที่คิดว่าเหมาะสมแล้ว เทคนิคการสร้างแอคชูเอเตอร์จะถูกพัฒนาขึ้น และนำแอคชูเอเตอร์ต้นแบบที่สร้างขึ้นไปทดสอบว่าการตอบสนองเป็นอย่างไร ในส่วนสุดท้ายของบทนี้จะแสดงผลการทดลองวัดความเร็วของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ใช้แอคชูเอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวขับเคลื่อน

2.1 พารามิเตอร์ของแฟลชแอคชูเอเตอร์

พารามิเตอร์ที่สำคัญคือระยะขับเคลื่อนของแอคชูเอเตอร์และความถี่ในการเคลื่อนที่ ดังนั้นในส่วนนี้เราจะทำการหาผลของขนาดของแอคชูเอเตอร์ต่อพารามิเตอร์ทั้งสอง และนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำของพารามิเตอร์ทั้งสองจากการประมาณการของงานวิศวกรรมจริง

ไมโครแอคชูเอเตอร์แบบแฟลชในการศึกษานี้มีรูปร่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยฐานแฟลชทำจากโพลีอีไมด์และมีขดลวดนำไฟฟ้าทำจากทองแดงด้านบน โดยที่ด้านล่างของขดลวดมีแม่เหล็กถาวรทรงกระบอกวางอยู่ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดทองแดงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้ารอบๆ ขดลวดทองแดงขึ้นมา และสนามไฟฟ้านี้จะมีปฏิสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งทิศทางของแรงจะขึ้นกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและทิศทางสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร สมการแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับส่วนประกอบของแอคชูเอเตอร์ดังกล่าว จะเป็นไปตามสมการที่ 2.1 (Nguyen and Wereley, 2002) ดังนี้

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}, \quad (2.1)$$

โดย $\vec{B}$ (ในหน่วย Tesla) คือ magnetic flux density ของสนามแม่เหล็กถาวร และ $\vec{m}$ (ในหน่วย $A.m^2$) คือ magnetic moment ของขดลวดทองแดงที่เขียนได้ดังสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$\vec{m} = N i A_{loop} \vec{n}, \quad (2.2)$$

โดย N เป็นจำนวนรอบของขดลวด, i เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด, A_{loop} เป็นพื้นที่ตรงกลางขดลวดซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ $\vec{n}$ เป็นเวกเตอร์ตั้งฉากของพื้นที่ตรงกลางขดลวด

สำหรับระยะกระดกของปลายแฟลชสามารถคำนวณได้จากโมเดลของคานแบบ cantilever ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ (Suzuki et al., 1999) ต่อไปนี้

$$y = L^3 F / 3(E_f I_f + E_c I_c), \quad (2.3)$$

โดย y คือระยะกระดกของปลายคาน L คือระยะจากปลายที่ยึดกับพื้นถึงตำแหน่งกึ่งกลางขดลวด E คือ

Young's Modulus ของวัสดุ และ I คือ moment of inertia ของแต่ละส่วน โดย f และ c เป็นตัวอักษรย่อของแฟลปและขดลวดทองแดงตามลำดับ

สำหรับความถี่เรโซแนนซ์ของแบบจำลองคานดั่งที่กล่าวไว้ สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ (Suzuki et al., 1999) ได้ดังนี้

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2}{(L+W/2)^2} \sqrt{\frac{E_f I_f + E_c I_c}{\rho_f A_f + \rho_c A_c}} \quad (2.4)$$

โดย λ (ในที่นี้เท่ากับ 1.875) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสั่นสะเทือนในอากาศ และ ρ เป็นค่าความหนาแน่นของวัสดุ และ A เป็นหน้าตัดภาคตัดขวางของคาน

สิ่งที่สำคัญคือวัสดุที่ใช้ทำฐานแฟลปและขดลวดทองแดง ดังที่ได้กล่าวไว้ วัสดุทั้งสองเป็นโพลีอีไมด์และทองแดงตามลำดับเนื่องจากวัสดุทั้งสองมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานทางด้านเครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาคอยู่แล้ว โดยวัสดุตั้งต้นเป็นแผ่นสองเลเยอร์ระหว่างโพลีอีไมด์และทองแดงที่มีความหนา 25 μm และ 35 μm ตามลำดับ ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับค่า Young's modulus ของโพลีอีไมด์และทองแดงเท่ากับ $3.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ และ $12.98 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของวัสดุทั้งสองเท่ากับ $1.42 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ และ $8.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ

ในแบบจำลองนี้ เราจะศึกษาผลของความกว้างและความยาวแฟลปต่อระยะขับเคลื่อนของแอคชูเอเตอร์และความถี่ในการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยังสามารถควบคุมแอคชูเอเตอร์ได้อยู่ สำหรับระยะขับเคลื่อนนั้นก็คือระยะกระดกของแฟลป และสำหรับความถี่ที่ยังควบคุมแอคชูเอเตอร์ได้คือความถี่ก่อนถึงความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจผลของขนาดแฟลปได้ชัดเจน พารามิเตอร์อื่น ๆ จะถูกทำให้มีค่าคงที่ โดยความกว้างของขดลวดกำหนดให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่ความสามารถของเครื่องมือจะทำได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 300 μm ในขณะที่ขนาดของขดลวดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ ความกว้างของแฟลป สำหรับผลของสนามแม่เหล็ก เราจะใช้แม่เหล็กทรงกระบอกที่มี magnetic flux density เท่ากับ 3,500 Gauss และมีความยาวมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เท่า โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเปลี่ยนไปตามความกว้างของแฟลป นอกจากนั้น ตำแหน่งของกึ่งกลางขดลวดอยู่ในแนวเดียวกันกับกึ่งกลางแท่งแม่เหล็กทรงกระบอก และใช้ซอฟต์แวร์ FEM ในการคำนวณเกรเดียนต์ของ magnetic flux density สำหรับการแทนค่าในสมการที่ (2.1) เพื่อคำนวณหาแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำบนแฟลป

ด้วยเงื่อนไขดังกล่าว ระยะกระดกของแฟลปขนาดความกว้างและยาวต่าง ๆ ได้ถูกคำนวณและแสดงผลสำหรับกรณีที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 และ 1 A ในรูปที่ 2.3ก-ข ตามลำดับ สำหรับกรณีที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 A พบว่า เมื่อความยาวแฟลปมากขึ้นสำหรับค่าความกว้างหนึ่ง ๆ แล้วจะมีระยะกระดกสูงขึ้น ในทางกลับกันสำหรับกรณีที่มีความยาวของแฟลปค่าหนึ่งแล้ว เมื่อเพิ่มความกว้างของแฟลป ระยะกระดกจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง และถ้าความกว้างถูกเพิ่มขึ้นไปอีก ระยะกระดกจะลดลง นั้นแสดงว่า ความกว้างของแฟลปมีผลทั้งสองด้านต่อระยะกระดก ซึ่งอาจจะอธิบายได้ดังนี้ เมื่อความกว้างมากขึ้นจะส่งผลให้แฟลปมี moment of inertia เพิ่มขึ้นและขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลของ moment of inertia และแรงจะส่งผลต่อระยะกระดก

ในทางตรงกันข้ามกัน คือ เมื่อเพิ่ม moment of inertia จะทำให้ระยะกระดกลดลง แต่การเพิ่มแรงจะทำให้ระยะกระดกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหมายความว่าในขอบเขตที่ความกว้างไม่สูงนัก ผลของการเพิ่ม moment of inertia จะน้อยกว่าผลของการเพิ่มขนาดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าแต่เมื่อขนาดความกว้างมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ผลของการเพิ่ม moment of inertia จะมากขึ้นและท้ายที่สุดจะมีผลมากกว่าการเพิ่มขนาดของแรงทำให้ความกว้างมาก ๆ ระยะกระดกจะมีขนาดต่ำลง สำหรับผลที่กระแสไฟฟ้าขนาด 1 A แนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกและขนาดความกว้างและยาวของแฟลบจะคล้ายคลึงกับกรณีที่กระแสไฟฟ้า 0.5 A แต่มีระยะกระดกมากกว่า 2 เท่า

รูปที่ 2.4 แสดงความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลบที่มีขนาดความกว้างและยาวต่าง ๆ ซึ่งประมาณมาจากสมการที่ (2.4) โดยการพิจารณาทั้งจากสมการและจากกราฟ เราพบว่าความกว้างของแฟลบจะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์น้อยกว่าความยาวแฟลบ ตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าความกว้างจะเพิ่มมากขึ้น 4 เท่าสำหรับความยาวแฟลบหนึ่ง ๆ ความถี่เรโซแนนซ์ก็ไม่ได้เปลี่ยนแปลงนักคือลดลงประมาณ 10% แต่สำหรับความกว้างหนึ่ง ๆ แล้วการเพิ่มความยาวจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงมาก

เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริง โดยทั่วไปความถี่ของการกระตุ้นในงานทั่ว ๆ ไปมักจะอยู่ในออดเดอร์ประมาณ 10-1000 Hz ในขณะที่ระยะกระดกควรจะมีขนาดประมาณ 0.1-1 มม. (Suzuki et al. (1999), Inaoka et al. (2004), และ Kasagi et al. (2009)) ซึ่งจริง ๆ แล้วจะขึ้นกับ characteristic dimension และ frequency ของการไหลในงานทางวิศวกรรมต่าง ๆ ด้วย อย่างไรก็ตามในงานนี้ยังไม่ได้มุ่งเน้นศึกษาไปที่การไหลใดการไหลหนึ่ง ในเบื้องต้นนี้ เราจึงเลือกใช้แฟลบที่มีความยาวประมาณ 6 มม. ซึ่งจะครอบคลุมความต้องการข้างต้น และความกว้างเท่ากับ 3 มม. ซึ่งเป็นขนาดความกว้างที่มีระยะกระดกสูงที่สุด

2.2 กระบวนการสร้างแฟลบ

แฟลบถูกสร้างจากแผ่นทองแดงโพลีอีไมต์ที่มีความหนารวมกันเท่ากับ 60 μm ขั้นตอนเริ่มจากการเคลือบแผ่นด้วยแผ่นโฟโตรีซิสแบบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำแผ่นที่เคลือบแล้วไปฉายแสง UV ด้วยเครื่อง mask aligner และทำการ develop สารโฟโตรีซิสเพื่อสร้างแพทเทิร์นของแมสก์ขึ้นมา หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานดังกล่าวไปจุ่มในสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 นาทีเพื่อกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งไป และล้างโฟโตรีซิสแมสก์ทิ้งด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สำหรับกระบวนการทั้งหมดใช้ DI water (น้ำกลั่นที่ไม่มีไอออนอิสระ) และสร้างในคลีนรูม รูปร่างของขดลวดทองแดงที่สร้างขึ้นบนแฟลบโพลีอีไมต์แสดงไว้ในรูปที่ 2.5ก โดยมีความกว้างของขดลวดประมาณ $280 \pm 5 \mu\text{m}$ ความต้านทานประมาณ 0.5 Ω

หลังจากนั้น แฟลบแต่ละอันจะถูกตัดแยกออกมาและนำปลายด้านหนึ่งไปยึดกับพื้นผิว ด้วยกาวอะคริลิกและต่อสายไฟออกจากแผ่นเชื่อมสายไฟที่ออกแบบไว้ด้านปลายที่ยึดกับพื้นผิว แล้วจึงหุ้มซิลิโคนจนวนลงบนขั้วสายไฟเพื่อป้องกันการเกิดออกไซด์และการลัดวงจรไฟฟ้า โดยรูปแอควิวเตอร์ประกอบบนแท่งแม่เหล็กแสดงไว้ในรูปที่ 2.5ข จากรูปจะเห็นว่าแฟลบโค้งขึ้นด้านบนเนื่องจากเมื่อกาวแห้งจะหดตัวและดึงให้แฟลบบงขึ้น โดนการวัดระยะกระดกของแฟลบจะมีขนาดประมาณ 0.5 -

0.8 ม.ม. หรือระยะห่างของแผ่นแฟลปจากแท่งแม่เหล็กก็จะมีระยะห่างประมาณเท่ากับ 0.5 -0.8 ม.ม. ด้วยเช่นกัน และระยะความยาวของแฟลปอาจจะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.5 ม.ม.

2.3 การทดลองวัดการตอบสนองของแฟลป

เนื่องจากปัญหาที่พบในการติดตั้งโดยวิธียึดด้วยกาวอะคริลิกคือ ระยะความยาวอาจจะคลาดเคลื่อนได้ 0.5 ม.ม. เราจึงจะทำการตรวจสอบการตอบสนองของแฟลปที่มีความยาวทั้งสองขนาดคือ 6 และ 7 ม.ม. เพื่อศึกษาว่าผลของความยาวที่อาจจะต่างไปจากที่ออกแบบไว้มีผลมากหรือน้อยอย่างไร การทดลองนี้จะวัดการตอบสนอง static และ dynamic response ของแอกซ์เอดเตอร์ 3 ตัวสำหรับแต่ละความยาวแฟลป โดยชุดทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนป้อนสัญญาณไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อนแอกซ์เอดเตอร์และส่วนเครื่องมือวัด ในส่วนการป้อนสัญญาณมีทั้งแหล่งจ่ายไฟ DC (DC supply) และ AC ซึ่งประกอบด้วย Function generator และแอมพลิฟายเออร์ พร้อมทั้งออสซิลอสโคปเพื่อตรวจสอบความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับส่วนเครื่องมือวัดจะใช้กล้องถ่ายรูป และ capacitance probe ควบคู่กับออสซิลอสโคป โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองในแต่ละส่วนดังนี้

2.3.1 การตอบสนอง static response

การทดลองนี้ทำเพื่อหาระยะกระดกเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ค่าต่าง ๆ ไปยังแฟลปแอกซ์เอดเตอร์ โดยระยะที่วัดเป็นระยะของปลายแฟลป การวัดด้วยเทคนิคทางภาพถ่ายคือ การบันทึกภาพแฟลปขณะที่ยังไม่ได้ขยับและเมื่อขยับแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ด้วยความละเอียดของภาพและเลนส์ที่ใช้ทำให้การวัดนี้มีความคลาดเคลื่อนในช่วง $\pm 50 \mu\text{m}$ ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 จากตำแหน่งที่แอกซ์เอดเตอร์อยู่นิ่ง แผ่นแฟลปสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสองทิศทาง คือเข้าใกล้หรือห่างออกไปจากแท่งแม่เหล็ก โดยขึ้นกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ในกราฟแสดงความสัมพันธ์นี้ ระยะกระดกที่เป็นบวกคือการเคลื่อนที่ออกห่างจากแท่งแม่เหล็กและระยะที่เป็นลบคือการเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม โดยในการทดลองพบว่า เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า DC เพิ่มขึ้น ระยะกระดกจะเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเชิงเส้นตรง และเมื่อแฟลปยาวขึ้นจะมีระยะกระดกที่มากกว่าที่กระแสไฟฟ้าเท่ากัน สำหรับระยะกระดกที่ 1 A แฟลปที่มีความยาว 6 ม.ม.จะมีระยะกระดกเฉลี่ยประมาณ $300 \mu\text{m}$ และแฟลปที่มีความยาว 7 ม.ม. จะมีระยะประมาณ $450 \mu\text{m}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณพบว่า ระยะที่วัดได้จากการทดลองจะสั้นกว่าซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในการทดลองจริงตำแหน่งของแฟลปห่างออกไปจากแท่งแม่เหล็กประมาณ 0.5- 0.8 ม.ม. ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กลดลงกว่าจึงทำให้ระยะกระดกต่ำกว่า นอกจากนั้น แอกซ์เอดเตอร์อาจจะไหม้ได้ถ้าป้อนกระแสไฟฟ้าสูงกว่าประมาณ 3 A ซึ่งเกิดจากเกิดความร้อนสะสมสูงเกินไปทำให้ขดลวดทองแดงลอกออกจากฐานโพลีอีไมด์และเกิดกระแสไฟลัดวงจร

2.3.2 การตอบสนอง dynamic response

การตรวจสอบการตอบสนองต่อสัญญาณความต่างศักย์ AC ที่ใช้ในการขับเคลื่อนในรูปแบบคลื่นไซน์และคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ต่าง ๆ เริ่มจาก 30-1,500 Hz ซึ่งข้อจำกัดของแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ทำให้ต้องเริ่มการทดลองจาก 30 Hz และค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ใช้จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ $\pm 0.4 \text{ A}$ ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่ใช้ในการทดลองที่แล้ว อย่างไรก็ตาม

ตามเนื่องจากข้อจำกัดของ range ของระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือวัด (Capacitance probe, Lion precision) ซึ่งเท่ากับ $500 \pm 250 \mu\text{m}$ จากปลายโพรบวัด ทำให้ต้องยอมลดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนแอคชูเอเตอร์ลงอยู่ในช่วงดังกล่าว นอกจากนั้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโพรบเท่ากับ 3 มม. ดังนั้นระยะเคลื่อนที่ที่จะรายงานต่อไปเป็นระยะเคลื่อนที่เฉลี่ยในพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. นี้และในการทดลองจะติดตั้งเครื่องมือวัดให้ตำแหน่งกึ่งกลางของโพรบและขดลวดทองแดงอยู่ตรงกัน

การตรวจวัดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แสดงการเคลื่อนที่จากเครื่องมือวัดได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณขับเคลื่อนที่แปลงอยู่ในรูปของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า เพื่อที่จะวัด lag time ของการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้ sampling frequency เท่ากับ 20 kHz โดยเครื่องมือวัดที่มีอยู่จะสามารถวัดการกระดกของเส้นของแฟลปด้วยความถูกต้อง $\pm 0.1 \mu\text{m}$ และ 0.05 ms สำหรับการวัด lag time ของการเคลื่อนที่และสัญญาณขับเคลื่อน

รูปที่ 2.7ก-ง และ 2.8ก-ง แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแฟลปยาว 6 มม. เมื่อขับเคลื่อนด้วยสัญญาณความต่างศักย์รูปคลื่นไซน์และสี่เหลี่ยมตามลำดับ ในผลการทดลองที่จะแสดงต่อไปนี้ แกนตั้งเป็นการนำเอาค่าระยะการเคลื่อนที่ที่ความถี่ใด ๆ หารด้วยระยะการเคลื่อนที่ที่ความถี่เท่ากับ 30 Hz สำหรับแกนนอนเป็นการนำเอาความต่างศักย์ที่เวลาใด ๆ หารด้วยค่าสูงสุดของความต่างศักย์ เมื่อระยะมีค่าเป็นบวกหมายความว่าแฟลปกำลังเคลื่อนที่ห่างจากแท่งแม่เหล็กและค่าเป็นลบหมายถึงการเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม สำหรับแฟลปทั้งสามตัวมีค่าการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันจึงจะเอาลักษณะการเคลื่อนที่ของหนึ่งตัวเท่านั้นมาแสดง

สำหรับกรณีการขับเคลื่อนด้วยสัญญาณรูปไซน์ ขนาดของระยะเคลื่อนที่และ phase lag จะมีค่าประมาณคงที่และประมาณเท่ากับศูนย์ ตามลำดับ จนกระทั่งความถี่เพิ่มขึ้นสูงกว่า 300 Hz ขนาดของค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อความถี่สูงขึ้น จนกระทั่งความถี่ในการขับเคลื่อนสูงกว่า 1-1.2 kHz ขนาดของระยะเคลื่อนที่จะมีคาลดลงและการเคลื่อนที่จะมีเฟสตรงกันข้ามกับสัญญาณการขับเคลื่อน ซึ่งความถี่ในช่วงนี้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลป

สำหรับกรณีการขับเคลื่อนด้วยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างจากออกไปอย่างชัดเจน โดยสังเกตพบว่า ที่ความถี่ต่ำมีการเคลื่อนที่แบบการสั่นด้วยความถี่สูงซ้อนอยู่บนลักษณะการเคลื่อนที่รูปสี่เหลี่ยม (ซึ่งน่าจะสอดคล้องกับลักษณะของสัญญาณการขับเคลื่อน) อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่ในการขับเคลื่อนสูงขึ้นลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวหายไป และเมื่อความถี่สูงขึ้นประมาณ 600 Hz แล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ก็เริ่มจะคล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่ที่ขับเคลื่อนด้วยสัญญาณรูปไซน์

สำหรับรูปที่ 2.9 แสดงค่า gain และ phase lag ของแฟลปเปรียบเทียบกันระหว่างแฟลปยาว 6 มม. และ 7 มม. เมื่อป้อนสัญญาณการขับเคลื่อนรูปไซน์ โดย gain นิยามด้วยขนาดการเคลื่อนที่สูงสุดของการเคลื่อนที่ที่ความถี่ใด ๆ หารด้วยขนาดการเคลื่อนที่ที่ความถี่ต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง 30 Hz ซึ่งทั้งสองความยาวแฟลป ค่า gain จะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงช่วงของถี่ของความถี่เรโซแนนซ์ (สำหรับแฟลป 6 มม. ความถี่เท่ากับ 1 kHz และแฟลป 7 มม. ความถี่เท่ากับ 460 Hz) ที่ค่า gain จะสูงขึ้นมากกว่า 2-3 เท่าและเมื่อเลยช่วงความถี่เรโซแนนซ์ไปแล้วค่า gain จะมีขนาดลดลง

สำหรับ phase lag ก็จะไม่คล้อยกัน เมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนสูงขึ้น ค่า phase lag จะเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงถึง $-\pi$ เมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์

ผลการทดลองนี้สนับสนุนโมเดลคณิตศาสตร์ในช่วงต้นว่า ผลของความยาวแฟลปจะมีมากต่อความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลป ซึ่งสำหรับการเพิ่มความยาวจาก 6 เป็น 7 มม. ความถี่เรโซแนนซ์จะลดลงถึงครึ่งหนึ่ง นอกจากนี้เรายังพบว่าที่ความยาวแฟลปเท่ากัน (อาจจะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการติดตั้งบ้าง) มีขนาดความถี่เรโซแนนซ์ต่างกันเล็กน้อย และขนาดของ gain ที่ความถี่เรโซแนนซ์ก็อาจจะแตกต่างกันได้ 2-3 เท่า ในการศึกษาของเราได้ศึกษาลักษณะการติดตั้งแฟลปกับพื้นผิวด้วย 2 วิธีการ คือ การหนีบแฟลป (clamping) และการใช้กาว (gluing) เราพบว่าผลของวิธีการติดตั้งจะค่อนข้างน้อยต่อขนาดความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลป หากแฟลปมีความยาวเท่ากัน

จากงานทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเมื่อความยาวของแฟลปเปลี่ยนแปลงไป สำหรับลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการขับเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างคลื่นไซน์และสี่เหลี่ยมจะมีความแตกต่างที่ชัดเจนที่ความถี่การขับเคลื่อนต่ำ ๆ แต่ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนนักที่ความถี่ค่อนข้างสูงหรือสูงกว่า 600 Hz ในกรณีนี้

2.4 อุปกรณ์ซินเทติสเจ็ตที่ขับเคลื่อนด้วยแฟลปแอคชูเอเตอร์

อุปกรณ์ซินเทติสเจ็ตถูกสร้างขึ้นด้วยไมโครแอคชูเอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยคาร์ดีของอุปกรณ์ถูกสร้างด้วยฐานและผนังพลาสติกใส และแผ่นอะลูมิเนียมที่เป็นฝาปิดด้านบน โดยการประกอบด้วยสกรูดังแสดงในรูปที่ 2.10 และแอคชูเอเตอร์จะถูกยึดบนฝาอะลูมิเนียมโดยติดตั้งให้ตำแหน่งของกึ่งกลางแอคชูเอเตอร์และรูออริฟิสอยู่ในแนวเดียวกัน หลังจากต่อสายไฟเรียบร้อยแล้วก็ยึดสายไฟด้วยกาวซิลิโคนอีกครั้ง และใช้ซิลิโคนในการอุดคาร์ดีให้มีขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการ โดยคาร์ดีของอุปกรณ์ซินเทติสเจ็ตมีขนาดประมาณ 4x6x1.5 มม. และรูออริฟิสด้านบนแผ่นอะลูมิเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. และยาว 1 มม.

หลังจากนั้น นำอุปกรณ์ซินเทติสเจ็ตไปติดตั้งบนแท่นยึดซึ่งสามารถปรับตำแหน่งของแอคชูเอเตอร์ได้ อย่างไรก็ตามความสามารถในการปรับตำแหน่งจะทำได้แค่ในทิศทางเดียวบนระดับระนาบ หลังจากจึงนำฝาครอบซึ่งมีขนาดประมาณ 15x15x15 ซม. มาปิดไว้ โดยสอดเครื่องมือวัดผ่านผนังด้านบนของฝาครอบลงไป เพื่อป้องกันลมจากภายนอกมารบกวน

สำหรับอุปกรณ์วัดความเร็ว เราใช้ hotwire anemometer ที่มีเซนเซอร์ 1 อันและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเซนเซอร์เท่ากับ 0.2 มม. และยาว 1 มม. โดยหัวโพรบซึ่งมีเซนเซอร์อยู่ที่ปลายถูกติดตั้งบน traverse ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและปรับตำแหน่งได้ในทิศแนวตั้ง อย่างไรก็ตามเมื่อเลื่อนตำแหน่งของหัวโพรบไปจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นด้วย ทำให้ต้องวางตำแหน่งเซนเซอร์ห่างจากกึ่งกลางรูเปิดของซินเทติสเจ็ตประมาณ 2 มม. ในการทดลองทำการวัดความเร็วเจ็ตเมื่อแอคชูเอเตอร์ถูกขับเคลื่อนด้วย AC ขนาด ± 1.4 A ด้วยลักษณะสัญญาณแบบไซน์และสี่เหลี่ยม

จากผลการทดลอง เราพบว่า ลักษณะของความเร็วเจ็ตเมื่อขับเคลื่อนด้วยสัญญาณคลื่นไซน์และสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่งวัดดังกล่าว จะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 11ก-ข โดยสังเกตจากขนาดความเร็วที่วัดได้ เราพบว่าเจ็ตจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนอยู่ในช่วง 500-620 Hz

สำหรับทั้งสองสัญญาณ โดยความเร็วสูงสุดที่วัดได้สำหรับสัญญาณคลื่นชานเทกกับ 0.6 เมตรต่อวินาที ที่ความถี่ 600Hz และความเร็วสูงสุดสำหรับคลื่นสี่เหลี่ยมเทกกับ 0.8 เมตรต่อวินาที ที่ความถี่ 620Hz ซึ่งขนาดความถี่ของการขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดความเร็วสูงสุดที่มีขนาดเท่ากันนี้ อาจเกิดจากลักษณะของการเคลื่อนที่ที่คล้ายคลึงกับของแฟลปเมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนสูงถึงระดับหนึ่ง สำหรับสาเหตุที่เกิดความเร็วสูงสุดที่ 600 Hz น่าจะสืบเนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลปที่ติดตั้งในคาร์ดิที่มีค่าประมาณ 600Hz (พบว่ามีความยาวอยู่ในช่วง 6-7 ม.ม.)

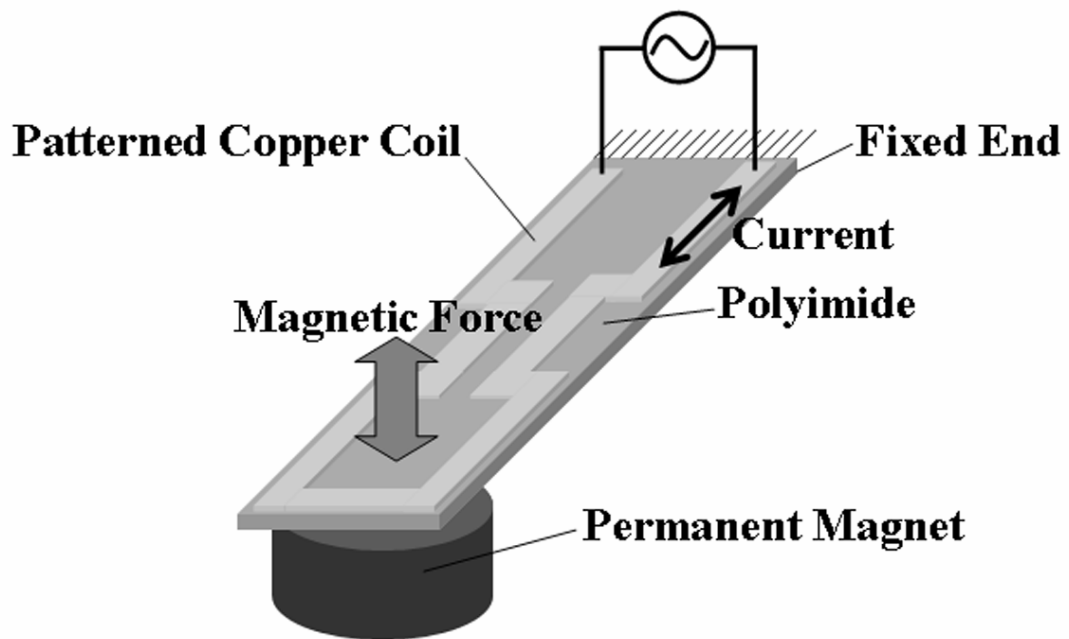
ผลการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Pimpin et al. (2007) ซึ่งเป็นการพัฒนาไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์สำหรับอุปกรณ์ซินเทติกส์ โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของการศึกษาทั้งสองสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 ค่าจากตารางบ่งชี้ว่าแอคชูเอเตอร์แบบแฟลปในการศึกษานี้มี sweeping volume (ระยะกระดกคูณกับพื้นที่ของแฟลป) ที่ค่อนข้างสูง แต่ความเร็วเจ็ตที่ถูกสร้างขึ้นกลับมีค่าไม่สูงนัก หากเปรียบเทียบความเร็วเจ็ตของการทดลองทั้งสองแล้ว สมมติว่าเจ็ตที่พิจารณาเป็นเจ็ตแบบธรรมดาจะมีการลดลงของขนาดความเร็วเจ็ตแปรผกผันกับระยะห่างจากปากออริฟิส ซึ่งการทดลองทั้งสองมีขนาดรูออริฟิสใกล้เคียงกัน (0.4 และ 0.5 ม.ม.) ทำการวัดที่ระยะห่างจากรูออริฟิสต่างกัน 2 เท่า และขนาดความเร็วเจ็ตก็ต่างกันประมาณ 2 เท่า ทำให้สามารถประมาณได้ว่าความเร็วเจ็ตที่ทางออกของออริฟิสน่าจะมีขนาดใกล้เคียงกัน หากพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าความเร็วเจ็ตที่ทางออกใกล้เคียงกันทั้ง ๆ ที่สร้าง sweeping volume ได้มากกว่า นั้นแสดงว่า อากาศที่ถูกแฟลปอัดไม่ได้ไหลออกที่รูออริฟิสทั้งหมด แต่มีส่วนหนึ่งที่ไหลวนในคาร์ดิอยู่ ซึ่งน่าจะเกิดจากมีช่องว่างระหว่างขอบแฟลปและผนังคาร์ดิที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ประมาณ 0.5 ม.ม. โดยปัญหานี้น่าจะแก้ไขได้หากเลือกใช้เครื่องมือในการสร้างคาร์ดิที่มีความแม่นยำสูงขึ้นและมีอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งแอคชูเอเตอร์ที่สามารถปรับตำแหน่งได้ละเอียดมากกว่านี้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของงานที่ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ต; ฟิล์มเมมเบรนด้วยหลักการ electrostrictive และใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่แพทเทินเป็นลายกันหอย (Pimpin et al., 2007); แฟลปแอคชูเอเตอร์ในการศึกษานี้

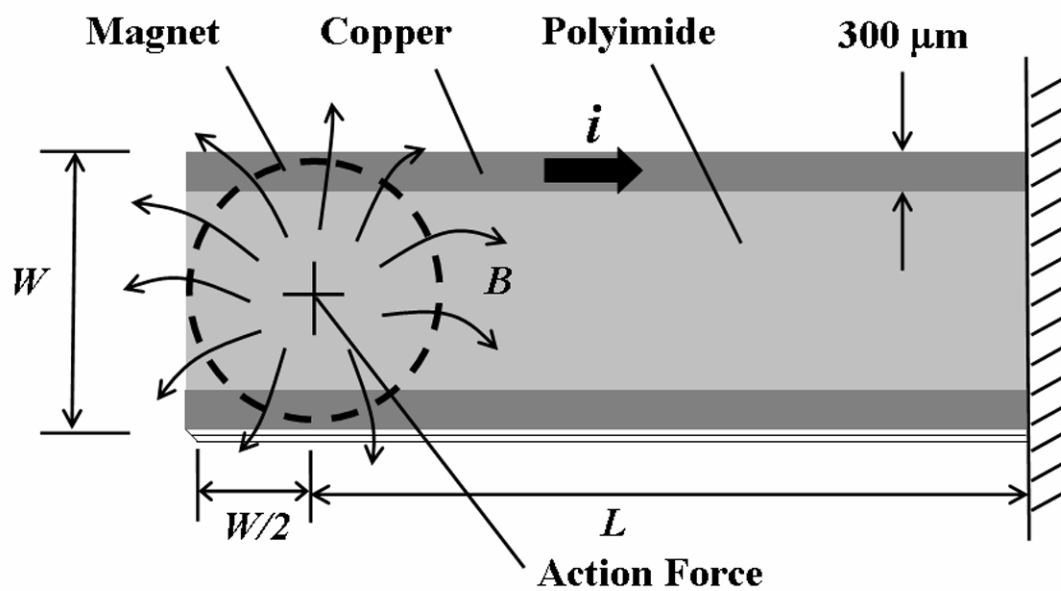
Parameters	Pimpin et al. (2007)	Present work
Cavity (width x length x height, mm ³)	4x4x0.4	4x6x1.5
Orifice diameter (mm)	0.4	0.5
Orifice length (mm)	0.05	1
Actuator type	Electrostrictive membrane	Electromagnetic flap
Actuator configuration	4 mm diameter	7 mm long and 3 mm wide
Max. deformation (μm)	120 μm at DC of 1.8 kV	450 μm at DC of 1 A
Resonant frequency (Hz)	~ 1.3 kHz	~ 460 Hz
Max. Jet velocity (m/s)	0.4 m/s at downstream 4 mm from orifice	0.8 m/s at 2 mm downstream from orifice

2.5 สรุปผลการศึกษา

อุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้ไมโครแฟลบบแอคชูเอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แฟลบบแอคชูเอเตอร์ที่สร้างด้วยเทคนิคการสร้างระดับไมโครสเกลประกอบด้วยฐานแฟลบบทำจากโพลีอีไมด์และมีขดลวดทองแดงกว้าง $280\text{ }\mu\text{m}$ อยู่ด้านบน และทำการศึกษาการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response จากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าตรงขนาด 1 A แฟลบบที่มีความกว้างและยาว 3 และ 6 มม. มีระยะกระดกของปลายแฟลบบเท่ากับ 0.25 มม. ในขณะที่แฟลบบขนาดความกว้างและยาว 3 และ 7 มม. มีระยะกระดกเท่ากับ 0.45 มม. โดยแฟลบบทั้งสองมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ $1,000$ และ 460 Hz ตามลำดับ เมื่อมาพิจารณาการเคลื่อนที่ของแฟลบบพบว่า ลักษณะของสัญญาณที่ป้อนสู่แอคชูเอเตอร์ระหว่างคลื่นรูปไซน์และสี่เหลี่ยมจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ที่มีความแตกต่างกันมากในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงมากขึ้นแล้วลักษณะการเคลื่อนที่ของแฟลบบจะใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะเมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนมีขนาดใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลบบ ในการศึกษาแฟลบบแอคชูเอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปติดตั้งเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่มีขนาดรูออร์ฟิสเท่ากับ 0.5 มม. และจากการทดลองพบว่าความเร็วเจ็ตที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาดขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนและมีค่าสูงสุด 0.8 m/s ที่ระยะ 2 มม. จากกึ่งกลางของรูออร์ฟิส เมื่อใช้ความถี่ในการขับเคลื่อนประมาณ 600 Hz ซึ่งน่าจะใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลบบ สำหรับความเร็วเจ็ตที่ค่อนข้างต่ำน่าจะเป็นผลของระยะห่างระหว่างขอบแฟลบบและผนังคาร์ตีมีขนาดค่อนข้างใหญ่

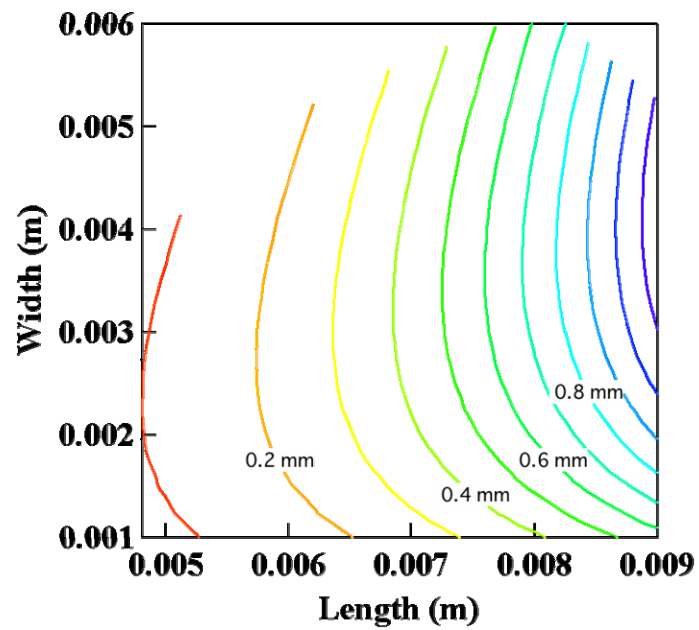


รูปที่ 2.1 รูปแบบของแฟลบบแอคชูเอเตอร์และการติดตั้งในการศึกษานี้

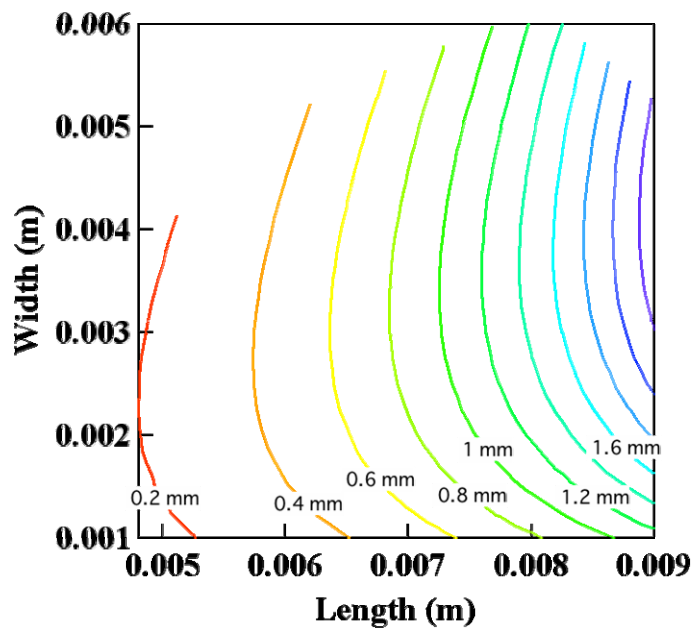


Pi Thickness = 25 μm , Cu Thickness = 35 μm

รูปที่ 2.2 โมเดลของแฟลบที่ใช้ในการประมาณระยะกระดกและความถี่เรโซแนนซ์

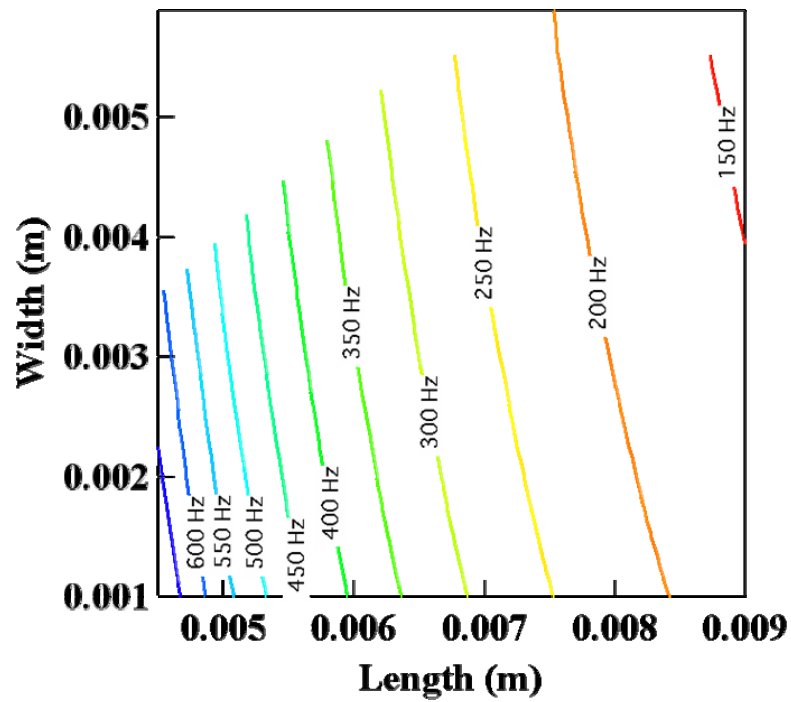


(ก) ระยะกระดกของปลายแฟลนสำหรับแฟลนขนาดต่าง ๆ ที่กระแสไฟฟ้าตรง 0.5 แอมแปร์

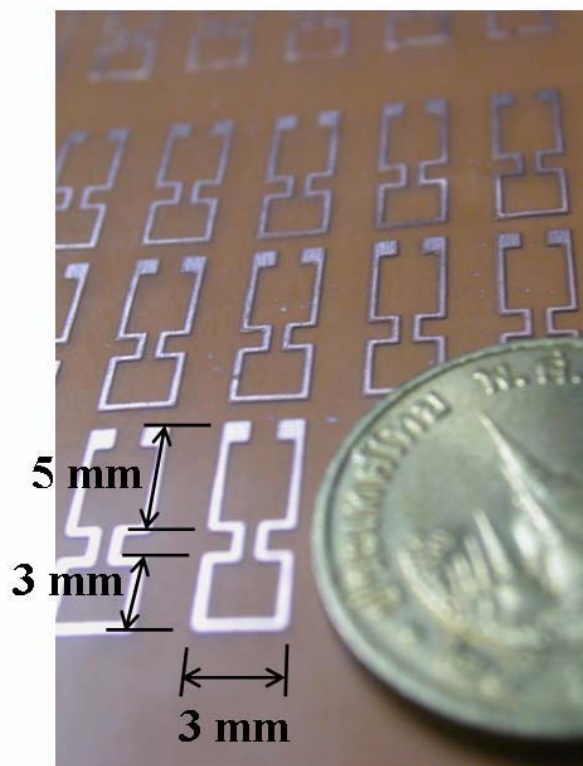


(ข) ระยะกระดกของปลายแฟลนสำหรับแฟลนขนาดต่าง ๆ ที่กระแสไฟฟ้าตรง 1 แอมแปร์

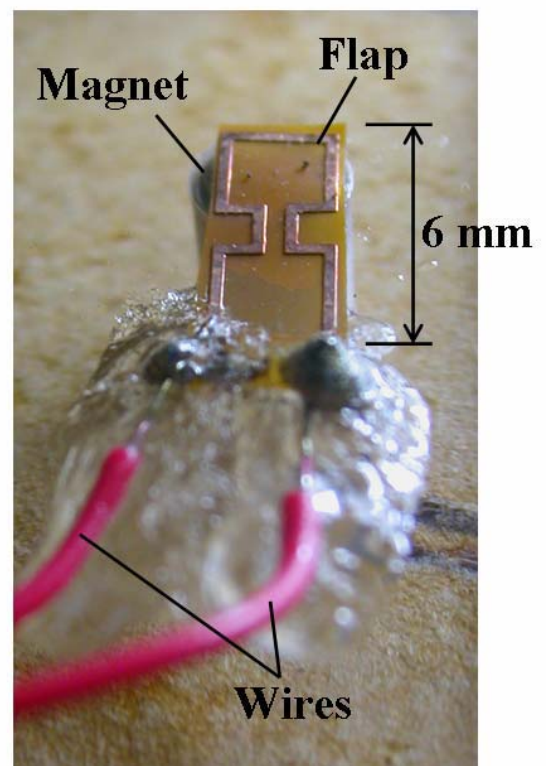
รูปที่ 2.3 ผลทำนายระยะกระดกที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 และ 1 แอมแปร์ สำหรับแฟลนที่มีความกว้างและยาวต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 ผลทำนายความถี่เรโซแนนซ์สำหรับแฟลปที่มีความกว้างและความยาวต่าง ๆ

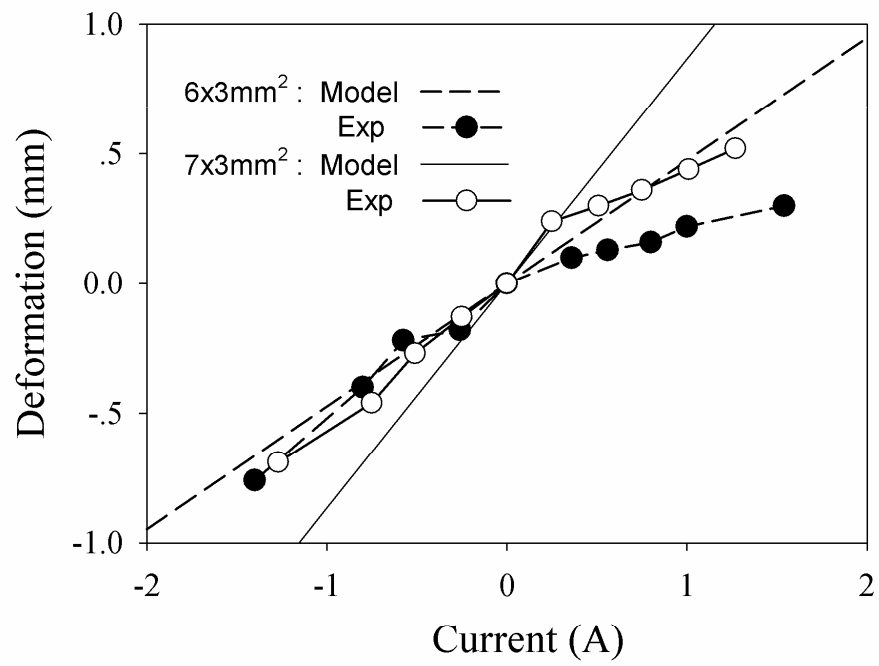


(ก)

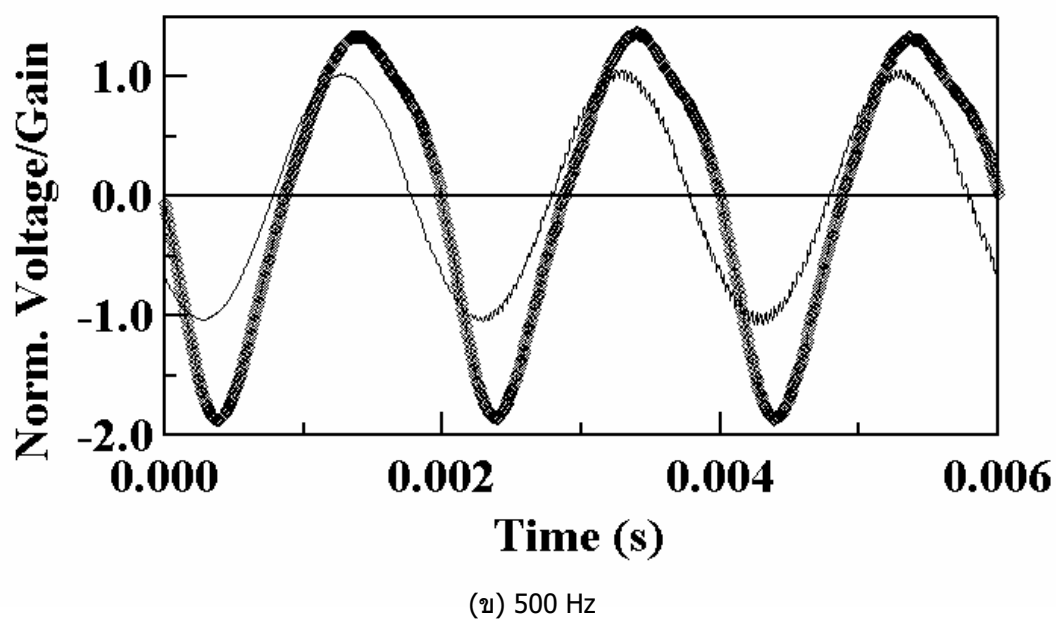
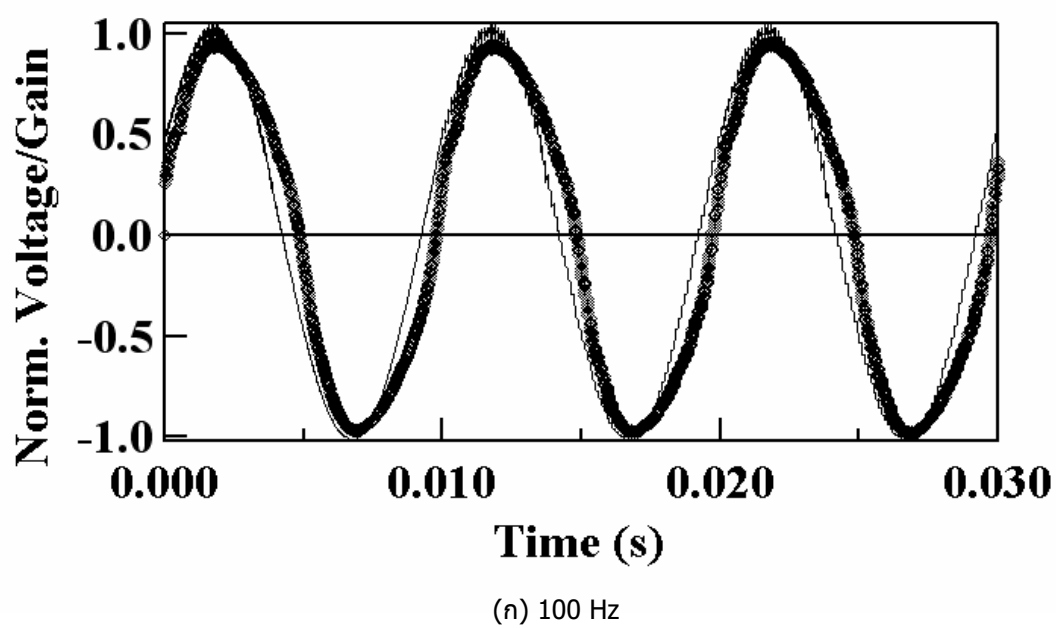


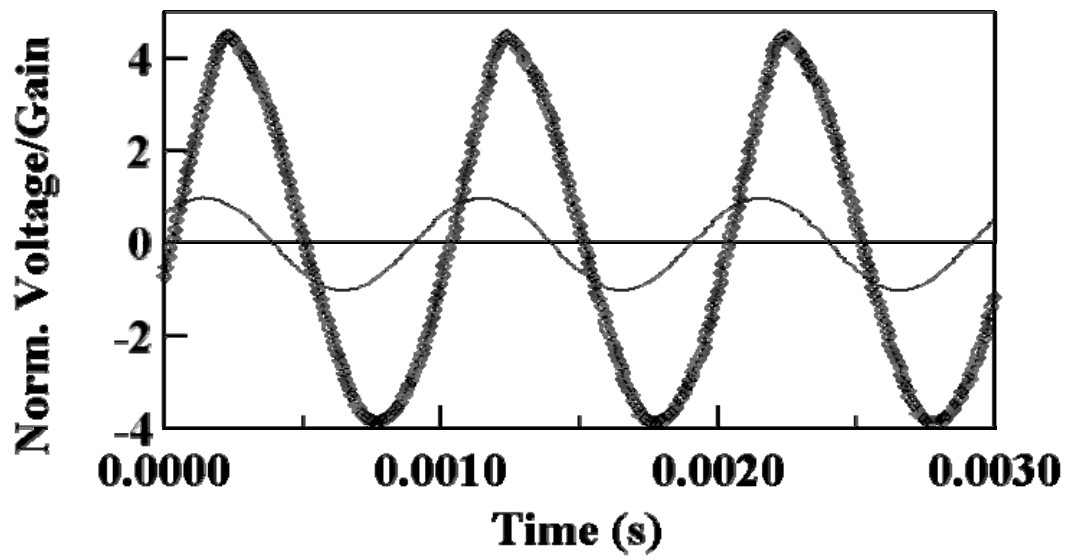
(ข)

รูปที่ 2.5 แผ่นโพลีอไมด์และขดลวดทองแดง ที่มีขนาดความกว้าง 280 μm (ก) หลังจากกระบวนการผลิต (ข) หลังจากติดตั้งและต่อสายไฟ

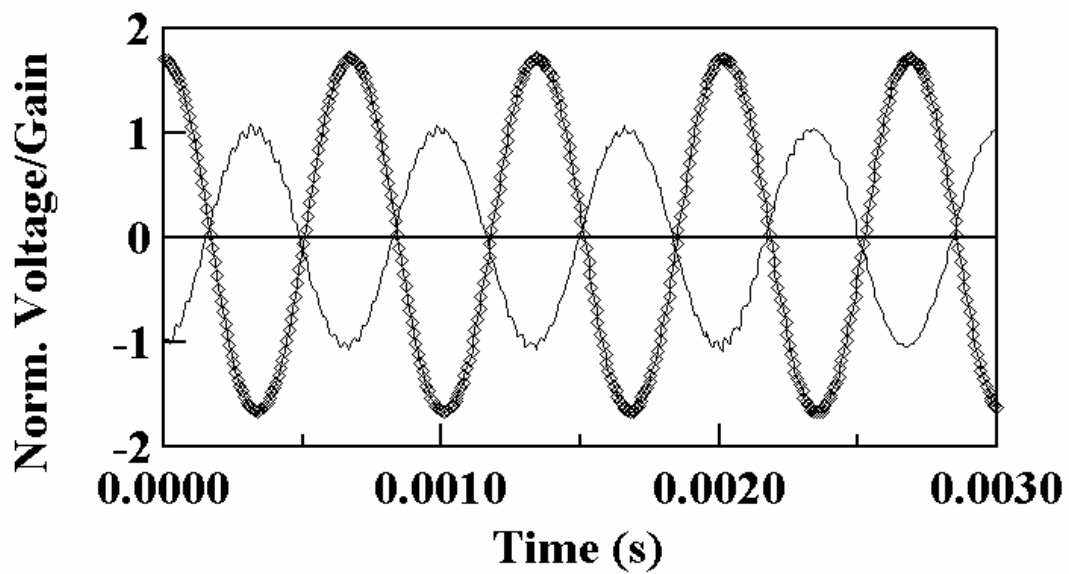


รูปที่ 2.6 ผลการทดลอง static response เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ป้อนสู่แอดชัวเอเตอร์และระยะกระดกของปลายเฟลป



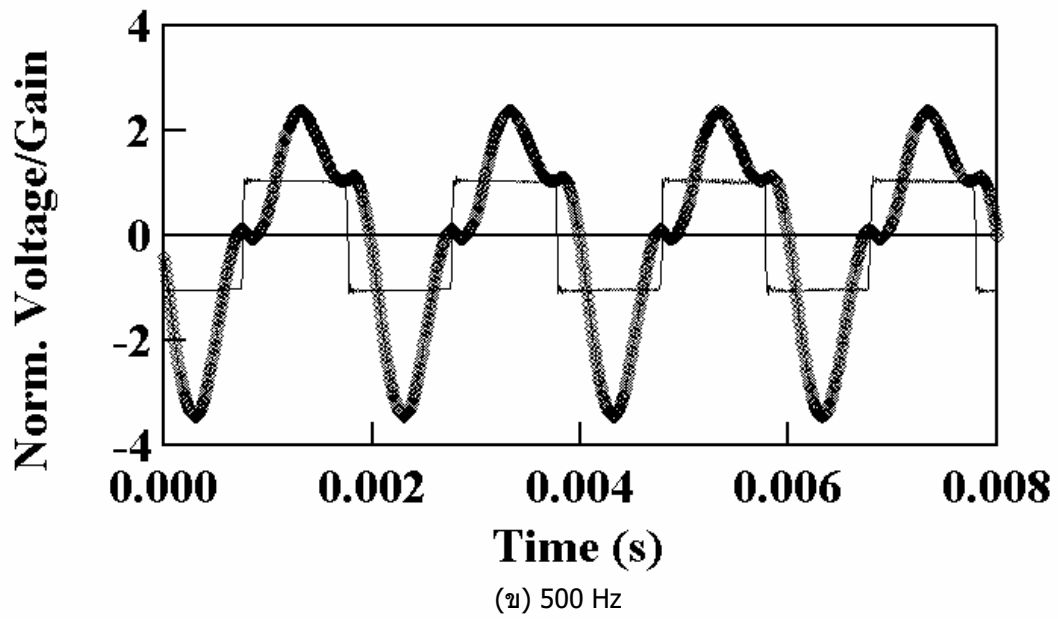
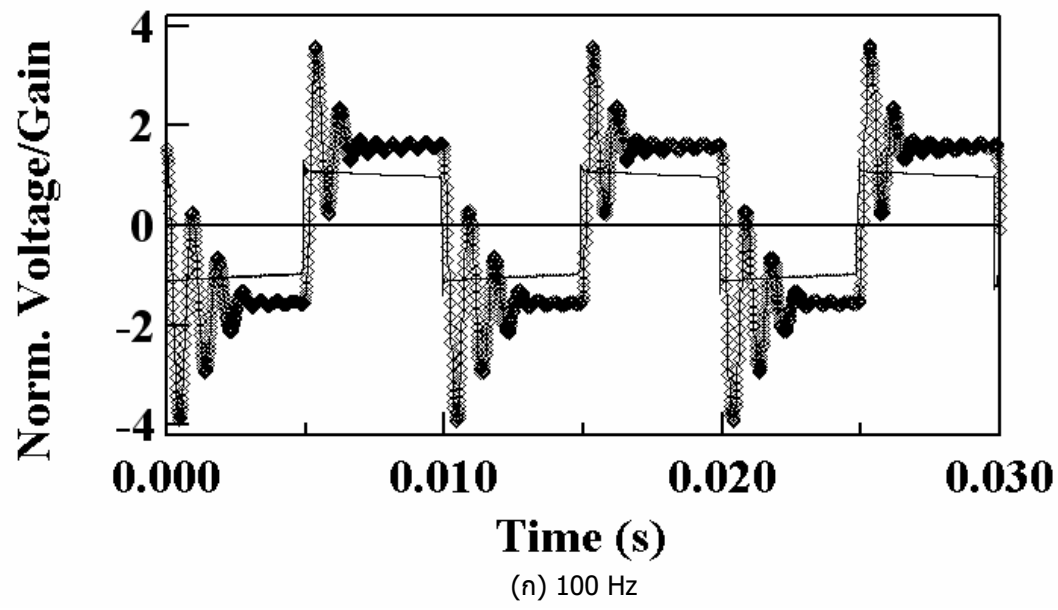


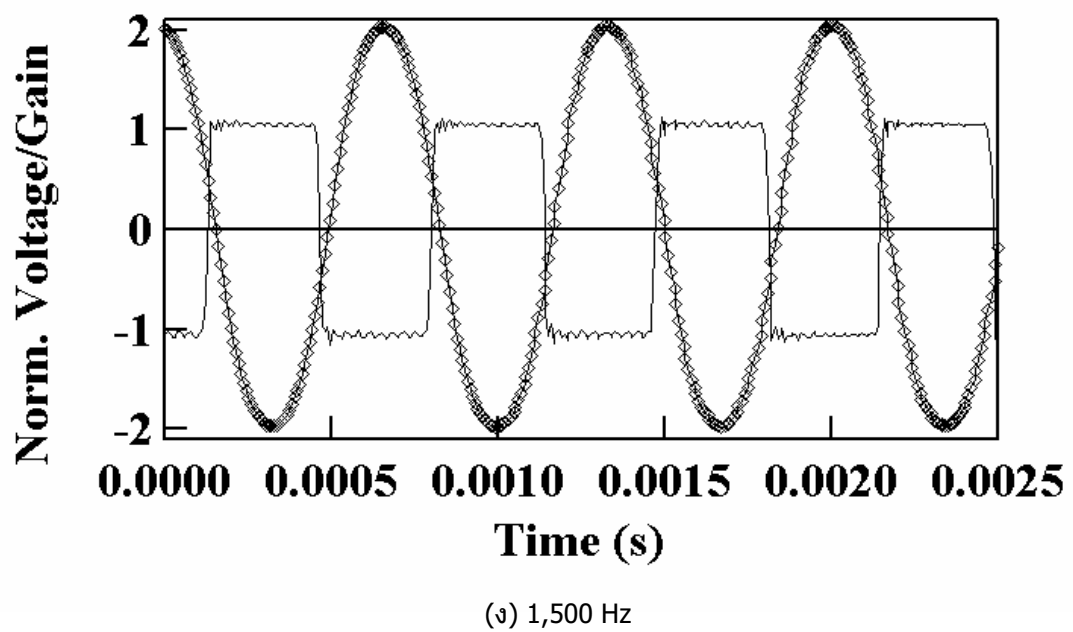
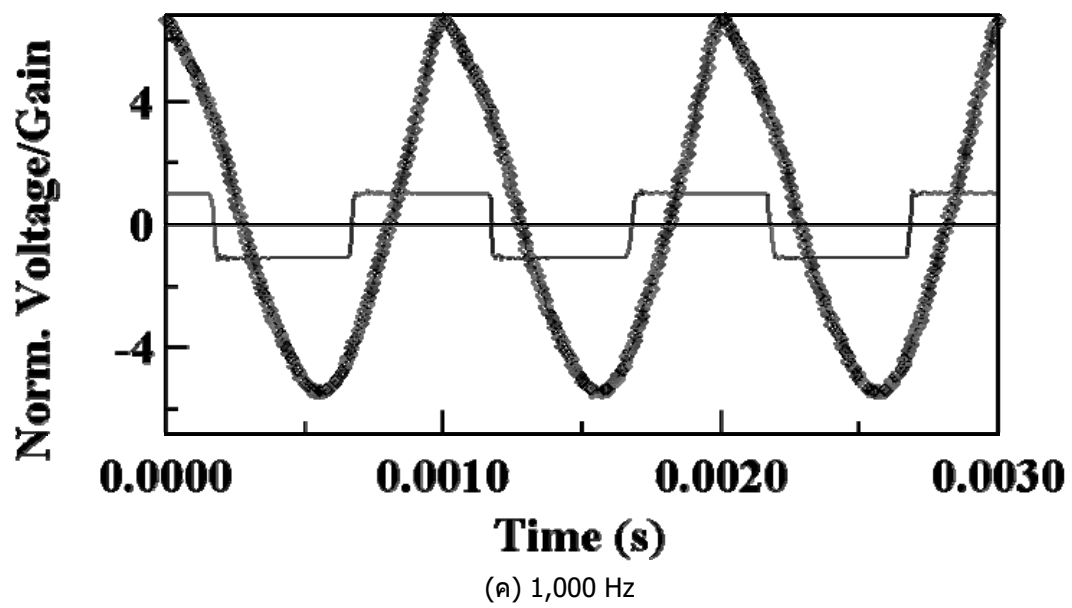
(ค) 1,000 Hz



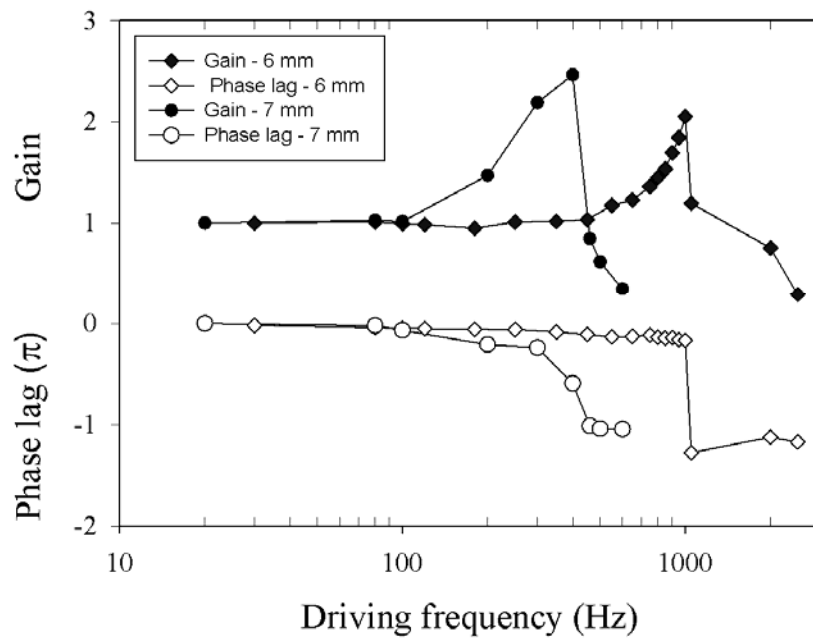
(ง) 1,500 Hz

รูปที่ 2.7 ก-ง ลักษณะการเคลื่อนที่ของแฟลชเทียบกับสัญญาณที่ใช้ในการขับเคลื่อน เมื่อใช้
ลักษณะสัญญาณรูปซายน์ (— สัญญาณไฟฟ้า, □ การเคลื่อนที่)

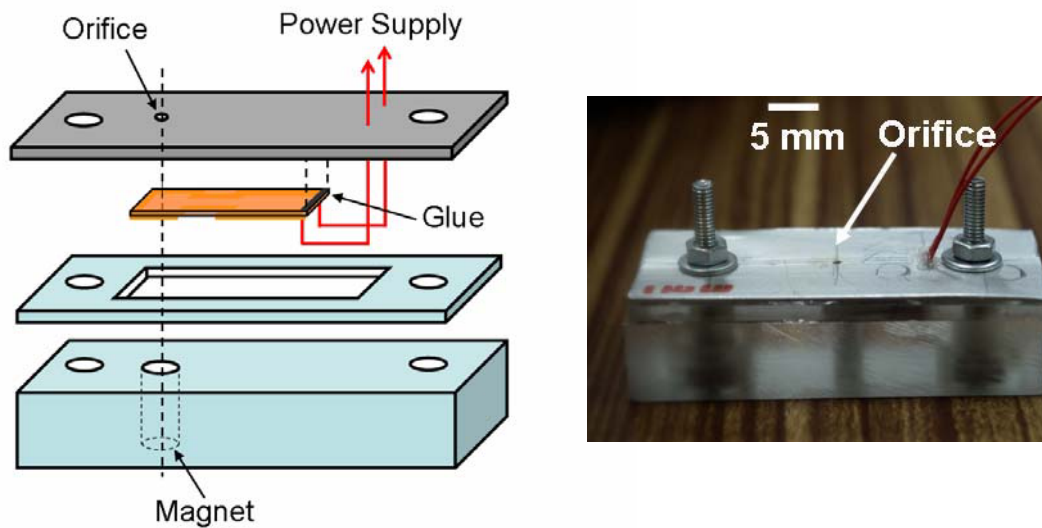




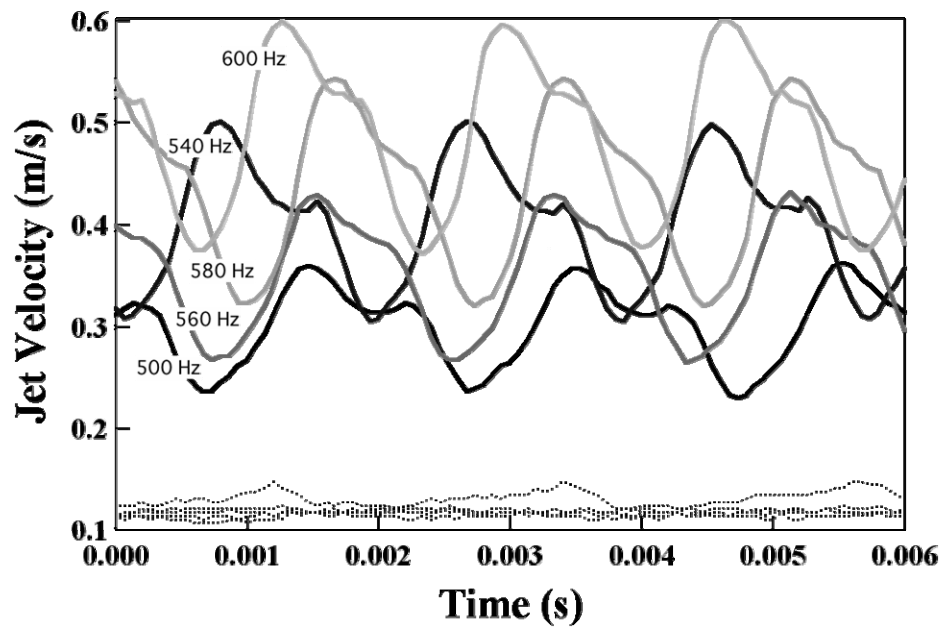
รูปที่ 2.8 ก-ง ลักษณะการเคลื่อนที่ของแฟลชเทียบกับสัญญาณที่ใช้ในการขับเคลื่อน เมื่อใช้ ลักษณะสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (— สัญญาณไฟฟ้า, □ การเคลื่อนที่)



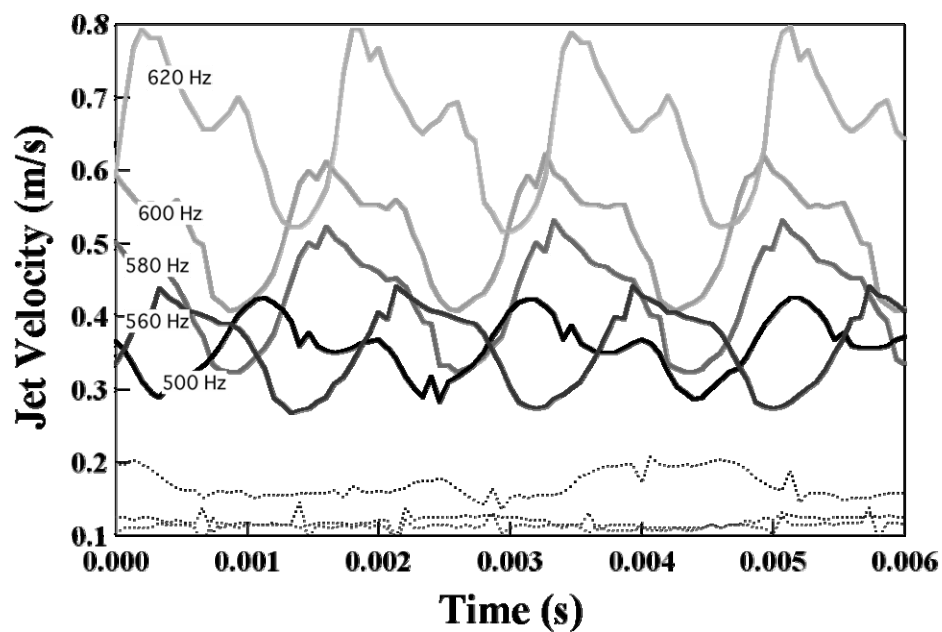
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบ dynamic response ระหว่างแฟลบที่มีความยาว 6 และ 7 มม. โดยทั้งสองอันมีความกว้าง 3 มม.



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงกลประกอบด้วยโครงสร้างของแผ่นพลาสติกและอะลูมิเนียม โดยมีแฟลบแอคชูเอเตอร์และแท่งแม่เหล็กติดตั้งไว้ด้านใน และด้านบนมีรู orifice ขนาด 0.5 มม.; (ซ้าย) ตำแหน่งของส่วนประกอบต่าง ๆ, (ขวา) ภาพถ่ายเมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว



(ก) สัญญาณขับเคลื่อนในรูปร่างคลื่นขายน



(ข) สัญญาณขับเคลื่อนในรูปร่างคลื่นสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.11 ก-ข สัญญาณความเร็วของเจ็ตที่ถูกสร้างขึ้นที่ความถี่ของการขับเคลื่อนต่าง ๆ โดยทำการวัดที่ระยะ 2 ม.ม. จากปากเจ็ต

บทที่ 3

พารามิเตอร์ของแฟลบบแอคซัวเอเตอร์

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความกว้างและความยาวของแฟลบต่อการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับช่วยเลือกพารามิเตอร์ของแฟลบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้กับอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ด หรือความรู้เดียวกันนี้ก็ยังสามารถนำไปใช้กับงานวิศวกรรมอื่น ๆ ได้ นอกจากนั้นในการศึกษาส่วนนี้ยังมีการพัฒนากระบวนการผลิตแฟลบขึ้นมาใหม่ด้วยเครื่องมือที่เหมือนกับงานในการลอกลายวงจรไฟฟ้า (สร้างลายทองแดงบนแผ่น PCB) ซึ่งมีราคาถูกและใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพง โดยรายละเอียดจะนำเสนอต่อไป

3.1 กระบวนการสร้างแฟลบบแบบใหม่

ในการศึกษาครั้งนี้ รูปร่างและขนาดของขดลวดทองแดงแตกต่างกันไปจากการศึกษาในบทที่ 2 เล็กน้อย ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1ก ซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองในทั้งสองบทได้โดยตรง สำหรับกระบวนการสร้างจะคล้ายกับกระบวนการในบทที่แล้ว โดยเริ่มจากการเคลือบแผ่นโฟโตรีซิสแบบแห้งชนิด negative บนแผ่นโพลีอีไมด์-ทองแดง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสจะได้คุณภาพการยึดเกาะบนแผ่นโพลีอีไมด์-ทองแดงดีที่สุด หลังจากนั้นนำเอาไปฉายแสงจากหลอด 20W/T12/blacklight blue โดยมีระยะห่างจากหลอดประมาณ 5 ซม. จากการทดลองทำการฉายแสงด้วยเวลาต่าง ๆ กันพบว่าควรใช้เวลาประมาณ 30 นาทีจะทำให้เห็นแพทเทิร์นที่ชัดเจนปรากฏบนโฟโตรีซิสมากที่สุด

หลังจากนั้น จึงทำการ develop ด้วย Na_2CO_3 (conc. 2 g/200-cc H_2O or 0.094mol/l) ใช้เวลา 9-10 นาที ซึ่งจะทำให้มีแพทเทิร์นของโฟโตรีซิสชัดเจนที่สุด แล้วล้างด้วยน้ำประปา และนำไปจุ่มในสารละลาย FeCl_2 เพื่อกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการทิ้ง จากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมคือ 37 นาที อย่างไรก็ตาม ชั้นของโพลีอีไมด์จะถูกกัดกร่อนไปด้วยเล็กน้อย แล้วจึงทำการล้างโฟโตรีซิสทั้งด้วยอะซิโตนแล้วตากให้แห้ง

เมื่อนำมาวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เราพบว่าจากการออกแบบขดลวดทองแดงที่ความกว้าง 400 μm ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่กว่าการทดลองในบทที่ 2 เพราะคาดว่าความแม่นยำของกระบวนการสร้างน้อยกว่า แต่เมื่อเราใช้กระบวนการผลิตดังที่สรุปไว้ข้างต้น เราพบว่า ความกว้างของขดลวดทองแดงเปลี่ยนแปลงไป โดยจะขึ้นกับทิศทางและตำแหน่งการวางชิ้นงานเทียบกับหลอดไฟตอนทำการฉายแสง โดยเส้นตรงที่วางขนานกับหลอดไฟจะมีขนาดกว้างขึ้นเป็น $418 \pm 37 \mu\text{m}$ และส่วนที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับหลอดไฟจะมีขนาดเล็กลงเป็น $343 \pm 12 \mu\text{m}$ และสามารถอธิบายเหตุผลได้ดังนี้ สำหรับแนวขนานกับหลอดไฟ เนื่องจากใช้หลอดไฟดวงเดียว ดังนั้นแสงที่ลอดผ่านช่องบน mask ไปกระทบบนโฟโตรีซิสจะแผ่ขยายออกทำให้ขนาดใหญ่ขึ้นและที่ระยะห่างจากหลอดไฟไม่เท่ากันจะมีมุมแผ่ขยายออกไม่เท่ากัน แต่สำหรับแนวตั้งฉากกับหลอดไฟแล้วจะไม่มีแผ่ขยายออกนี้ซึ่งขนาดที่แคบ

ลงนี้อาจเกิดจาก over etching ขดลวดทองแดง นอกจากนั้น เรายังพบอีกว่า ในทั้งสองทิศทางขอบของเส้นขดลวดก็มีความไม่สม่ำเสมอค่อนข้างสูงประมาณ $\pm 10\mu\text{m}$

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตในบทที่ 2 ซึ่งใช้หลอด UV (A-type) และ DI water และสารเคมีในกระบวนการ etching ที่แตกต่างกัน เราสรุปได้ว่ากระบวนการในบทที่ 2 จะมีความแม่นยำในการผลิตสูงกว่า คือ accuracy ของขนาดซึ่งแตกต่างจากที่ออกแบบไว้ประมาณ 6.7% และ precision ของขนาดซึ่งแตกต่างกันระหว่างขดลวดทองแดงที่ผลิตพร้อมกันประมาณ 1.8% แต่กระบวนการผลิตในบทที่ 3 นี้มี accuracy ประมาณ 14% และ precision ประมาณ 9.4%

ในการศึกษาครั้งนี้ เราได้พยายามจะออกแบบลักษณะของขดลวดขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มขนาดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งน่าจะส่งผลให้มีระยะกระดกมากขึ้นด้วย เช่น การทำเป็นรูปกันหอยแล้วใช้ wire bonding ต่อสายไฟจากปลายด้านในขดลวดออกมายังด้านนอกเพื่อนำไปเชื่อมต่อกับ power supply ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข แต่เราพบว่าถึงแม้จะผลิตแอดชัวเอเตอร์ที่มีขดลวดลักษณะนี้ได้แล้ว แต่เมื่อนำไปทดลองขับเคลื่อนแอดชัวเอเตอร์จริง ขดลวด wire bonding เหล่านั้นขาดหมดเนื่องจากเปราะบางเกินไป ทำให้ไม่สามารถทดลองต่อไปได้

3.2 การทดลองศึกษาผลของพารามิเตอร์แฟลป

หลังจากสร้างชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาทดสอบการตอบสนอง static และ dynamic response โดยนำแอดชัวเอเตอร์ประกอบกับชุดทดลองซึ่งมีส่วนประกอบคล้ายกับการทดลองในบทที่ 2 แต่ในการทดลองนี้ใช้การจับยึดแฟลปด้วยการหนีบ (clamping) ด้วยแผ่นอะคลิลิกใสและเพื่อให้การยึดมีความมั่นคงมากขึ้นจึงแทรกแผ่นยางระหว่างแผ่นอะคลิลิกทั้งสองด้วยเพื่อให้แน่ใจว่าแฟลปจะถูกหนีบอย่างสม่ำเสมอ และขนาดแท่งแม่เหล็กที่ใช้ในทุกการทดลองของทุก ๆ ขนาดแฟลปเท่ากับ 6 มม. โดยทุกการทดลองมีระยะห่างระหว่างกึ่งกลางขดลวดของแฟลปและกึ่งกลางของแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 3.5 มม. ซึ่งมากกว่าการทดลองในบทที่ 2 ประมาณ 3 เท่า สำหรับขนาดของแฟลปที่ใช้ทดสอบมีดังนี้ กว้างxยาว เท่ากับ 4x6, 4x7, 4x8, 3x8, และ 5x8 มม.xmม. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนความยาวและความกว้างแยกจากกันได้

3.2.1 การทดลอง static response

เทคนิคการวัดที่ใช้ในการทดลองนี้เหมือนกับการทดลองในบทที่ 2 แต่ใช้เลนส์และกล้องไม่เหมือนกัน ทำให้มีความคลาดเคลื่อนของการวัดของการทดลองนี้มากกว่าและมีค่าเท่ากับ $\pm 50\mu\text{m}$ และจะทำการทดลองแต่ละกรณี 3 ครั้งและหาค่าเฉลี่ย รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของภาพถ่ายจากการทดลองเมื่อทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้า DC ขึ้น โดยการสังเกตเราจะพบว่าแฟลปทั้งอันจะเอียงขึ้นเกือบเป็นเส้นตรงเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาระยะกระดกแบบ peak-to-peak หมายถึงระยะกระดกที่เป็นผลรวมระหว่างระยะกระดกเข้าหาและระยะกระดกที่ห่างออกจากแท่งแม่เหล็กเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม พบว่ามีผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งสำหรับทุกขนาดของแฟลปจะมีระยะกระดกเพิ่มมากขึ้นเกือบจะเป็นเส้นตรงเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ป้อนมากขึ้น โดยแฟลปแอดชัวเอเตอร์ที่

มีระยะกระดกสูงที่สุดในการทดลองคือ แพลบขนาด 4x8 ม.ม.xm.ม. ที่มีระยะกระดกประมาณ 230 μm ที่กระแสไฟฟ้า 1.78 A

เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของการเปลี่ยนความยาวแพลบ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกและความยาวแพลบที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 พบว่า ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าใด ๆ เมื่อแพลบมีความยาวเพิ่มขึ้นจะมีระยะกระดกสูงขึ้นโดยความยาวแพลบเพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 ม.ม. ระยะกระดกจะเพิ่มมากขึ้นกว่า 2 เท่า

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงความกว้างซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5 จะมีผลในลักษณะที่แตกต่างไปคือ ผลของความกว้างจะไม่สูงเท่ากับผลของเปลี่ยนความยาว และเมื่อเพิ่มความกว้างจาก 3 ม.ม. เป็น 4 ม.ม. จะยังมีแนวโน้มของระยะกระดกสูงขึ้นแต่เมื่อความกว้างเพิ่มมากขึ้นไปอีก ระยะกระดกจะลดลงเล็กน้อย นั่นแสดงให้เห็นว่าผลของความกว้างจะสอดคล้องกับโมเดลคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 ซึ่งกล่าวได้ว่า ผลของความกว้างจะปรากฏในสองลักษณะต่อระยะกระดก คือเมื่อเพิ่มความกว้างจะทำให้พื้นที่ใหญ่ขึ้นและขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้น ในทางกลับกันค่า moment of inertia ของแพลบก็จะมากขึ้นด้วย และผลของแรงและ moment of inertia ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อระยะกระดกในลักษณะที่ตรงกันข้ามกัน

3.2.2 การทดลอง dynamic response

สำหรับการทดลองส่วนนี้ใช้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับขนาด ± 0.05 A ในลักษณะสัญญาณคลื่นไซน์ เพื่อให้สามารถวัดระยะกระดกทั้งหมดได้ภายใต้ range ที่จำกัดของเครื่องมือวัด และจะทำการทดลอง 3 ครั้งสำหรับแอมพลิจูดแต่ละขนาด โดยการทำการทดลองหา resonant frequency จะใช้ช่วงห่างของความถี่ 10 Hz ดังนั้นขนาดของความไม่แน่นอนของความถี่เรโซแนนซ์ในการวัดเท่ากับ ± 10 Hz โดยชุดทดลองแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.7 ก-ข เป็นการแสดงผลเฉลี่ยสำหรับแพลบขนาด 3x8 และ 4x8 ม.ม.xm.ม. โดยแกนนอนแสดงความถี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแอมพลิจูดแต่ละขนาด และแกนตั้งแสดงระยะกระดกสูงสุดเฉลี่ยในพื้นที่ที่เซนเซอร์ครอบคลุมซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซนเซอร์เท่ากับ 3 ม.ม. โดยเส้นที่มีจุดทึบแสดงระยะกระดกเมื่อสแกนความถี่จากความถี่ต่ำขึ้นไปถึงความถี่สูง ในขณะที่เส้นที่มีจุดโปร่งแสดงระยะกระดกเมื่อสแกนความถี่จากความถี่สูงลงมาสู่ความถี่ต่ำ ซึ่งพบว่าสำหรับกรณีแพลบขนาด 3x8 ม.ม.xm.ม. เมื่อเพิ่มความถี่ในการขับเคลื่อนสูงขึ้นระยะกระดกจะสูงขึ้น และจะสูงที่สุดที่ความถี่หนึ่งแต่เมื่อเพิ่มความถี่ในการขับเคลื่อนสูงขึ้นไปกว่าความถี่นั้น ระยะกระดกก็ลดลงทันที โดยความถี่ที่มีระยะกระดกสูงสุดนี้คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของแพลบ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 210 Hz และมีระยะกระดกสูงสุดประมาณ 250 μm หรือคิดเป็นประมาณ 5 เท่าของระยะกระดกที่ความถี่ต่ำ นอกจากนั้นยังพบอีกว่าระยะกระดกที่ความถี่เรโซแนนซ์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการขับเคลื่อนโดยการสแกนขึ้นและลงไม่เท่ากัน และเมื่อสแกนลงจะมีระยะกระดกสูงสุดต่ำกว่าประมาณ 10% แต่ขนาดความถี่เรโซแนนซ์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสแกนความถี่ของสัญญาณขับเคลื่อนขึ้นหรือลง ในทางตรงกันข้าม สำหรับกรณีแพลบขนาด 4x8 ม.ม.xm.ม. จะไม่พบว่าขนาดของระยะกระดกแตกต่างกันระหว่างการสแกนความถี่ขึ้นและลง และขนาดของความถี่เรโซแนนซ์มีค่าประมาณ 210 Hz ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีแพลบขนาด 3x8 ม.ม.xm.ม.

สำหรับแฟลชขนาดอื่น ๆ ก็มีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระดกกับความถี่ของสัญญาณที่ใช้ขับเคลื่อนที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นเราจะนำผลการทดลองของแต่ละกรณีมาสรุปผลของความกว้างและความยาวของแฟลชต่อความถี่เรโซแนนซ์และระยะกระดกสูงสุดได้ดังต่อไปนี้ เมื่อพิจารณาผลของความกว้างแฟลชต่อความถี่เรโซแนนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.8

จากผลการทดลอง พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลชไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนักโดยมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วง 210-240 Hz เมื่อความกว้างเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 มม. ในขณะที่ผลของความยาวของแฟลชแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 3.9 พบว่าความถี่ลดลงอย่างมากจาก 400 มาเป็น 200Hz เมื่อความยาวเพิ่มจาก 6 เป็น 8 มม. ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในช่วงของขนาดที่ใช้ในการทดลองนี้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวจะส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลชมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้าง และพบว่าสำหรับแฟลชที่มีความกว้างคงที่ ยิ่งแฟลชยาวขึ้นความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง ในขณะที่แฟลชที่มีความยาวคงที่แล้ว เมื่อเพิ่มความกว้างของแฟลชขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เพิ่มมากขึ้น

ในส่วนถัดมาเป็นการวิเคราะห์เรื่องระยะกระดกสูงสุด ซึ่งนิยามว่าเป็นระยะจากตำแหน่งแฟลชเคลื่อนตัวลงไปต่ำสุดจนถึงสูงที่สุดเมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้า สำหรับแอสซิมเมตริกที่มีขนาดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 โดยผลการทดลองมีค่าความแปรปรวนจากการทดลองทั้ง 3 ครั้งไม่เกิน $\pm 10 \mu\text{m}$

ตารางที่ 3.1 ระยะกระดกตัวที่ความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลชขนาดต่าง ๆ

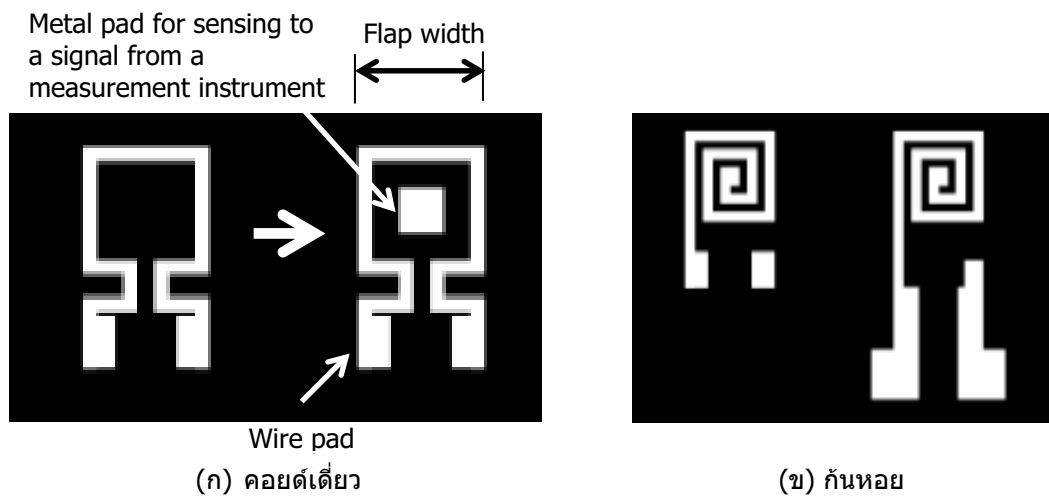
Size (mm ²)	Max deflection (μm)	Min deflection (μm)	P-P deflection (μm)
3x8	190	-250	440
4x8	100	-200	300
5x8	150	-170	320
4x6	160	-190	350
4x7	130	-200	330

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความกว้างเพิ่มมากขึ้นระยะกระดกสูงสุดจะสั้นลงเล็กน้อย ยกเว้นกรณีแฟลชขนาด 3x8 มม. และสำหรับผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวแฟลชจะพบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงความกว้าง คือเมื่อแฟลชยาวขึ้นระยะกระดกสูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก หรือกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความกว้างและความยาวในช่วงที่ทำการทดลองนี้อาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะกระดกสูงสุดค่อนข้างน้อย

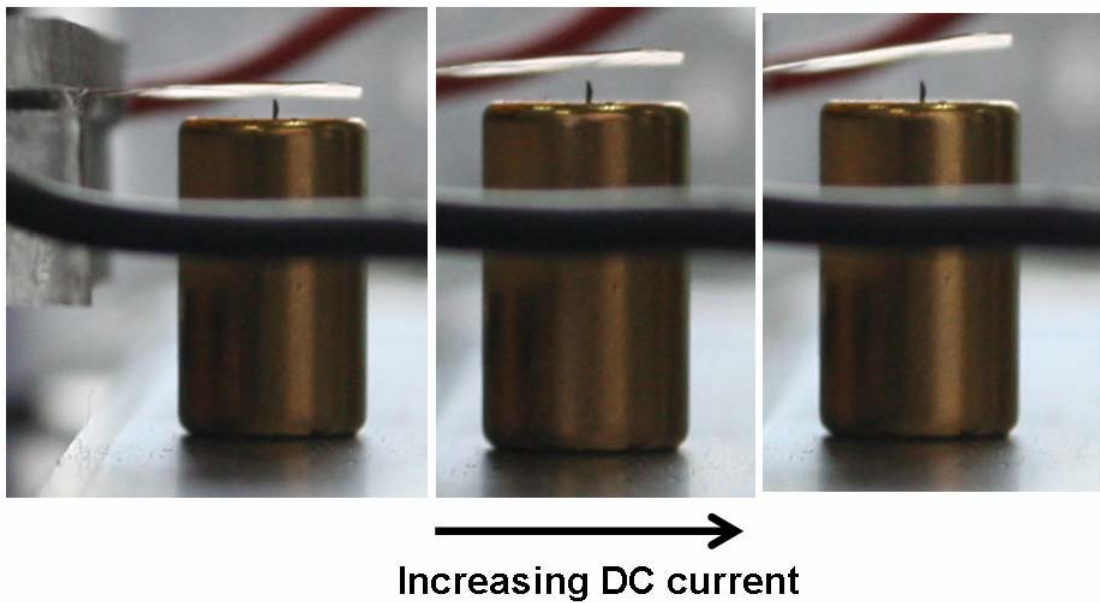
3.3 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อจะลองสร้างแฟลชด้วยวิธีการกัดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย ซึ่งจะทำให้ได้ง่ายด้วยต้นทุนต่ำ และศึกษาผลของความกว้างและความยาวแฟลชในช่วงแอสซิมเมตริกประมาณ 3-8 มม. ต่อการตอบสนอง static และ dynamic response โดยในการศึกษา static response เราจะพิจารณาระยะกระดกของปลายแฟลชเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษา dynamic

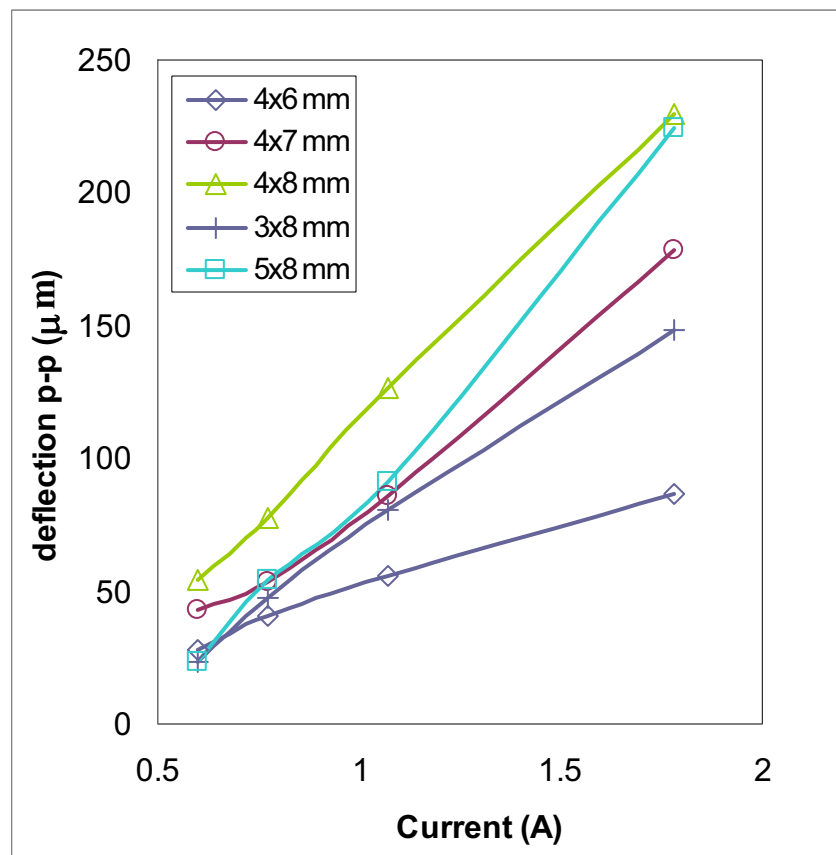
response จะพิจารณาขนาดของความถี่เรโซแนนซ์และระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้น โดยทำการสร้างแอคชูเอเตอร์ขึ้นมาทั้งหมด 5 ขนาด มีความกว้างและความยาว ดังนี้ 4x6, 4x7, 4x8, 3x8, และ 5x8 มม. และนำมาประกอบกับแท่งแม่เหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. โดยมีกระบวนการสร้างเริ่มจากการเคลือบโพดิริซิสแบบแผ่นแห้งบนแผ่นโพลีอีไมด์-ทองแดง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำการฉายแสงจากหลอด 10W/T20/Blacklight blue เป็นเวลา 30 นาทีที่ระยะห่างจากหลอดประเภททรงกระบอก 5 ซม. หลังจากนั้นจึงทำการ develop ด้วย Na_2CO_3 of 2 g/200cc H_2O เป็นเวลา 9 นาที และกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งด้วยสารละลาย FeCl_2 เป็นเวลา 37 นาที และเราพบว่าด้วยกระบวนการที่กล่าวมา มีความคลาดเคลื่อนของขนาดความกว้างจากที่ออกแบบไว้ประมาณ 14% และความไม่สม่ำเสมอของขนาดความกว้างประมาณ 9.4% เมื่อนำเอาแอคชูเอเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทดสอบ พบว่า สำหรับการตอบสนอง static response ในกรณีความกว้างคงที่ค่าหนึ่ง การเพิ่มความยาวแฟลปจะทำให้ระยะกระดกสูงขึ้นค่อนข้างมาก แต่สำหรับความยาวคงที่แล้ว ระยะกระดกจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและระยะสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ความกว้างที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพราะการเพิ่มความกว้างจะส่งผลในสองลักษณะต่อระยะกระดกดังนี้ การเพิ่มความกว้างจะทำให้มีแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำต่อแฟลปสูงขึ้น และมีผลทำให้ระยะกระดกสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความกว้างจะทำให้ขนาด moment of inertia ของแฟลปสูงขึ้นและส่งผลทำให้ระยะกระดกลดลง ในการทดสอบ dynamic response พบว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวแฟลปจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลปมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของแฟลป โดยแฟลปที่มีขนาดใหญ่ขึ้นความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง แต่การเปลี่ยนแปลงขนาดนี้จะส่งผลต่อระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์น้อยมาก



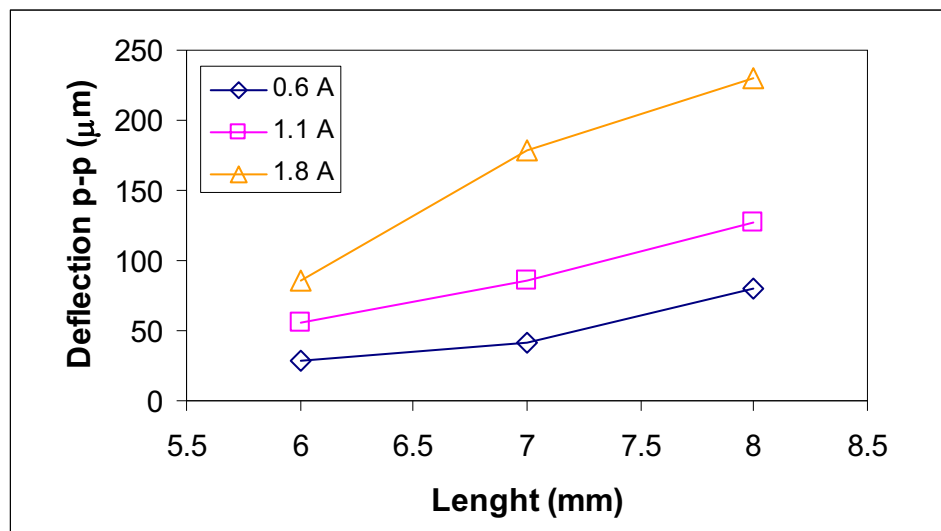
รูปที่ 3.1ก-ข รูปร่างของขดลวดโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยมีแผ่นโลหะสีเหลืองขนาดใหญ่ตรงกลางเป็นส่วนที่ตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ



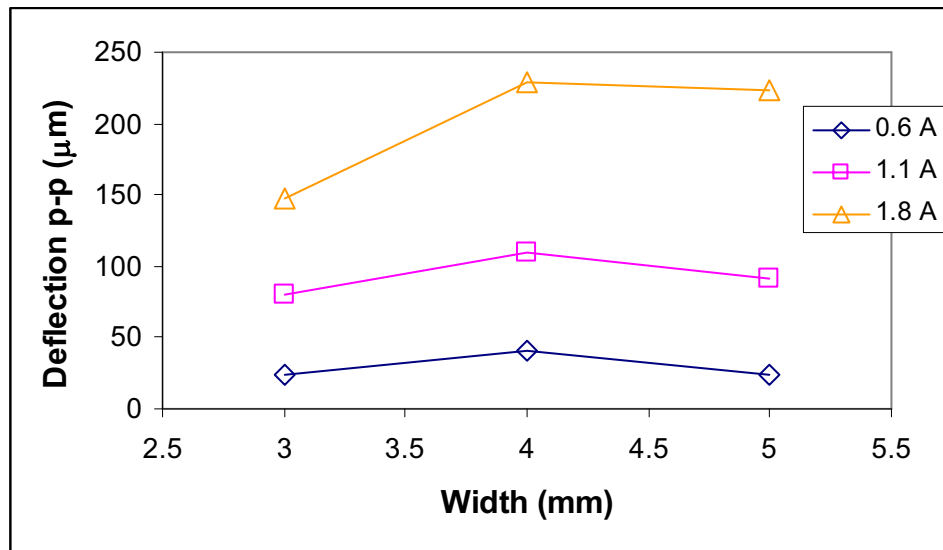
รูปที่ 3.2 ลำดับของการกระดกตัวของแฟลลเมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าขึ้น



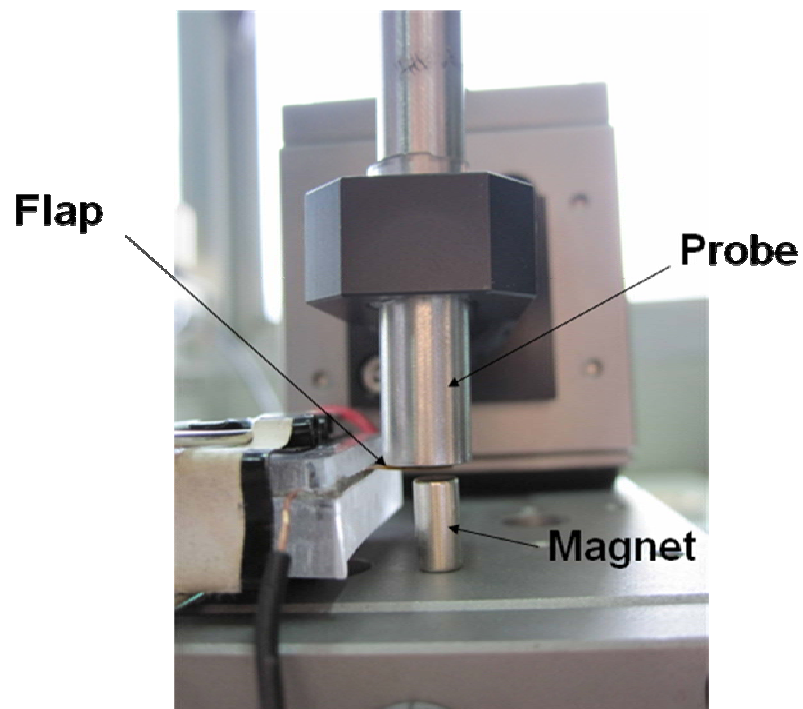
รูปที่ 3.3 ระยะกระดก peak-to-peak ของปลายแฟลบบเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้น สำหรับแฟลบขนาดต่าง ๆ



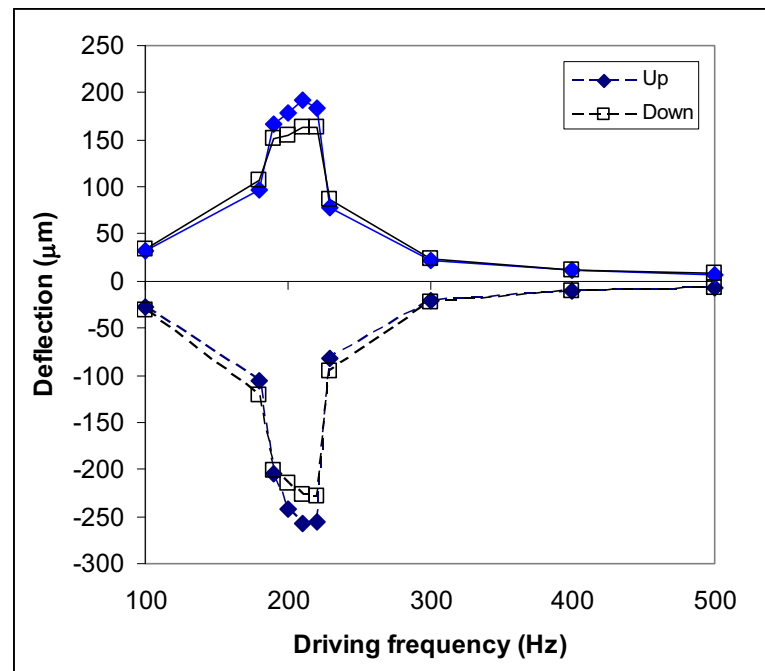
รูปที่ 3.4 ระยะกระดก peak-to-peak สำหรับความยาวแฟลบต่าง ๆ ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.6, 1.1, และ 1.8 แอมแปร์



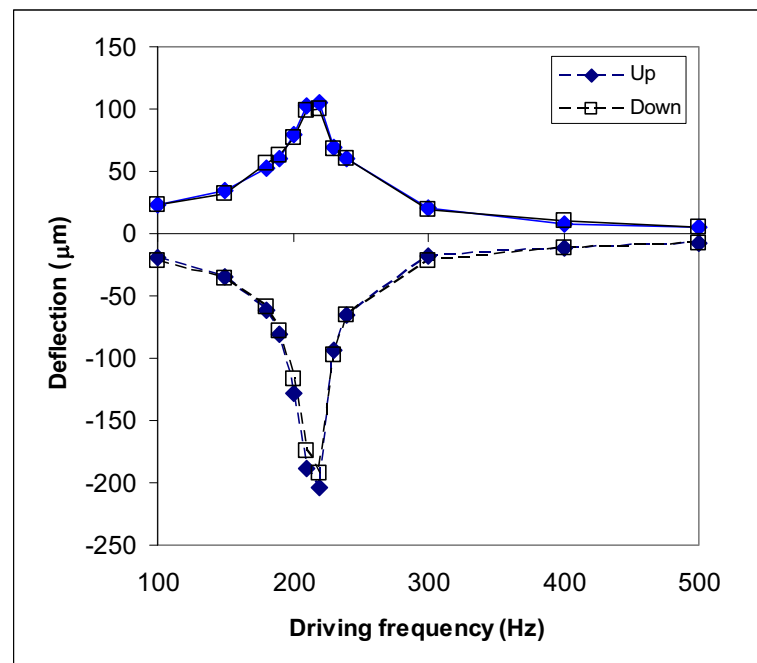
รูปที่ 3.5 ระยะกระดก peak-to-peak สำหรับความกว้างแฟลบต่าง ๆ ที่ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.6, 1.1, และ 1.8 แอมแปร์



รูปที่ 3.6 การติดตั้ง capacitance probe เพื่อวัด dynamic response ของแฟลบ

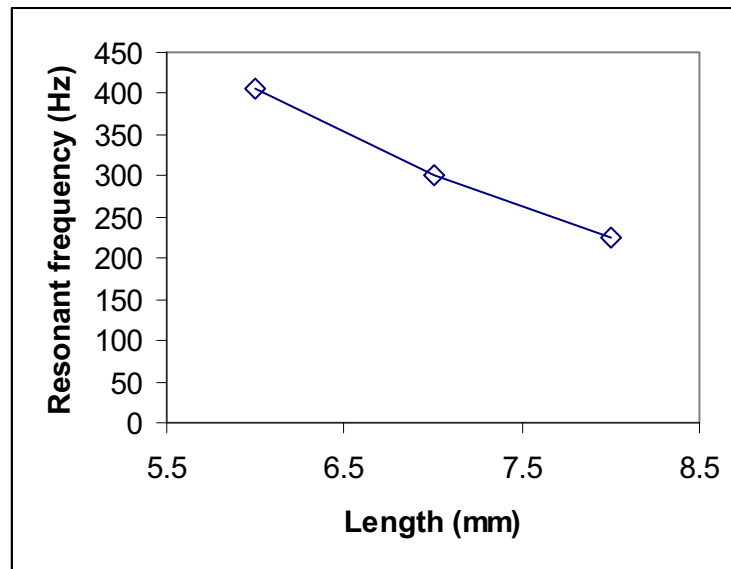


(ก) แพลต 3x8 มม.

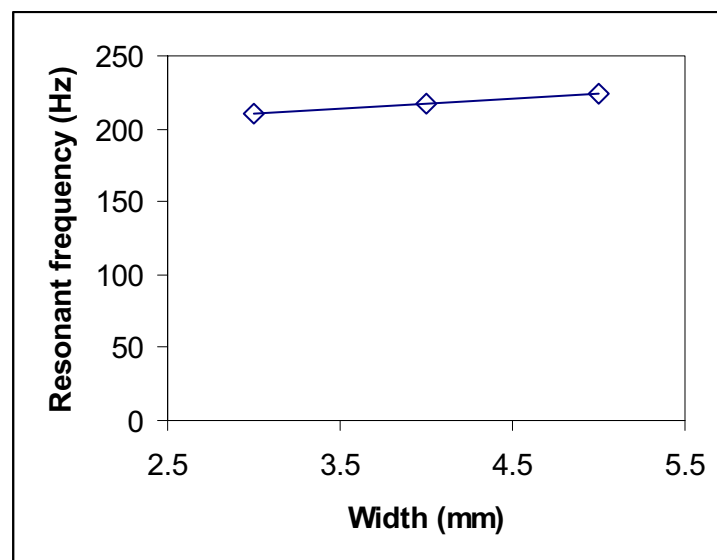


(ข) แพลต 4x8 มม.

รูปที่ 3.7 ก-ข ระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่ของการขับเคลื่อนต่าง ๆ โดยระยะเป็นบวกหมายถึงระยะกระดกในทิศทางออกจากแท่งแม่เหล็ก และระยะเป็นลบหมายถึงระยะกระดกเข้าหาแท่งแม่เหล็ก



รูปที่ 3.8 ขนาด Resonant frequency สำหรับขนาดความยาวแฟลปต่าง ๆ



รูปที่ 3.9 ขนาด Resonant frequency สำหรับขนาดความกว้างแฟลปต่าง ๆ

บทที่ 4

ไมโครแอดซิวเอเตอร์แบบไดอะแฟรม

การศึกษาในส่วนนี้สืบเนื่องมาจากผลการศึกษาของบทที่ 2 ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าความเร็วของเจ็ตที่เกิดจากอุปกรณ์ซินเทติกส์เจ็ตที่พัฒนาขึ้นมาด้วยแฟลบบแอคซิวเอเตอร์ มีความเร็วเจ็ตไม่สูงมากนัก ประมาณ 0.8 เมตรต่อวินาทีที่ระยะ 2 มม. จากปากกรูออริฟิซของอุปกรณ์ และเมื่อทำการศึกษถึงผลของความกว้างและยาวของแฟลบบในบทที่ 3 ด้วยแล้วพบว่า ระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ก็จะได้แตกต่างกันนักสำหรับขนาดของแฟลบบในออเดอ์ใกล้เคียงกันนี้ ดังนั้นหากยังไม่ไปแก้ไขปัญหาเรื่องการรั่วไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างขอบแฟลบบและผนังครีดีแล้ว ไม่ว่าจะใช้แฟลบบแอคซิวเอเตอร์ขนาดใด ๆ ในออเดอ์ใกล้เคียงกันนี้แล้ว ก็น่าจะทำให้เกิดเจ็ตที่มีความเร็วใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามปัญหาการลดช่องว่างดังกล่าวจะต้องใช้เทคโนโลยีการประกอบชิ้นสูงมาก จึงอาจจะไม่ใช่วิธีง่ายนักในการดำเนินการแก้ไขปัญหานี้ ดังนั้นอีกวิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มความเร็วของเจ็ตได้คือ การเปลี่ยนจากแฟลบบมาเป็นไดอะแฟรมแอคซิวเอเตอร์ โดยยังยึดหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าไว้เนื่องจากมีขนาดของแรงมาก และความทนทานสูง โดยไดอะแฟรมของแอคซิวเอเตอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.1

สำหรับวัสดุที่จะใช้สร้างเมมเบรนมีได้หลายประเภท ได้แก่ โพลีอีไมด์, PDMS, parylene, ยางซิลิโคน หรือแผ่นโลหะ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาว่าไดอะแฟรมควรจะทำจากวัสดุที่มีค่า Young's Modulus ต่ำเพื่อจะมีระยะยืดและระยะกระดกมากแล้ว ทำให้ PDMS เป็นวัสดุที่น่าจะเหมาะสมประกอบกับเป็นวัสดุที่มีการใช้งานมากอยู่แล้วใน micro fabrication และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย สำหรับรูปร่างขดลวดก็มีความสำคัญมากต่อผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปมี 2 รูปร่างคือ เป็นแบบขดลวดเดี่ยวคล้ายกับการศึกษาในบทที่ 2 และ 3 หรือเป็นแบบกันหอยเพื่อเพิ่มขนาดของแรงกระทำ แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดเกี่ยวกับความเปราะบางของลวด wire bonding และความซับซ้อนของการสร้างขดลวด 2 ชั้น (ประกอบด้านบนและด้านล่างของฟิล์ม PDMS) ทำให้เราเลือกการสร้างขดลวดแบบขดเดี่ยวในขั้นต้นนี้ และเลือกทองแดงเป็นวัสดุเนื่องจากความง่ายในการขึ้นรูปและเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนั้น เรายังต้องคำนึงเกี่ยวกับการฝังขดลวดลงบนฟิล์ม PDMS แทนการวางไว้ด้านบนเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดแน่นไม่เช่นนั้นขดลวดอาจจะลอกออกจากฟิล์มบางได้ง่าย

สำหรับการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม FEM แล้วจึงทำการทดลองสร้างขึ้นจริง ในส่วนของพารามิเตอร์ที่จะพิจารณาได้แก่ รัศมีของไดอะแฟรม ความหนาและความกว้างของขดลวด และรัศมีของขดลวดทองแดง นอกจากจะคำนึงถึงระยะโก่งตัวของไดอะแฟรมเป็นหลักแล้วจะนำข้อจำกัดต่าง ๆ ในกระบวนการสร้างมาร่วมพิจารณาด้วย

4.1 พารามิเตอร์ของไดอะแฟรมแอคซิวเอเตอร์

รูปที่ 4.2ก-ข แสดงภาพของโมเดลที่เราใช้ในการวิเคราะห์ FEM โดยเราจะสมมติให้ขดลวดทองแดงวงกลมที่มีส่วนยื่นออกมาด้านนอกของไดอะแฟรมเพื่อต่อกับ power supply ด้านนอก (ดังที่

แสดงไว้ในรูปที่ 4.1) เป็นลักษณะของขดลวดวงกลม ที่ไม่มีส่วนยื่นออกมาด้านนอก เพื่อความสะดวกในการคำนวณ และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของโมเดลขดลวดทองแดงวงกลมแล้ว เราจะเห็นว่าเป็นโครงสร้างสำหรับการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในเบื้องต้นนี้ ทำได้ง่ายและรวดเร็วด้วยโมเดล 2 มิติ ในรูปแบบที่ทุกส่วนของไดอะแฟรมมีความสมมาตรตามแกนกึ่งกลาง ซึ่งด้วยเงื่อนไขดังกล่าวโมเดลนี้ก็สามารถพิจารณาเพียงครึ่งเดียวของภาพตัดขวางได้ แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาในรูปแบบนี้ก็จะทำให้ค่าระยะโก่งตัวของโก่งตัวที่คำนวณได้เป็นค่าที่สูงกว่าระยะโก่งตัวที่จะเกิดขึ้นจริง

สำหรับ boundary condition ในการศึกษาี้ เรากำหนดให้ปลายด้านหนึ่งยึดกับผนังและปล่อยให้ปลายอีกด้านหนึ่งขยับอิสระโดยต้องสมมาตรกับอีกด้านหนึ่งที่เราไม่ได้นำมาพิจารณา และในส่วน of stress ที่กระทำบนขดลวดทองแดง สามารถคำนวณได้จากการนำขนาดของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าหารด้วยพื้นที่ของขดลวด โดยขนาดของแรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้ ขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.5 A ขนาด magnetic flux density ของแท่งแม่เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. เท่ากับ 3,500 Gauss ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 7 มม. และแผ่นฟิล์มหนาเท่ากับ 120 μm และมีระยะห่างของไดอะแฟรมจากแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 1 มม. สำหรับความหนาของขดลวดทองแดงเท่ากับ 50 μm ในการคำนวณนี้ เราต้องการพิจารณาผลของความกว้างของขดลวดและรัศมีของขดลวดจากจุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม ซึ่งผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.3

จากผลการคำนวณ เราพบว่าสำหรับทุก ๆ ความกว้างของขดลวดจะมีรัศมีหนึ่งที่ทำให้เกิดระยะโก่งตัวสูงที่สุด โดยในการคำนวณด้วยเงื่อนไขดังกล่าวไว้แล้ว พบว่า ยิ่งความกว้างของขดลวดยิ่งแคบลงจะทำให้มีระยะโก่งตัวสูงขึ้น และด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาี้ ระยะโก่งตัวจะมีค่าสูงที่สุดประมาณ 120 μm เมื่อความกว้างเท่ากับ 200 μm

นอกจากนั้นยังพบอีกว่ารัศมีที่ทำให้ระยะโก่งตัวสูงที่สุดสำหรับทุก ๆ ขนาดความกว้างของขดลวดควรมีค่าประมาณ 1 มม. โดยเมื่อเพิ่มรัศมีของขดลวดทองแดงในช่วงที่สั้นกว่า 1 มม. จะทำให้ระยะโก่งตัวมากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้ารัศมีถูกเพิ่มให้มีขนาดใหญ่กว่า 1 มม. จะทำให้ระยะโก่งตัวลดลงเรื่อย ๆ และน่าจะเป็นการอธิบายถึงผลของรัศมีของขดลวดทองแดงต่อระยะโก่งตัวใน 2 ลักษณะที่ตรงกันข้ามกัน คือในส่วนที่รัศมีมีขนาดเล็กเกินไปแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจะมีขนาดเล็กและไม่แน่นอนของแรงมีค่าน้อย ส่งผลทำให้ระยะโก่งตัวของไดอะแฟรมมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้ารัศมีมีระยะมากเกินไปถึงแม้ว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีขนาดมากขึ้นแต่ตำแหน่งที่แรงกระทำจะอยู่ใกล้กับขอบยึดมากเกินไปและทำให้โมเมนต์ของแรงกระทำมีขนาดเล็กไม่สูงจึงทำให้ระยะโก่งตัวมีค่าน้อยเช่นกัน

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์อื่น ๆ อีก แต่ไม่ได้นำมาแสดงในรายงานฉบับนี้ เช่น ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนต่อระยะโก่งตัว ซึ่งพบว่าถ้าพารามิเตอร์อื่น ๆ เท่ากันหมดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นจะมีระยะโก่งตัวที่มากขึ้น หรือผลของความหนาของขดลวดทองแดงต่อระยะโก่งตัว ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาในช่วง 10-100 μm จะมีผลต่อระยะโก่งตัวไม่มาก

นัก และศึกษาผลของความหนาของฟิล์ม PDMS ต่อระยะโง่งตัวซึ่งก็พบว่ายิ่งฟิล์มหนาขึ้นระยะโง่งตัวก็จะน้อยลง เป็นต้น

หลังจากพิจารณาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อระยะโง่งตัวด้วยโมเดลแล้ว การเลือกพารามิเตอร์ของแอคชูเอเตอร์ก็ต้องนำข้อจำกัดต่าง ๆ ในการผลิตมาพิจารณาประกอบ เพื่อเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งในเชิงการตอบสนองของแอคชูเอเตอร์และความเหมาะสมในการผลิตด้วย เช่น ฟิล์ม PDMS ที่บางเกินไปจะขาดง่ายและมีความลำบากในการประกอบฟิล์มแอคชูเอเตอร์เข้ากับชิ้นส่วนอื่น ๆ หรือความกว้างของขดลวดทองแดงที่แคบเกินไปก็จะเปราะบางและควบคุมความแม่นยำในการผลิตได้ยาก เป็นต้น

ดังนั้น เมื่อคำนึงถึงหลายปัจจัยประกอบกัน เราจึงตัดสินใจกำหนดพารามิเตอร์บางส่วนของแอคชูเอเตอร์ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 7 มม. และแผ่นฟิล์มหนาประมาณ 100-200 μm ความหนาของขดลวดทองแดงประมาณ 30-100 μm ความกว้างของขดลวดทองแดง 400 μm และจะผลิตแอคชูเอเตอร์ขึ้นจริงด้วยระยะรัศมีของขดลวดทองแดงต่าง ๆ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาผลของรัศมีนี้ต่อระยะโง่งตัวและความถี่เรโซแนนซ์ของฟิล์ม ด้วยการทำการทดลองจริง

4.2 กระบวนการสร้างไดอะแฟรม

ในส่วนนี้ เราจะมาพิจารณาถึงความเหมาะสมของกระบวนการสร้างโดยเริ่มจากการพิจารณาถึงกระบวนการสร้างโครงสร้างแบบฟิล์มบางที่มีการใช้กันอยู่ ซึ่งจะมีข้อจำกัดบางอย่าง และเพื่อจะแก้ไขข้อจำกัดนั้น ในการศึกษาจะนำเสนอวิธีการสร้างที่เป็นรูปแบบใหม่ ซึ่งน่าจะสามารถสร้างได้ง่ายและมีความเหมาะสมกว่าในเชิงการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นวิธีใหม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบและศึกษาถึงพารามิเตอร์ของขั้นตอนต่าง ๆ ในการผลิต

รูปที่ 4.4 แสดงภาพตัดขวางของโครงสร้าง โดยแสดงกระบวนการผลิตโครงสร้างฟิล์มบางแบบที่นิยมใช้กันอยู่ ซึ่งมีขั้นตอนโดยสังเขปดังนี้ เริ่มต้นจากแผ่น substrate ที่เป็นซิลิกอนที่มีฟิล์มบางของออกไซด์ แล้วนำไปเคลือบฟิล์มโลหะบนผิวด้านหนึ่งของแผ่นซิลิกอน แล้วจึงสร้างโมลโดยการแพทเทิร์นโฟโตลิธอกราฟีด้วยกระบวนการ photolithography ในส่วนของโมลนี้จะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของขดลวดทองแดง หลังจากมีโมลแล้วจึงทำการ electroplating ขดลวดทองแดงขึ้นมาจนมีความหนาตามที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงล้างโฟโตลิธอกราฟีทิ้งไป แล้วเท PDMS ลงบนโครงสร้างของขดลวดทองแดง โดยเลือกความหนาของฟิล์ม PDMS ได้จากการวัดปริมาตรของส่วนผสม ในขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการกัดแผ่น substrate ด้านล่างของขดลวดจนทะลุ และทำให้ฟิล์ม PDMS และขดลวดทองแดงลอยอยู่อิสระ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะมี ความลำบากในการดำเนินการกระบวนการสุดท้ายที่ต้องใช้สารเคมีกัดจนทะลุ substrate เพราะยากในการควบคุมและสารเคมีที่ใช้กัดโลหะก็มักจะมีปฏิกิริยาเคมีกับ PDMS ด้วย

ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ในการศึกษาจะนำเสนอวิธีการใหม่ ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 4.5 โดยเริ่มจากการสร้างแพทเทิร์นของโฟโตลิธอกราฟีเพื่อใช้เป็นโมลสำหรับการทำ electroplating ขดลวดทองแดง บน substrate ที่เป็นโลหะ ก่อนลงมือทำ electroplating ให้สร้างฟิล์มบางของออกไซด์ที่ผิวโลหะแล้วจึงเริ่มทำ electroplating โดยฟิล์มบางของออกไซด์จะลดแรงยึด

เหนียวระหว่าง substrate กับขดลวดทองแดง เมื่อมีความหนาของขดลวดตามที่ต้องการแล้วจึงล้างโพโตรีซิสทิ้งไป และเท PDMS ลงบนโครงสร้างดังกล่าว ในขั้นตอนสุดท้ายจึงลอก PDMS ออกและขดลวดทองแดงจะหลุดออกมาพร้อมกับฟิล์ม PDMS หลังจากนั้นนำฟิล์มไปซึ่งบนฐานเจาะรูตรงกลางก็จะมีส่วนของเมมเบรนแอคชูเอเตอร์เกิดขึ้นมา

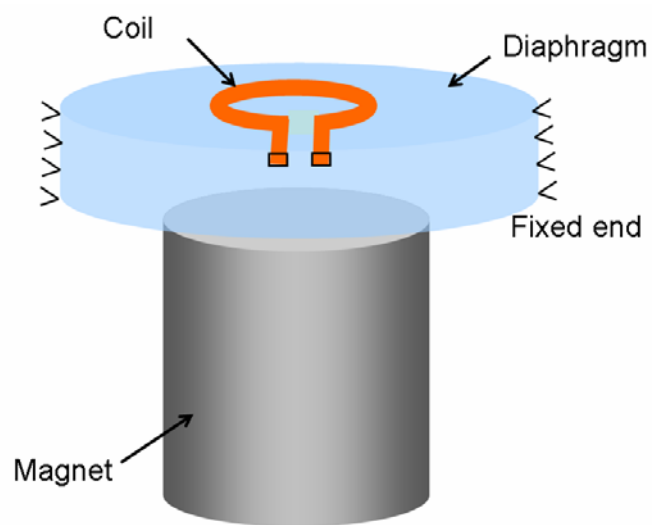
สำหรับขั้นตอนและผลการทดลองในส่วนนี้เป็นดังนี้ ขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่น substrate โดยใช้แผ่นสแตนเลสที่ขัดผิวด้วยกระดาษทรายละเอียด ทำการล้างด้วย acetone และ DI water หลังจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที แล้วทำการเคลือบฟิล์มโพโตรีซิสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและฉายแสงด้วยแผงของหลอด 8W/blacklight blue (แผง 6 หลอด) เป็นเวลา 20 วินาทีและ develop ด้วยสารละลาย Na_2CO_3 (conc. 2 g/200-cc H_2O or 0.094mol/l) ประมาณ 3-4 นาทีพร้อมกับล้างด้วย DI water อย่างสม่ำเสมอทุก ๆ 1 นาที และฟิล์มโพโตรีซิสที่ได้จะมีความหนาประมาณ 50 μm

เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะของโพโตรีซิสบนแผ่นสแตนเลส หลังจากนั้นจะนำแผ่นสแตนเลสไปแช่สารละลาย Potassium dichromate เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อสร้างฟิล์มบางของโครเมียมออกไซด์ที่จะลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นสแตนเลสและทองแดงซึ่งจะทำการ electroplating ในภายหลัง หลังจากนั้นจึงนำแผ่นสแตนเลสไปทำการ electroplating ในสารละลาย Copper sulfate โดยจากการทดลองเบื้องต้น เราพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า 0.4 A (เพิ่มเป็นสเตปจาก 0.1 A ทีละ 0.1A/30 min) และทำการรักษาระดับกระแสไฟฟ้าให้คงที่เป็นเวลา 3 ชม. ไปยังแผ่นสแตนเลสที่มีพื้นผิวที่ไม่ได้ปิดด้วยโพโตรีซิส ประมาณ 130 ตร.ซ.ม. (รวมผิวด้านหลังประมาณ 100 ตร.ซ.ม. แล้ว) จะได้ความหนาของทองแดงประมาณ 25 μm

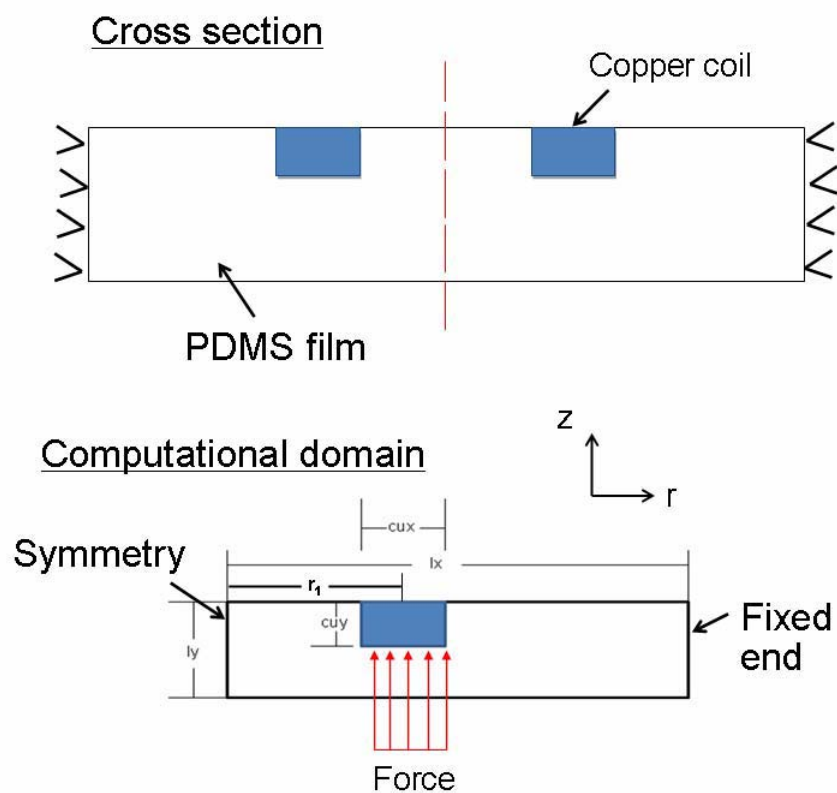
อย่างไรก็ตามการสร้างฟิล์มแอคชูเอเตอร์ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ และสำหรับการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในส่วนนี้กำลังอยู่ระหว่างการดำเนินการ ซึ่งจะต้องตอบคำถาม 3 ข้อให้ได้ คือ อัตราของการทำ electroplating ที่กระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ ต่าง ๆ เท่ากับเท่าไรและมีผลต่อความแม่นยำในการสร้างหรือไม่ และคำถามสุดท้ายคือความหนาของขดลวดทองแดงจะต้องเท่ากับเท่าไรจึงจะลอกออกมาพร้อมกับฟิล์ม PDMS ได้

4.3 สรุปผลการศึกษา

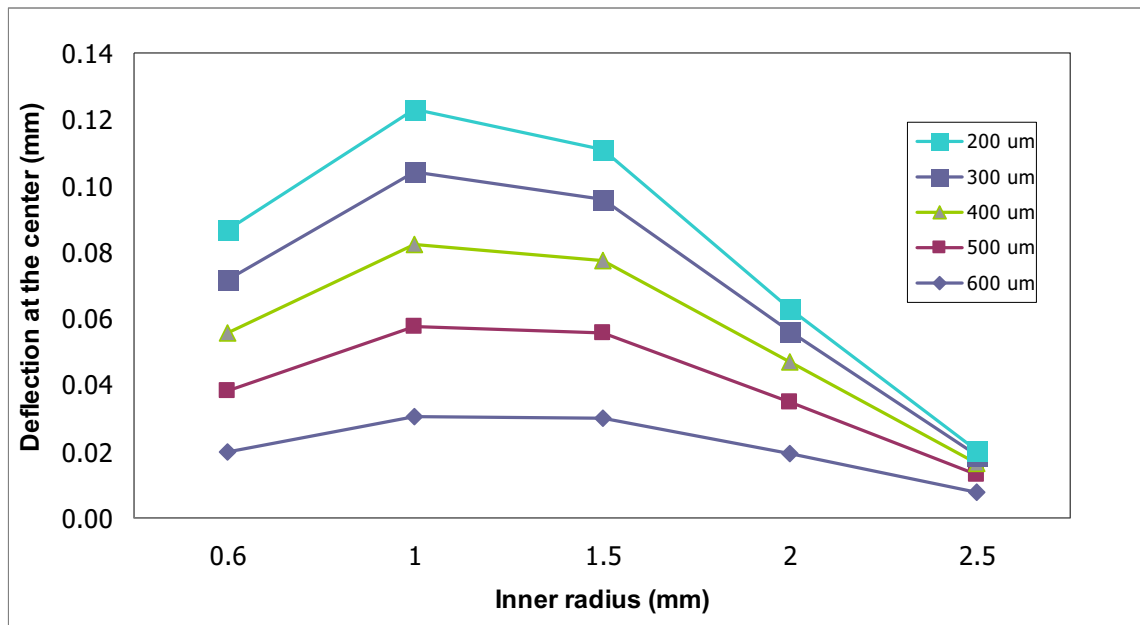
วัตถุประสงค์ของงานในส่วนนี้คือ การออกแบบเบื้องต้นและการสร้างไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการออกแบบมีเป้าหมายหลักคือ ไดอะแฟรมที่มีระยะโก่งตัวสูงและในการใช้โปรแกรม FEM คำนวณและวิเคราะห์ผล เราสรุปได้ว่า สำหรับไดอะแฟรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 ม.ม.และหนาประมาณ 120 μm ขดลวดในขนาดความกว้างในออดอร์ 100 μm และหนา 50 μm นี้ควรมีวงรัศมีของขดลวดทองแดงควรมีค่าประมาณ 1 ม.ม. จึงจะมีระยะโก่งตัวสูงที่สุด สำหรับการสร้างตัวต้นแบบของแอคชูเอเตอร์ได้ดำเนินการไปบางส่วนแล้ว โดยใช้หลักการสร้างที่จะสามารถลอกไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ออกจาก substrate ได้ ในขณะนี้อยู่ระหว่างการดำเนินงานซึ่งได้ทดสอบและสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างบางส่วนได้แล้ว



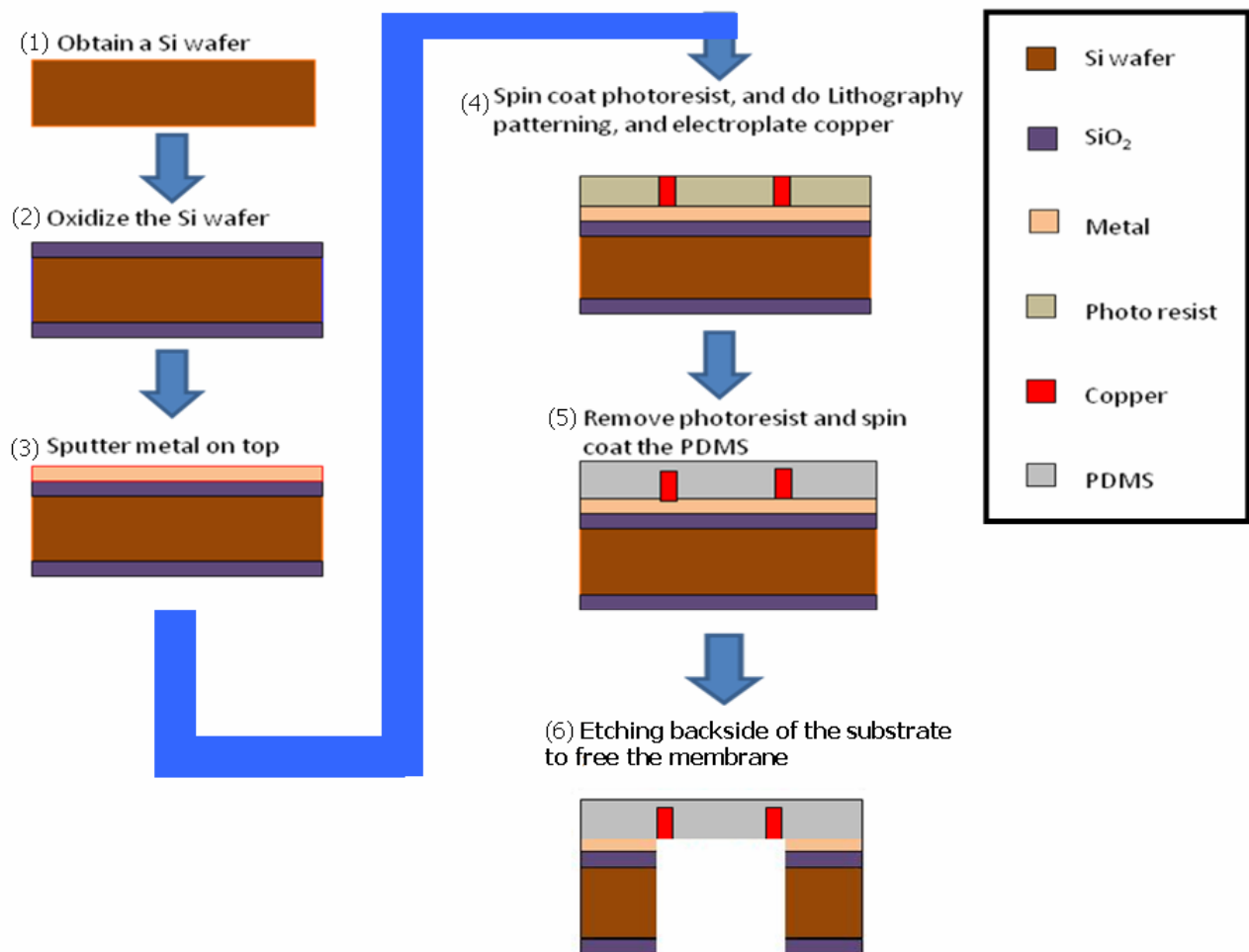
รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ที่จะพัฒนาขึ้น โดยมี 3 ส่วนประกอบหลักคือ ฟิล์มเมมเบรน ขดลวดทองแดง แท่งแม่เหล็ก



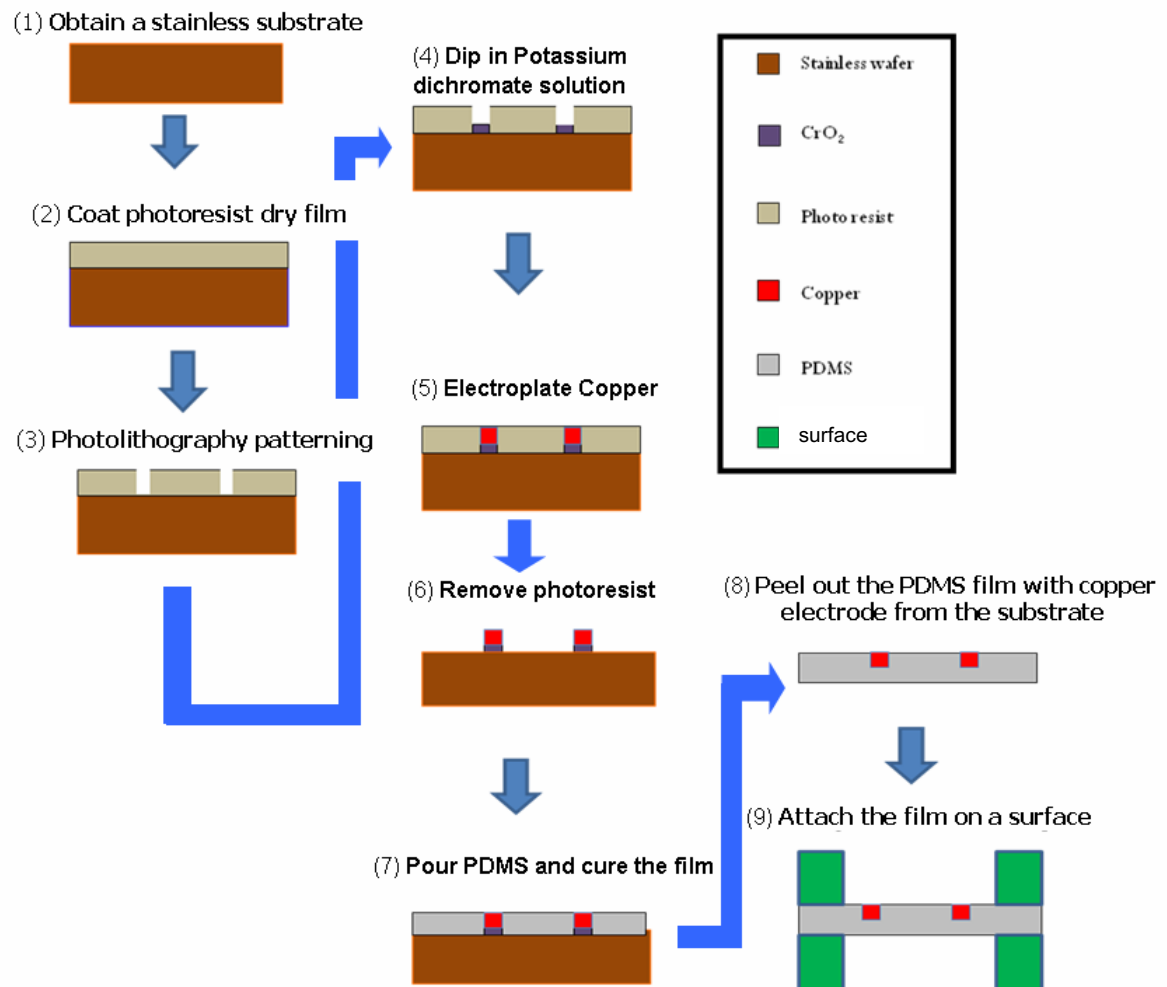
รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของเมมเบรน; (บน) ไดอะแกรมแสดงฟิล์ม PDMS และขดลวดทองแดง มีขอบยึดกับฐานโดยรอบ, (ล่าง) โดเมน 2D และเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.3 ระยะโคงตัวที่ตำแหน่งตรงกลางเมมเบรน สำหรับความกว้างของขดลวดทองแดง
รัศมีด้านในของขดลวดต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนของกระบวนการสร้างโครงสร้างฟิล์มบางแบบทั่วไป โดยมี 6 ขั้นตอนหลัก; (1) ทำความสะอาด Si wafer, (2) สร้างฟิล์มของออกไซด์, (3) เคลือบด้วยฟิล์มโลหะบาง, (4) เคลือบโฟโตเรซิส, แพทเทิร์นรูปร่างของขดลวด และ electroplate โลหะที่ใช้ทำขดลวดจนได้ความหนาที่ต้องการ, (5) ล้างโฟโตเรซิสและทำความสะอาด หลังจากนั้นเท PDMS และอบที่อุณหภูมิสูง, (6) กัด Si wafer จากด้านล่างจนถึงฟิล์ม PDMS



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนของกระบวนการสร้างโครงสร้างฟิล์มบางแบบที่นำเสนอในการศึกษานี้ มี 9 ขั้นตอนหลักดังนี้; (1) ทำความสะอาดแผ่นสแตนเลส, (2) เคลือบฟิล์มโฟโตรีซิสแบบแห้ง, (3) แพทเทิร์นรูปร่างของขดลวด, (4) จุ่มในสารละลาย Potassium dichromate เพื่อสร้างฟิล์มบางของออกไซด์, (5) ทำ electroplate โลหะที่ใช้ทำขดลวดจนได้ความหนาที่ต้องการ, (6) ล้างโฟโตรีซิสและทำความสะอาด, (7) เท PDMS และอบที่อุณหภูมิสูง, (8) ลอกฟิล์ม PDMS พร้อมกับขดลวดทองแดงออกจากแผ่นสแตนเลส, (9) นำฟิล์มไปยึดบนพื้นผิวใด ๆ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาโดยรวม

ในการศึกษานี้ ได้ทำการออกแบบไมโครแอดชัวเอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนและทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ดที่ขับเคลื่อนด้วยไมโครแอดชัวเอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบแฟลปและแบบไดอะแฟรม เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงและหาแนวทางในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต การดำเนินงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แฟลปแอดชัวเอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ด สำหรับที่สองเป็นการศึกษาผลของพารามิเตอร์ของแฟลปต่อการตอบสนอง ทั้ง static และ dynamic response และส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาหาแนวทางในการสร้างแอดชัวเอเตอร์แบบไดอะแฟรมเพื่อใช้แทนที่แฟลปแอดชัวเอเตอร์

ในการศึกษาส่วนแรก อุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ดได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการใช้ไมโครแฟลปแอดชัวเอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แฟลปแอดชัวเอเตอร์ที่สร้างด้วยเทคนิคการสร้างระดับไมโครสเกลประกอบด้วยฐานแฟลปทำจากโพลีอีไมด์และมีขดลวดทองแดงกว้าง $280\text{ }\mu\text{m}$ อยู่ด้านบน และทำการศึกษาการตอบสนองทั้ง static และ dynamic response จากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าตรงขนาด 1 A แฟลปที่มีความกว้างและยาว 3 และ 6 มม. มีระยะกระดกของปลายแฟลปเท่ากับ 0.25 มม. ในขณะที่แฟลปขนาดความกว้างและยาว 3 และ 7 มม. มีระยะกระดกเท่ากับ 0.45 มม. โดยแฟลปทั้งสองมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 1,000 และ 460 Hz ตามลำดับ เมื่อมาพิจารณาการเคลื่อนที่ของแฟลปพบว่า ลักษณะของสัญญาณที่ป้อนสู่แอดชัวเอเตอร์ระหว่างคลื่นรูปไซน์และสี่เหลี่ยมจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ที่มีความแตกต่างกันมากในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงมากขึ้นแล้วลักษณะการเคลื่อนที่ของแฟลปจะใกล้เคียงกันมากโดยเฉพาะเมื่อความถี่ของการขับเคลื่อนมีขนาดใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของแฟลป ในการศึกษาแฟลปแอดชัวเอเตอร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปติดตั้งเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ชิ้นเทติกส์เจ็ดที่มีขนาดรูออร์ฟิสเท่ากับ 0.5 มม. และจากการทดลองพบว่าความเร็วเจ็ตที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาดขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนและมีค่าสูงสุด 0.8 เมตรต่อวินาที ที่ระยะ 2 มม.จากกึ่งกลางของรูออร์ฟิส เมื่อใช้ความถี่ในการขับเคลื่อนประมาณ 600 Hz โดยความเร็วเจ็ตที่ต่ำนี้อาจจะเป็นผลของระยะห่างระหว่างขอบแฟลปและผนังควาร์ตที่มีขนาดค่อนข้างกว้าง

สำหรับการศึกษาในส่วนถัดไปมีวัตถุประสงค์เพื่อจะลองสร้างแฟลปด้วยวิธีการกัดลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างง่าย ซึ่งจะทำให้ได้ง่ายด้วยต้นทุนต่ำ และศึกษาผลของความกว้างและความยาวแฟลปในช่วงแอดชัวเอเตอร์ประมาณ 3-8 มม. ต่อการตอบสนอง static และ dynamic response โดยในการศึกษา static response เราจะพิจารณาระยะกระดกของปลายแฟลปเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษา dynamic response จะพิจารณาขนาดของความถี่เรโซแนนซ์และระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์นั้น โดยทำการสร้างแอดชัวเอเตอร์ขึ้นมาทั้งหมด 5 ขนาด มีความกว้างและความยาว ดังนี้ 4x6, 4x7, 4x8, 3x8, และ 5x8 มม.xmม. และนำมาประกอบกับแท่งแม่เหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. โดยมีกระบวนการสร้างเริ่มจากการเคลือบโฟโตรีซิสแบบแผ่นแห้งบนแผ่นโพลีอีไมด์-ทองแดง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำการฉายแสงจากหลอด 10W/T20/Blacklight blue เป็นเวลา 30

นาที่ที่ระยะห่างจากหลอดประเภททรงกระบอก 5 ซม. หลังจากนั้นจึงทำการ develop ด้วย Na_2CO_3 of 2 g/200cc H_2O เป็นเวลา 9 นาที และกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการทิ้งด้วยสารละลาย FeCl_2 เป็นเวลา 37 นาที และเราพบว่าด้วยกระบวนการที่กล่าวมา มีความคลาดเคลื่อนของขนาดความกว้างจากที่ออกแบบไว้ประมาณ 14% และความไม่สม่ำเสมอของขนาดความกว้างประมาณ 9.4% เมื่อนำเอา แอคชูเอเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทดสอบ พบว่า สำหรับการตอบสนอง static response ในกรณีความกว้างคงที่ค่าหนึ่ง การเพิ่มความยาวเพลบจะทำให้ระยะกระดกสูงขึ้นค่อนข้างมาก แต่สำหรับความยาวคงที่แล้ว ระยะกระดกจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักและจะระยะสูงสุดเกิดขึ้นที่ความกว้างที่เหมาะสมค่าหนึ่ง สาเหตุน่าจะมาจากการเพิ่มความกว้างจะส่งผลในสองลักษณะต่อระยะกระดกดังนี้ การเพิ่มความกว้างจะทำให้มีแรงแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำต่อเพลบสูงขึ้น และมีผลทำให้ระยะกระดกสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความกว้างจะทำให้ขนาด moment of inertia ของเพลบสูงขึ้นและส่งผลทำให้ระยะกระดกลดลง ในการทดสอบ dynamic response พบว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวเพลบจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความถี่เรโซแนนซ์ของเพลบมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเพลบ โดยเพลบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นความถี่เรโซแนนซ์จะลดลง แต่การเปลี่ยนแปลงขนาดนี้จะส่งผลต่อระยะกระดกสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์น้อยมาก

เมื่อพิจารณาจากงานสองส่วนแรก ซึ่งพบว่าเมื่อใช้เพลบเป็นตัวขับเคลื่อนอุปกรณ์ใช้เทดิกส์เจ็ตจะมีความเร็วเจ็ตไม่สูงมากนัก ประมาณ 0.8 เมตรต่อวินาที ที่ระยะ 2 ม.ม.จากปากรูออริฟิซของอุปกรณ์ และเมื่อทำการศึกษถึงผลของความกว้างและยาวของเพลบด้วยแล้วยังพบว่า ระยะกระดกสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ก็จะได้แตกต่างกันเล็กน้อยสำหรับขนาดของเพลบในออเดอ์ใกล้เคียงกันนี้ ดังนั้นหากยังไม่ไปแก้ไขปัญหาระบบการไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างขอบเพลบและผนังคาวิตีแล้ว ไม่ว่าจะใช้เพลบแอคชูเอเตอร์ขนาดใด ๆ ในออเดอ์ใกล้เคียงกันนี้แล้ว ก็น่าจะทำให้เกิดเจ็ตที่มีความเร็วใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามปัญหาการลดช่องว่างดังกล่าวจะต้องใช้เทคโนโลยีการประกอบชิ้นสูงมาก จึงอาจจะไม่ใช่เรื่องง่ายนักในการดำเนินการแก้ไขปัญหาดังนั้นอีกวิธีการหนึ่งที่จะเพิ่มความเร็วของเจ็ตได้คือ การเปลี่ยนจากเพลบมาเป็นไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ โดยยังยึดหลักการแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ เนื่องจากมีขนาดของแรงมาก ความหนาแน่นสูง และโครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการศึกษาในส่วนสุดท้ายจึงทำการออกแบบเบื้องต้นและการสร้างไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ประเภทแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการออกแบบมีเป้าหมายหลักคือ ไดอะแฟรมที่มีระยะโก่งตัวสูงและใช้โปรแกรม FEM คำนวณและวิเคราะห์ผล เราสรุปได้ว่า สำหรับไดอะแฟรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มม.และหนาประมาณ 120 μm ขดลวดในขนาดความกว้างในออเดอ์ 100 μm และหนา 50 μm ผลของรัศมีของวงแหวนขดลวดทองแดงจะมีในสองลักษณะที่ตรงกันข้ามกัน และด้วยขนาดของพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังกล่าวรัศมีวงแหวนควรมีค่าประมาณ 1 มม. สำหรับการสร้างตัวต้นแบบของแอคชูเอเตอร์ได้ดำเนินการไปบางส่วนแล้ว โดยใช้หลักการสร้างที่จะสามารถลอกไดอะแฟรมแอคชูเอเตอร์ออกจาก substrate ได้ ในขณะนี้อยู่ระหว่างการดำเนินงานซึ่งได้ทดสอบและสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างบางส่วนได้แล้ว

เมื่อมาพิจารณาเรื่องการนำไปใช้งานจริง พารามิเตอร์หลักที่สำคัญอันหนึ่งคือความเร็วเจ็ต ซึ่งจากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ยังมีความเร็วค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม มีผลการศึกษาในการนำ

อุปกรณ์เซ็นเซอร์ความเร็วต่ำไปใช้งานในระบบท่อลำเลียงของเหลวระดับจุลภาคบ้างแล้ว เช่น Mautner (2004) และหากวิเคราะห์ผลการคำนวณจากงานดังกล่าว โดยสมมติให้ท่อมีขนาด 1 มม. และของเหลวเป็นน้ำแล้ว ความเร็วของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่สร้างเจ็ตได้ด้วยความเร็วมากกว่า 0.05 เมตรต่อวินาทีก็ถือว่าเพียงพอแล้วในการช่วยเพิ่มการผสมในระดับจุลภาคได้ ซึ่งความเร็วในระดับนั้นต่ำกว่าความเร็วเจ็ตที่สร้างขึ้นมาได้ในการศึกษานี้ค่อนข้างมาก

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาการควบคุมการไหลในระดับมหภาคแล้ว ความเร็วเจ็ตของการศึกษานี้ค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานอื่น ๆ เช่น Moreau (2007) ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมาก ๆ สร้างพลาสมาในบริเวณเล็ก ๆ ขึ้นมาและมีความเร็วเจ็ต 8 เมตรต่อวินาทีที่ระยะ 0.5 มม.จากพื้น หรือ Warsop and Hucker (2007) สร้างแอกซ์เอเตอร์แบบ pulsed-jet ด้วยใช้หลักการ piezoelectric ในรูปร่างของคานเพื่อทำหน้าที่เป็นวาล์วเปิดปิดอากาศความดันสูง ซึ่งระบบนี้ทำให้มีความเร็วเจ็ตประมาณ 300 เมตรต่อวินาทีที่ 500 Hz ดังนั้นโดยทั่ว ๆ ไปจึงอาจกล่าวได้ว่า ถ้าความเร็วเจ็ตค่อนข้างต่ำอย่างที่เป็นอยู่แล้ว งานทางวิศวกรรมที่อาจจะนำไปใช้ได้ก็อาจจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะในงานที่มีเรโนลด์นัมเบอร์ต่ำหรือเป็นการไหลในระดับจุลภาคเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

Amitay, M., Smith, D.R., Kibens, V., Parekh, D.E., and Glezer, A., 2001, "Aerodynamics flow control over an unconventional airfoil using synthetic jet actuators," *AIAA J.*, Vol. 39, pp. 361-370.

Chaudhari, M., Verma, G., Puranik, B., Agrawal, A., 2009, "Frequency response of a synthetic jet cavity," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol.33, pp.439–448.

Coe, D.J., Allen, M.G., Rinehart, C.S., and Glezer, A., 2006, "Pneumatically actuated micromachined synthetic jet modulators," *Sensors & Actuators A* (in press).

Gad-el-hak, M., 1996, "Modern developments in flow control," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 49, pp. 365-379.

Grosjean, C., Lee, G., Hong, W., Tai, Y.C., and Ho, C.M., 1998, "Micro balloon actuators for aerodynamic control," In *11th IEEE MEMS1998*, Heidelberg, Germany, pp. 166-171.

Ho, C.M., and Huerre, P., (1984), "Perturbed free shear layers," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp.365-424.

Hong, G., 2006, "Effectiveness of micro synthetic jet actuator enhanced by flow instability in controlling laminar separation caused by adverse pressure gradient," *Sensors & Actuators A*, Vol. 132, pp. 607-615.

Hough, G.R. (ed), 1980, Viscous flow drag reduction, Progress in astronautics and aeronautics, Vol. 72, AIAA, NY.

Inaoka, K., Nakamura, K., and Senda, M., 2004, "Heat transfer control of a backward-facing step flow in a duct by means of miniature electromagnetic actuators," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp.711–720.

Jia, S., Ding, G., Zhao, X., and Yang, C., 2007, "Novel optic-fiber switches based on the wobble-type MEMS electromagnetic microactuator," *Optics & Laser Tech.*, Vol. 39, pp. 353-358.

Kasagi, N., 1998, "Progress in direct numerical simulation of turbulent transport and its control," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 19, pp.128-134.

Kasagi, N., Suzuki, Y., and Fukagata, K., 2009, "Microelectromechanical Systems–Based Feedback Control of Turbulence for Skin Friction Reduction," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.41, pp.231–51.

Khoo, M., and Liu, C., 2001, "Micro magnetic silicone elastomer membrane actuator," *Sensors & Actuators A*, Vol.89, pp. 259-266.

Kovacs, G.T.A., 1998, Micromachined Transducers Sourcebook, MacGraw-Hill.

Lee, C., Hong, G., Ha, Q.P., and Mallinson, S.G., 2003, "A piezoelectrically actuated micro synthetic jet for active flow control," *Sensors & Actuators A*, Vol. 108, pp. 168-174.

Li, H.Q., Roberts, D.C., Steyn, J.L., Turner, K.T., and Yaglioglu, O., 2004, "Fabrication of a high frequency piezoelectric microvalve," *Sens. Actuators A*, Vol.111, pp.51-56.

Liu, C., Tsao, T., Lee, G.B., Leu, J.T.S., Yi, Y.W., Tai, Y.C., and Ho, C.M., 1999, "Out-of-plane magnetic actuators with electroplated permalloy for fluid dynamics control," *Sensors & Actuators A*, Vol. 78, pp. 190-197.

Madou, M.J., 1997, Fundamental of Microfabrications, CRC Press.

Mahalingam, R., Rumigny, N., and Glezer, A., 2004, "Thermal management using synthetic jet ejectors," *IEEE Trans. Components & Packaging Tech.*, Vol. 27, pp. 439-444.

Mallinson, S.G., Reizes, J.A., Hong, G., and Westbury, P.S., 2004, "Analysis of hot-wire anemometry data obtained in a synthetic jet flow," *Exp. Thermal Fluid Sciences*, Vol. 28, pp.265-272.

Mautner, T., 2004, "Application of the synthetic jet concept to low Reynolds number biosensor microfluidic flows for enhanced mixing – A numerical study using the lattice Boltzmann method," *Biosensors and Bioelectronics*, Vol.19, pp. 1409–1419.

Moin, P., and Bewley, T., 1994, "Feedback control of turbulence," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 47, No. 6, S3-S13.

Moreau, E., 2007, "Airflow control by non thermal plasma actuators," *J. Phys. D*, Vol.40, pp.605-636.

Nitu, C., Gramescu, B., and Nitu, S., 2005, "Application of electromagnetic actuators to a variable distribution system for auto mobile engines," *J. of Materials Processing Tech.*, Vol. 161, pp. 253-257.

Nguyen, N.T., and Wereley, S.T., 2002, Fundamentals And Applications of Microfluidics, 1st edition, Artech House Publishers.

Osborn, R.F., Kota, S., Hetrick, J.A., Geister, D.E., Tilmann, C.P., and Joo, J., 2004, "Active flow control using high-frequency compliant structures," *J Aircraft*, Vol. 41, No. 3, pp. 603-609.

Pimpin, A., Suzuki, Y., and Kasagi, N., 2004, "Micro electrostrictive actuator with metal compliant electrodes for flow control applications," *Proc. 17th IEEE Int. Conf. MEMS2004*, Jan 2004, Maastricht, pp.478-481.

Pimpin, A., Suzuki, Y., and Kasagi, N., 2007, "Micro electrostrictive actuator with large out-of-plane deformation for flow control application," *J. of MEMS*, Vol.16, No.3, pp.753-764.

Rathnasingham, R., and Breuer, K.S., 2002, "Active control of turbulent boundary layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 495, pp. 209-233.

Smith, B.L., and Glezer, A., 2004, "Jet vectoring using synthetic jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 458, pp.1-34.

Suzuki, H., Kasagi, N., and Suzuki, Y., 2004, "Active control of an axisymmetric jet with distributed electromagnetic flap actuators," *Exp. Fluids*, Vol. 36, pp.498-509.

Tesar, V., Hung, C.H., and Zimmerman, W.B., 2006, "No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator," *Sensors & Actuators A*, Vol. 125, pp.159-169.

Tsao, T., Liu, C., Tai, Y.C., and Ho, C.M., 1994, "Micromachined magnetic actuators for active flow control," In *Application of Micro Fabrication to Fluid Mechanics*, pp.31-38, Chicago, IL.

Warsop, C., and Hucker, M., 2007, "Pulsed air-jet actuators for flow separation control," *Flow Turbul. Combust*, Vol.78, pp.255-258.

Yang, X., Grosjean, C., Tai, Y.C., and Ho, C.M., 1998, "A MEMS thermopneumatic silicone rubber membrane valve," *Sensors & Actuators A*, Vol. 64, pp.101-108.

Zhang, Y.H., Ding, G.F., Fu, S., and Cai, B.C., 2006, "A fast switching bistable electromagnetic microactuator fabricated by UV-LIGA technology," *Mechatronics* (in press).

ผลลัพธ์จากโครงการวิจัย

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ
 "Parametric Study of Synthetic Jet Driven by MEMS Flap Actuator (tentative name)," in *Sensors and Actuators A*. (Impact Factor =1.462) หรือ *Journal of Fluids Engineering* (Impact Factor=0.729)

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

มีการสร้างนักวิจัยใหม่ โดยแบ่งเป็นนิสิตปริญญาตรี 6 คน และนิสิตปริญญาโท 1 คน ดังนี้

2.1 Mr. Peerapat	Termpanya
2.2 Mr. Sawit	Wattanapornmongkol
2.3 Mr. Suppakit	Fongtanakit
2.4 Mr. Dolawat	Wanichwatphibun
2.5 Mr. Thanapat	Chantasuwankul
2.6 Mr. Pisitsak	Chatchotikawong
2.7 Mr. Pakorn	Nontiwatanawanich