



## การตอบสนองเชิงความถี่ของโครงสร้างปีกเพียโซอิเล็กทริกแบบต่างๆของหุ่นยนต์แมลงขนาดเล็ก Frequency Responses of Various Piezoelectric Wing Structures of a Micro Insect Robot

<u>กมลรัตน์ ตั้งอุดมกิจ</u> จีระภา สุขแก้ว และ พฤทธิกร สมิตไมตรี\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 \*ติดต่อ: spruitti@me.psu.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 074-287214, เบอร์โทรสาร 074-558830

#### บทคัดย่อ

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อนหุ่นยนต์ขนาดเล็กแบบปีกกระพือด้วยตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกเพื่อยกน้ำหนัก ตัวของทั้งระบบให้ได้นั้น แรงยกตัวอันเนื่องมาจากการกระพือของปีกเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องศึกษา ในงานวิจัยนี้ปีกของ แมลงเม่าถูกติดตั้งบนตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก เพื่อทดลองหาผลกระทบของความถี่กระตุ้นต่อการตอบสนองของปีก แมลงและปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อแรงยก ในการทดลอง ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 70 V ถูกจ่ายให้กับโครงสร้างเพียโซอิ เล็กทริกที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน 6 แบบ ได้แก่ สี่เหลี่ยม 4 แบบ สามเหลี่ยมและวงกลมอย่างละ 1 แบบ ซึ่ง รูปแบบทั้งหมดนี้ทดลองโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของวัสดุ จากนั้นเลือกโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกแบบที่มี ขนาดของการสั่นสะเทือนต่อน้ำหนักตัวมากที่สุด 3 แบบไปติดกับปีกแมลง แล้วทำการวัดความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกปีกแมลงและขนาดการสั่นของปีกทั้ง 3 แบบ ด้วยการถ่ายวีดีโอ แล้วปรับเทียบเป็นระยะการ เคลื่อนที่ พบว่า ความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสูงสุดลดลงจากเดิม ประมาณ 10-20 Hz และรูปร่างโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก รูปสามเหลี่ยมสามารถสร้างขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวมากที่สุด ดังนั้น โครงสร้างเพียโซอิเล็กกริกรูปสามเหลี่ยมจึงถูก เลือกที่จะนำไปใช้เป็นตัวทำงานและพัฒนากลไกการควบคุมปีกให้สามารถสร้างแรงยกต่อน้ำหนักตัวที่เหมาะสมต่อไป **คำหลัก:** การตอบสนองเชิงความถี่; หุ่นยนต์แมลง; ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก; รูปร่างตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก

#### Abstract

To design of a flapping wing micro-robot driven by the piezoelectric actuator, a lift force of the wing is the crucial issue. In this study, first, the electrical voltage of 70 V is supplied to various shape of piezoelectric actuators, there are 4 rectangles, a triangle and a circle shape. Three actuators highest vibration amplitudes per body weight ratio are chosen for further studies. Then, a termite fly wing is glued on each selected actuator. The vibration responses of the piezoelectric wing structures are measured. The experimental results show that natural frequencies of the piezoelectric wing structures drop around 10-20 Hz compared with the previous study without wing. The triangle actuator provides maximum vibration response per body weight ratio, thus it is chosen for further design and development of a flapping wing micro robot.

*Keywords:* frequency response; flapping wing robot; piezoelectric actuator; piezoelectric actuator shape

### การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

## DRC0021

จากการตรวจสอบเอกสาร พบว่า R.J. Wood และ คณะเป็นทีมงานที่วิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์แมลงอย่าง ้ต่อเนื่อง มีบทความที่เกี่ยวข้องมากกว่า 60 บทความ โดย ช่วงแรกของการวิจัยเริ่มต้นในปี 2001-2007 เน้นไปที่ การออกแบบกลไกควบคุมปีกโดยใช้โครงสร้างเพียโซอิ เล็กทริกรูปสามเหลี่ยม ที่มีความสูงประมาณ 10 cm เป็น ตัวทำงาน [11-13] ถัดมาในปี 2007-2008 หุ่นยนต์ แมลงนี้เริ่มบินขึ้นได้โดยใช้แหล่งจ่ายจากพลังงาน ภายนอก [14,15] จากนั้นในปี 2008-2012 เป็นช่วงเวลา ของการปรับปรุงในด้านการใช้พลังงานและลดขนาดของ แหล่งจ่ายให้เล็กลง [16-21] โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ หุ่นยนต์สามารถบินได้โดยใช้แหล่งพลังงานจากภายใน ของระบบขับเคลื่อนเอง แต่ไม่บรรลุวัตถุประสงค์ เท่าที่ควร และในปี 2013-ปัจจุบัน งานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่ การปรับปรุงการบินให้มีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น [22-26]

เพื่อที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ที่หุ่นยนต์สามารถบินได้ โดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานภายในตัวเอง รูปร่างของ โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกและปีกเป็นตัวแปรต้นของการ เกิดแรงยกต่อน้ำหนักตัวที่จำเป็นต้องศึกษาโดยการใช้ ทฤษฎีการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและการ สั่นสะเทือนเชิงกลในการทำความเข้าใจพฤติกรรมที่ เกิดขึ้นจากการทดลองที่จะนำเสนอในบทความนี้

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมปีกให้กระพื้อของหุ่นยนต์แมลงเป็นผลมา จากการสั่นสะเทือนของตัวทำงาน อันเนื่องมาจาก ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกในวัสดุ ดังที่จะอธิบายใน หัวข้อ 2.1

### 2.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับ แรงทางกลแล้วเปลี่ยนพลังงานกลที่ได้รับไปเป็นพลังงาน ไฟฟ้า โดยวัสดุที่แสดงสมบัตินี้ได้ถูกเรียกว่าวัสดุเพียโซอิ เล็กทริก ในทางกลับกันวัสดุดังกล่าวจะสามารถเปลี่ยน พลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือน ได้เช่นกัน โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์อิน เวอร์สเพียโซอิเล็กทริก โดยสามารถเขียนสมการเพื่อ อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวในรูปของความเค้น ความเครียด สนามไฟฟ้า และการกระจัดทางไฟฟ้าที่ เกิดขึ้นในวัสดุได้ ดังสมการที่ (1) และ (2)

### 1. บทนำ

การบินแบบปีกกระพื่อในธรรมชาติมี 2 รูปแบบ คือ การบินแบบนกและการบินแบบแมลง [1] การเกิดแรง ยกและแรงผลักของสัตว์ทั้ง 2 จำพวกนี้มาจากการทำงาน ของกล้ามเนื้อยกและกล้ามเนื้อกดปีก แต่แตกต่างกันที่ การยึดติดของกล้ามเนื้อเข้ากับส่วนต่างๆของร่างกาย นก มีกล้ามเนื้อยกและกดปีกยึดระหว่างกระดูกโคนปีกและ กระดูกอก [2] ส่วนแมลงมีรูปแบบการยึดติดของ กล้ามเนื้อขึ้นอยู่กับขนาดลำตัว แมลงขนาดใหญ่ เช่น ้ผีเสื้อ แมลงปอ มีด้านหนึ่งของกล้ามเนื้อยกยึดติดกับโคน ปีกด้านในและด้านหนึ่งของกล้ามเนื้อกดยึดติดกับโคนปีก ้ด้านนอก อีกด้านหนึ่งของกล้ามเนื้อทั้งคู่นี้จะยึดติดกับ ผนังอกด้านท้องช่วงล่าง [3, 4] มีการควบคุมปีกให้ ึกระพือได้ที่ความถี่ต่ำกว่า 100 Hz แมลงขนาดเล็ก เช่น ริ้น ผึ้ง แมลงวัน มีการยึดติดของกล้ามเนื้อยกหรือ กล้ามเนื้อตามขวางอยู่ระหว่างผนังอกด้านบนและผนังอก ้ช่วงท้องด้านล่างและมีกล้ามเนื้อกดหรือกล้ามเนื้อ ตามยาวยึดติดกับผนังอกด้านหน้าและผนังอกด้านหลัง [5, 6] กล้ามเนื้อทั้ง 2 ส่วนนี้ไม่ยึดกับปีกโดยตรง แต่ ้สามารถควบคุมปีกให้กระพื่อด้วยความถี่สูงกว่า 100 Hz ได้

สำหรับการออกแบบระบบขับเคลื่อนแบบปีก กระพือที่เลียนแบบแมลง (หุ่นยนต์แมลง) การควบคุมปีก ้ให้กระพือเกิดจากตัวทำงานที่ติดตั้งภายในระบบ ซึ่งต้อง เลือกใช้ให้เหมาะกับขนาดของตัวหุ่นยนต์ ตัวทำงานที่ ติดตั้งให้กับระบบ มี 2 ประเภท คือ 1. มอเตอร์เป็นตัว ทำงานที่เหมาะกับการสร้างหุ่นยนต์แมลงขนาดใหญ่ ้ได้แก่ หุ่นยนต์ผีเสื้อ [7, 8] นกฮัมมิ่งเบิร์ด แมลงปอ และ แมลงปีกแข็ง [1] เป็นต้น เนื่องจากต้องอาศัยกลไกการ ควบคุมปีกที่ซับซ้อน ใช้ชิ้นส่วนทางกลหลายชิ้นยึดต่อกัน เป็นระบบ และใช้ความถี่ไม่เกิน 100 Hz ในการควบคุม ้ ปีกให้กระพือ [9] 2. วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวทำงานที่ สามารถสั่นสะเทือนได้ที่ความถี่มากกว่า 100 Hz เหมาะ กับการสร้างหุ่นยนต์แมลงขนาดเล็ก ได้แก่ หุ่นยนต์ผึ้ง เป็นต้น ซึ่งมีกลไกการควบคุมปีกไม่ซับซ้อน ใช้ชิ้นส่วน ทางกลในการควบคุมปีกให้กระพือเพียง 1-2 ชิ้น [10] และใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบน้อยกว่าตัวทำงาน ประเภทมอเตอร์ ด้วยข้อดีดังกล่าว หุ่นยนต์แมลงขนาด เล็กที่ใช้ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกจึงถูกเลือกที่จะนำมา ศึกษาและพัฒนาเพื่อหาช่องว่างสำหรับการทำวิจัยต่อ ยอดสิ่งประดิษฐ์ให้ดียิ่งขึ้น





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



$$\sigma = C_E \cdot \varepsilon - e^T \cdot E \tag{1}$$

$$D = e.\varepsilon + \varepsilon_s.E \tag{2}$$

เมื่อ  $\sigma$  (N/m<sup>2</sup>) คือ ความเค้นทางกล,  $C_E$  (Pa) คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่,  $\varepsilon$  (ไม่มี หน่วย) คือ ความเครียดทางกล, E (N/C) คือ สนามไฟฟ้า, D (C/m<sup>2</sup>) คือ การกระจัดทางไฟฟ้า, e (C/m<sup>2</sup>) และ  $\varepsilon_s$  (F/m) คือ ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง โดเมน [27, 28].

ผลตอบสนองของวัสดุหรือค่าแอมพลิจูดของการ สั่นสะเทือนเป็นไปตามสมการการวิเคราะห์ฟังก์ชันทาง คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับความถี่ (frequency domain analysis) ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$-\rho\omega^2 u - \nabla\sigma = F_{\nu}e^{j\phi} \tag{3}$$

$$\nabla D = \rho_{\nu} \tag{4}$$

เมื่อ  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) คือ ความหนาแน่นของวัสดุเพียโซอิ เล็กทริก,  $\omega$  (Hz) คือ ความถี่ที่ได้จากการตอบสนอง, u(m) คือ ผลตอบสนองของการกระจัด (u, v, w),  $F_{\nu}$ (N) คือ ปริมาณของแรงที่กระทำ,  $\rho_{\nu}$  (kg/m<sup>3</sup>) คือ ความ หนาแน่นของประจุไฟฟ้า, และ  $\phi$ (rad) คือ มุมเฟส [29]

นอกจากพฤติกรรมการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิ เล็กทริกที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น ยังมีพฤติกรรมการ สั่นสะเทือนเชิงกลที่ต้องนำมาอธิบายร่วมด้วยเมื่อ พิจารณาทั้งระบบที่ประกอบด้วยโครงสร้างและตัวทำงาน อีกทั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำงานได้เมื่อมีการต่อกับ สายไฟเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุ ทำให้ทั้งระบบมี เงื่อนไขขอบ (boundary condition) ของการสั่นเป็น แบบ free-pinned ดังที่จะอธิบายในหัวข้อ 2.2

### 2.2. การสั่นสะเทือนเชิงกล

การศึกษาผลตอบสนองของการสั่นสะเทือน ได้ผลลัพธ์ ในรูปของการกระจัดแต่ละตำแหน่งบนวัสดุที่ สั่นหรือที่เรียกว่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน สำหรับ การสั่นสะเทือนที่มีเงื่อนไขขอบแบบ Free-Pinned ดังรูป ที่ 1 สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบได้จาก สมการที่ (5)



รูปที่ 1 เงื่อนไขขอบสำหรับการสั่นสะเทือน แบบ free-pinned

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left(\frac{EI}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(5)

เมื่อ E (Pa) คือ ค่ามอดูลัสยึดหยุ่น, I (m<sup>4</sup>) คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคานวัดจากแกนกลาง, L (m) คือ ความยาวของคาน, และ  $\lambda_1 = 3.92660231$ ,  $\lambda_2 = 7.0685$ 8275,  $\lambda_3 = 10.21017612$ ,  $\lambda_4 = 13.35176878$ ,  $\lambda_5 =$ 16.49336143 และ  $\lambda_i = (4i+1)\frac{\pi}{4}$ ; i > 5 [30] และ หาค่ารูปแบบการสั่นสะเทือน (mode shape) ได้จาก สมการที่ (6)

$$\widetilde{y}_{i}\left(\frac{x}{L}\right) = \cosh\frac{\lambda_{i}x}{L} + \cos\frac{\lambda_{i}x}{L} - \sigma_{i}\left(\sinh\frac{\lambda_{i}x}{L} + \sin\frac{\lambda_{i}x}{L}\right)$$
(6)

เมื่อ  $\widetilde{y}_i(\frac{x}{L})$ คือ รูปแบบของการสั่นสะเทือน และ  $\sigma_1$ =1.000777304,  $\sigma_2$ =1.000001445,  $\sigma_i$ =1.0;

ແລະ  $\sigma_{\scriptscriptstyle 1}$ =1.000777304,  $\sigma_{\scriptscriptstyle 2}$ =1.000001445,  $\sigma_{\scriptscriptstyle i}$ =1.0; i>2

แรงยกที่เกิดขึ้นในหุ่นยนต์แมลง อันเป็นผลจากการ เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกควบคู่ไปกับการ สั่นสะเทือนเชิงกลสามารถวัดผลได้จากขนาดของการสั่น (peak-to-peak displacement) ส่วนโครงสร้างรูปร่าง แบบใดที่จะให้ขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวมากกว่ากันจะ ได้ศึกษาผ่านการทดลอง ที่จะอธิบายในหัวข้อที่ 3 ต่อไป

#### 3. การทดลอง

การทดลองศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของตัว ทำงานเพียโซอิเล็กทริกที่จะนำไปสู่การหารูปร่างของตัว ทำงานที่สร้างขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวมากที่สุดเมื่อ นำไปสร้างเป็นหุ่นยนต์แมลง สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ ดังต่อไปนี้ อุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถ ปรับความถี่ได้, อุปกรณ์ขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์, ตัว จับยึดโครงสร้าง, ปีกแมลงเม่า และโครงสร้างทองเหลือง ที่ฉาบด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (PZT) หรือที่เรียกรวมกัน ว่าโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกรูปร่างต่างๆ 6 แบบ พร้อม สายไฟ ได้แก่ สี่เหลี่ยม 4 แบบ สามเหลี่ยม 1 แบบ และ วงกลม 1 แบบ หลักการคัดเลือกขนาดและรูปร่าง พิจารณาโดยค่าความแข็งที่ต่างกัน (stiffness) และค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคาน กล่าวคือ รูปร่าง ของวัสดุที่มีค่าความแข็งน้อยจะตอบสนองต่อการ



รูปที่ 4 การติดปีกแมลงเม่าเข้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

### 4. ผลการทดลอง 4.1 การตอบสนองของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก รูปร่างต่างๆ

จากชุดการทดลองตามรูปที่ 3 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับขนาด 70 V ให้กับโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก โครงสร้างจะสั่นอย่างรุนแรงโดยให้ค่าการกระจัดที่สูงมาก เมื่อถูกกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติ จากการทดลองขั้นตอน แรก พบว่า ที่ความถี่ที่โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกสั่นสูงสุด ของแต่ละแบบ ตัวทำงานวงกลม ตัวทำงานสี่เหลี่ยมแบบ ที่ 2 และ 3 มีลักษณะการสั่นแบบบิด (twist mode) ส่วนตัวทำงานสี่เหลี่ยมแบบที่ 4 และ 5 รวมถึงตัวทำงาน สามเหลี่ยม มีลักษณะการสั่นแบบทรานส์เวอร์ส (transverse mode) โดยรูปแบบการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งหมด นี้เป็นไปตามสมการ (6) การวัดขนาดการ

สั่นสะเทือนได้ดีกว่ารูปร่างของวัสดุที่มีค่าความแข็งมาก ขนาดของแต่ละแบบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 2



แต่ละแบบ

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกทำ การทดลอง โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 70 V ซึ่งเป็นขนาดแรงดันที่ทำให้ตัวทำงานตอบสนองได้เป็น อย่างดีให้กับโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกรูปแบบต่างๆ โดย ต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3 ปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 100-1,000 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่เดียวกับความถี่ที่แมลง ขนาดเล็กใช้กระพือปีก ถ่ายวิดีโอเพื่อนำไปหาขนาดของ การสั่น ทำการบันทึกระยะจากภาพการเคลื่อนที่ของ ปลายอิสระแล้วปรับเทียบกับระยะอ้างอิงมาตรฐานที่อยู่ ในภาพ เปรียบเทียบค่าขนาดการสั่นต่อน้ำหนักโครงสร้าง ทั้ง 6 แบบ เลือก 3 แบบที่ให้ค่าขนาดการสั่นต่อน้ำหนัก โครงสร้างที่สูงที่สุด แล้วทดลองต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดลองโดยการนำโครงสร้างเพีย โซอิเล็กทริกทั้ง 3 แบบที่เลือกแล้ว มายึดกับปีก 1 ข้าง ดังรูปที่ 4 ปรับรูปแบบการยึดจับโครงสร้าง ให้ปลายด้าน ที่ไม่ถูกยึดชี้ไปทางแกน y แล้วทำการทดลองซ้ำขั้นตอน แรก จนครบทั้ง 3 แบบ ในรูปที่ 4

## DRC0021

# DRC0021

#### การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา



กระจัดของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 5 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 การวัดค่าขนาดการสั่นของโครงสร้างเพียโซอิ เล็กทริก

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างแบบที่ 3 และ 6 มีพื้นที่การฉาบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อพื้นที่ โครงสร้างใกล้เคียงกันที่ประมาณ 0.5 แต่ให้ขนาดของ การสั่นแตกต่างกัน โดยโครงสร้างแบบที่ 3 ให้ขนาดของ การสั่นสูงสุด ที่ 3.51 mm แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดการ สั่นต่อน้ำหนักตัวแล้ว พบว่า โครงสร้างแบบที่ 6 มีขนาด การสั่นต่อน้ำหนักตัวมากกว่าโครงสร้างแบบที่ 3 ถึง 5 เท่า นั่นเป็นเพราะว่า โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมมีค่า ความแข็งของวัสดุ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่คานวัด จากแกนกลาง และน้ำหนักตัวน้อยกว่าโครงสร้างแบบ สี่เหลี่ยมที่ให้ขนาดของการสั่นใกล้เคียงกัน สำหรับการ ทดลองในขั้นตอนต่อไป โครงสร้างแบบที่มีขนาดของการ สั่นต่อน้ำหนักตัว มากที่สุด 3 แบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบ ที่ 3, 5 และ 6 จะถูกนำมาติดกับปีกแมลงเพื่อศึกษาการ ตอบสนอง ดังจะได้อภิปรายต่อในหัวข้อ 4.2

### 4.2 การตอบสนองของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกที่ยึด กับปีกแมลง

นำตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 3 แบบที่เลือกไว้มา ยึดกับปีกแมลง แล้วทำการทดลองเหมือนกับขั้นตอนแรก พบว่า แบบที่ 3 ที่เคยทำให้เกิดการสั่นมากที่สุด เมื่อ นำมายึดกับปีกก็ยังเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง จนกระทั่งปีกขาดในทันทีที่กระตุ้นด้วยความถี่ 339 Hz ดังรูปที่ 6 จึงไม่สามารถหาขนาดการกระจัดของปีกได้ ที่ เป็นเช่นนี้เพราะความถี่ 354 Hz คือความถี่ธรรมชาติของ โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก ส่วนความถี่ 339 Hz เป็น ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกปีกแมลง ส่วนแบบที่ 5 และ 6 ให้ค่าขนาดของการกระจัดใกล้เคียง กัน คือ 7.44 และ 7.84 mm. ที่ความถี่ 294 Hz และ 367 Hz ตามลำดับ โดยที่ปีกแมลงไม่เสียหาย ที่ความถี่ ดังกล่าวให้ค่าขนาดของการกระจัดสูงกว่าความถี่อื่นๆ รูป ที่ 7 แสดงวิธีการวัดขนาดการสั่นของปีก



## รูปที่ 6 ความเสียหายของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกปีก แมลงที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 339 Hz

ແບບ	ความถี่ตอบสนอง	พื้นที่	พื้นที่วัสดุ	พื้นที่วัสดุ	น้ำหนัก	ขนาดของ	ขนาดของการสั่น
รี	ของโครงสร้างเพีย	โครงสร้าง	เพียโซอิเล็กทริก	ต่อ	(g)	การสั่น	ต่อน้ำหนักตัว
	โซอิเล็กทริก (Hz)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	โครงสร้าง		(mm)	(mm/g)
1	512	12.56	3.14	0.25	3.54	2.78	0.79
2	318	7.28	3.14	0.43	2.17	2.84	1.31
3	354	5.62	2.76	0.49	1.72	<u>3.51</u>	2.04
4	266	3.86	2.34	0.61	1.11	1.38	1.24
5	309	1.95	0.82	0.42	0.56	1.92	3.43
6	345	0.98	0.48	0.49	0.28	3.00	10.71

ตารางที่ 1 ขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกรูปแบบต่างๆ

# DRC0021



สลับขนาด 70V ให้กับโครงสร้างแบบต่างๆ ได้แก่ แบบ สี่เหลี่ยม 3 แบบ สามเหลี่ยมและวงกลมอย่างละ 1 แบบ วัดค่าขนาดการสั่นโดยการถ่ายวีดีโอ แล้วหาระยะจาก ภาพด้วยการปรับเทียบกับระยะอ้างอิง เลือกโครงสร้างที่ ให้ค่าขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวสูงสุดจำนวน 3 แบบ พบว่า โครงสร้างสี่เหลี่ยมแบบที่ 3 ที่มีขนาด 2 cm x 4 cm, โครงสร้างสี่เหลี่ยมแบบที่ 5 ที่มีขนาด 0.5 cm x 4 cm และโครงสร้างสามเหลี่ยมแบบที่ 6 สูง 4 cm ฐาน ยาว 0.5 cm สามารถสร้างขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวได้ สูงกว่าแบบอื่น โดยโครงสร้างแบบที่ 3 สร้างขนาดการสั่น ได้มากที่สุดถึง 3.51 mm ที่ความถี่ 354 Hz มีโหมดการ สั่นเป็นแบบบิด ส่วนโครงสร้างแบบที่ 5 และ 6 สร้าง ขนาดการสั่นได้ 1.92 mm ที่ความถี่ 309 Hz และ 3 mm ที่ความถี่ 345 Hz ตามลำดับ ทั้งสองแบบมีโหมด การสั่นเป็นแบบทรานส์เวอร์ส จากนั้น นำโครงสร้างที่ เลือกไว้ มายึดกับปีกแมลงเม่า 1 ปีกตามแนวขวางตั้งฉาก กับลำตัวในลักษณะเลียนแบบแมลงจริง วัดค่าขนาดการ สั่นของปีกด้วยวิธีการเดียวกับขั้นตอนแรก พบว่า เมื่อ กระตุ้นโครงสร้างปีกแมลงแบบที่ 3 ด้วยความถี่ 339 Hz จะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงจนกระทั่งปีกขาดจึงไม่ สามารถวัดค่าขนาดการสั่นได้ หากต้องการนำโครงสร้าง แบบที่ 3 ไปใช้ในการสร้างเป็นหุ่นยนต์แมลงจะต้องเลือก ปีกแมลงชนิดอื่นหรือสร้างปีกจำลองเลียนแบบปีกแมลง ้จริงที่มีความทนทานต่อการสั่นมากกว่าปีกแมลงเม่าที่ นำมาใช้ในการทดลองนี้ ส่วนโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก ปีกแมลงแบบที่ 5 และ 6 ตอบสนองได้ดีที่ความถี่ 294 Hz และ 367 Hz ตามลำดับ โดยโครงสร้างปีกแมลงแบบ ที่ 6 เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาต่อด้วยการต่อเติม โครงสร้างเสริมเพื่อให้ระบบสามารถสร้างแรงยกต่อ น้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก แบบสามเหลี่ยมนี้แสดงศักยภาพที่ให้ขนาดการสั่นต่อ ้น้ำหนักตัวได้มากกว่าแบบอื่นๆ อีกทั้งรูปแบบการสั่นเป็น แบบทรานส์เวอร์ส ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับที่แมลงจริงใช้ ในการควบคุมการกระพือปีกอีกด้วย





เมื่อเปรียบเทียบขนาดของการสั่นต่อน้ำหนักตัวแล้ว พบว่า แบบที่ 6 ให้ค่าขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวที่ มากกว่าแบบที่ 5 ถึง 2 เท่า ข้อมูลทั้งหมดแสดงดังตาราง ที่ 2 ดังนั้นในการออกแบบระบบขับเคลื่อนแบบปีก กระพือที่เลียนแบบแมลงขนาดเล็กด้วยตัวทำงานเพียโซอิ เล็กทริก การออกแบบโครงสร้างแบบสามเหลี่ยมจะ สามารถสร้างแรงยกตัวให้กับระบบได้มากกว่าแบบวงกลม และสี่เหลี่ยมเพราะรูปแบบนี้สร้างขนาดของสั่นต่อ น้ำหนักตัวได้สูงกว่าแบบอื่นๆ อีกทั้งให้รูปแบบการสั่นเป็น แบบทรานส์เวอร์ส ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกับที่แมลงใช้ ควบคุมการกระพือของปีก

### 5. สรุป

ลำดับการศึกษาลักษณะโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริก ปีกแมลงที่สามารถสร้างแรงยกต่อน้ำหนักตัวให้ได้มากนั้น ขั้นตอนแรกทำได้โดยการทดลองหาลักษณะโครงสร้างที่ สามารถสร้างขนาดของการสั่นต่อน้ำหนักที่มากที่สุดก่อน เนื่องจากรูปร่างของโครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกจะส่งผล กับความถี่ตอบสนอง โหมดการสั่นของปีก และน้ำหนักตัว ของหุ่นยนต์แมลง มีวิธีการคือ จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแส

ุตารางที่ 2 ค่าขนาดการสั่นต่อน้ำหนักตัวของโครงสุร้างเพียโซอิเล็กทริกปีกแมลง

แบบที่	ความถี่ตอบสนองของ	ขนาดการสั่นที่ปีก	ขนาดการสั่นที่ปีก/น้ำหนักตัว	
	โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกปีกแมลง	(mm)	(mm/g)	
	(Hz)			
3	339	N/A (ปีกขาด)	N/A (ปีกขาด)	
5	294	7.44	13.29	
6	367	7.84	28	



#### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยสมาร์ท เมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ และทุนโครงการศูนย์กลางการศึกษา สำหรับภูมิภาคอาเซียน

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Nguyen, Q. V., Park, H. C., Goo, N. S. and Byun, D. (2010). Characteristics of a Beetle's Free Flight and a Flapping-Wing System that Mimics Beetle Flight, Journal of Bionic Engineering, vol.7 (1), March 2010, pp. 77–86.

 [2] MyFirstBrain.Com. การเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต: การเคลื่อนไหวของสัตว์มีกระดูกสันหลัง, [ระบบ ออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.myfirstbrain.com/ student\_view.aspx?ID=75321, เข้าดูเมื่อวันที่ 29/02/2559

[3] Dickinson, M. H. and Tu, M. S. (1997). The Function of Dipteran Flight Muscle, Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, vol. 116(3), March 1997, pp. 223–238.

[4] Mackean, D. G. (2004). Insects: Structure and Function, URL: http://www.biologyresources.com/insects-02.html, access on 01/03/2016.

[5] Ha, N. S. and Goo, N. S. (2013). Flapping frequency and resonant frequency of insect wings, 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea.

[6] The Evolution of Flight (1996).The Flight Muscles: The Indirect Muscle System, URL: http://park.org/Canada/Museum/insects/evoluti on/indirect.html, access on 01/03/2016.

[7] Fujikawa, T., Hirakawa, K., Okuma, S., Udagawa, T., Nakano, S. and Kikuchi, K. (2008). Development of a small flapping robot: Motion analysis during takeoff by numerical simulation and experiment, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 22(6), August 2008, pp. 1304– 1315. [8] Kovac, M., Vogt, D., Ithier, D., Smith, M. and Wood, R. (2012). Aerodynamic evaluation of four butterfly species for the design of flappinggliding robotic insects, 2012 IEEE/RSJ International Conference on. Vilamoura, Algarve, Portugal.

[9] Truong, T. Q., Phan, V. H., Sane, S. P. and Park, H. C. (2014). Pitching Moment Generation in an Insect-Mimicking Flapping-Wing System, Journal of Bionic Engineering, vol. 11(1), January 2014, pp. 36–51.

[10] Finio, B. M. and Wood, R. J. (2010). Distributed power and control actuation in the thoracic mechanics of a robotic insect, Bioinspiration & Biomimetics, vol. 5(4), Published 24 November 2010.

[11] Wood, R. J., Steltz , E. and Fearing , R. S. (2005). Optimal energy density piezoelectric bending actuators, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 119(2), 13 April 2005, pp. 476–488.

[12] Wood, R. J., Steltz, E. and Fearing, R. S. (2005). Nonlinear Performance Limits for High Energy Density Piezoelectric bending actuators, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain.

[13] Wood, R. J. (2007). Design, fabrication, and analysis of a 3DOF, 3cm flapping-wing MAV, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA.

[14] Wood, R. J. (2007). Liftoff of a 60mg flapping-wing MAV, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA.

[15] Wood, R. J. (2008). The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, vol. 24(2), April 2008, pp. 341-347.

[16] Karpelson, M., Wei, G.-Y. and Wood, R. J.(2008). A Review of Actuation and Power

## DRC0021



Electronics Options for Flapping-Wing Robotic Insects, 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA.

[17] Karpelson, M., Wei, G.-Y. and Wood, R. J. (2009). Milligram-Scale High-Voltage Power Electronics for Piezoelectric Microrobots, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center, Kobe, Japan.

[18] Finio, B. M., Eum, B., Oland, C. and Wood, R.
J. (2009). Asymmetric flapping for a robotic fly using a hybrid power-control actuator, The 2009
IEEE/RSJ International Conference on Intelligent
Robots and Systems, St. Louis, USA.

[19] Karpelson, M., Wood, R. J. and Wei, G.-Y. (2011). Low Power Control IC for Efficient High-Voltage Piezoelectric Driving in a Flying Robotic Insect, Symposia on VLSI Technology and Circuits.

[20] Karpelson, M., Wei, G.-Y. and Wood, R. J. (2012). Driving high voltage piezoelectric actuators in microrobotic applications, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 176, April 2012, pp. 78–89.

[21] Duhamel, P.-E. J., Pe<sup>'</sup>rez-Arancibia, N. O., Barrows, G. L. and Wood, R. J. (2012). Altitude Feedback Control of a Flapping-Wing Microrobot Using an On-Board Biologically Inspired Optical Flow Sensor, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA.

[22] Duhamel, P.-E. J., P<sup>´</sup>erez-Arancibia, N. O., Barrows, G. L. and Wood, R. J. (2013). Biologically Inspired Optical-Flow Sensing for Altitude Control of Flapping-Wing Microrobots, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, vol 18(2), April 2013, pp. 556-568.

[23] P<sup>´</sup>erez-Arancibia, N. O., Whitney, J. P. andWood, R. J. (2013). Lift Force Control ofFlapping-Wing Microrobots Using AdaptiveFeedforward Schemes, IEEE/ASME

TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, vol 18(1), February 2013, pp. 155-168.

[24] Helbling, E. F., Fuller, S. B. and Wood, R. J. (2014). Pitch and Yaw Control of a Robotic Insect using an Onboard Magnetometer, 2014 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), Hong Kong, China.

[25] Fuller, S. B., Karpelson, M., Censi, A., Ma, K. Y. and Wood, R. J. (2014). Controlling free flight of a robotic fly using an onboard vision sensor inspired by insect ocelli, Journal of The Royal Society Interface, June 2014, pp.1-14.

[26] Pérez-Arancibia, N. O., Duhamel, P.-E. J., Ma, K. Y. and Wood, R. J. (2015). Model-Free Control of a Hovering Flapping-Wing Microrobot, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 77(1), January 2015, pp. 95-111.

[27] Muensit, N. (2011). Basics of Piezo-, Pyro-, and Ferroelectricity, Energy Harvesting with Piezoelectric and Pyroelectric Materials, pp. 2-16.

[28] Zhang, Y., Liu, Y., and Wang, Z. L. (2011). Fundamental Theory of Piezotronics, Advanced Materials, pp. 1-10.

[29] COMSOL. (2011). The Piezoelectric Devices Interface, Comsol Multiphysics user guide, pp. 327-352.

[30] Blevins, R. D. (2001). Formulas for natural frequency and mode shape, New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc.