การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต

## เปรียบเทียบประสิทธิภาพแผ่นชั้นการหน่วงบังคับและวัสดุเพียโซเซรามิกเชื่อมต่อ วงจรไฟฟ้าเพื่อลดการสั่นของแผ่นเรียบบาง

## Performance Comparison of a Constrained Damping Layer and a Piezoceramic Patch with Shunted Circuits for Suppressing Plate Vibrations

จักร จันทลักขณา

ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณชั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางชื่อ กรุงเทพฯ 10800

Chak Chantalakhana

Research Center on Advanced Computational Engineering (RACE) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800 E-mail: chakjoe@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

วิธีการลดหรือ ระงับการสั่นสะเทือนของแผ่นเรียบบางสามารถ กระทำได้หลายวิธี ซึ่งในอดีตวิธีการแบบพาสซีฟ (Passive) เช่นการติด แผ่นชั้นการหน่วงบังคับ (Constrained damping layer, CLD) เป็น รูปแบบที่นิยมใช้ปฏิบัติเนื่องจากสามารถลดการสั่นที่ความถี่สูงได้ดี แต่ มีข้อด้อยในประสิทธิภาพการลดการสั่นที่ความถี่ต่ำ

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะได้ศึกษาถึงการนำวัสดุเพียโซอิเลกทริกที่ เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า มาเป็นกลไกทำหน้าที่ออกแบบช่วยลดการสั้นที่ ความถี่ต่ำของแผ่นเรียบบางโดยศึกษาเชิงประสิทธิภาพ เมื่อ เปรียบเทียบกับการทำงานของแผ่นชั้นการหน่วงบังคับ กับการใช้งาน แผ่นวัสดุเพียโซเซรามิกเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า ร่วมถึงการนำวิธีการระงับ การสั่นทั้งสองลักษณะคือ แผ่นชั้นการหน่วงบังคับและแผ่นเพียโซเซ รามิกให้ทำงานร่วมกัน ผลการศึกษาพบว่า แผ่นเรียบบาง (Plate) ที่ นำมาใช้เป็นโครงสร้างผนังบางที่ต้องการระงับการสั่น และโหมดที่สนใจ ลดการสั้นคือโหมดที่สร้างเสียงรบกวนออกมา การใช้แผ่นเพียโซเซ รามิกสามารถช่วยลดการสั่นในแผ่นเรียบบางที่ตรึงขอบทั้งสี่ด้านไว้ได้ เป็นร้อยละ 59 ของขนาดการสั่นขณะที่ไม่มีการควบคุม ขณะที่แผ่นชั้น การหน่วงบังคับเองสามารถลดการสั่นได้ร้อยละ 79 และเมื่อนำ แผ่นเพียโซเซรามิกที่ต่อเชื่อมวงจร R-L แบบอนุกรมจะสามารถลดการ สั้นได้สูงถึงร้อยละ 87

คำหลัก แผ่นชั้นการหน่วงบังคับ, วัสดุเพียโซเซรามิก. การสั่นของ แผ่นเรียบบาง

#### Abstract

Suppression of plate vibrations can be implemented with several schemes. Traditionally, passive damping treatments, for

example, Constrained Layer Damping or CLD, are widely used to reduce vibrations of thin-walled structures. This treatment is performed well at higher frequencies but have a performance limitation to lower frequencies.

In this study, piezoelectric materials shunted with electrical circuits are used as mechanisms for suppressing low frequency vibration of plate structures. Performance of these treatments to plate vibration suppression has been compared together, including collaboration of these two treatments. Results for studies showed that, at target vibration modes of fixed plate, vibration suppression is of 59 percent of vibration level from bare plate using shunted piezoceramic patched on the plate, is of 79 percent using a constrained damping layer on the plate, and is high of 87 percent vibration level reduction using R-L shunted piezoceramic and a constrained damping layer together.

**Keywords:** Constrained Damping Layer, Shunted Piezoelectric, Plate Vibrations

#### 1. บทนำ

วิธีการลดหรือ ระงับการสั่นสะเทือนของแผ่นเรียบบางสามารถ กระทำได้หลายวิธี ซึ่งในอดีตวิธีการแบบพาสซีฟ (Passive) เช่นการติด แผ่นชั้นการหน่วง (Constrained damping layer, CLD) เป็นรูปแบบที่ นิยมใช้ปฏิบัติเนื่องจากสามารถลดการสั่นที่ความถี่สูงได้ดี แต่มีข้อด้อย ในประสิทธิภาพการลดการสั่นที่ความถี่ต่ำ กรณีที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ คุณสมบัติของวัสดุหน่วง ลดความสามารถในการแปลงพลังงานการสั่น เป็นความร้อนลง หรืออุณหภูมิที่ด่ำลงจะทำให้วัสดุหน่วงแข็งและไม่เป็น

สภาพแบบ Viscoelastic อีกต่อไป [1] อย่างไรก็ตามวิธีการในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมแบบแอกทีฟที่ใช้ วัสดุเพียโซอิเลกทริก (Piezoelectric) เป็นแผ่นกระตุ้นดิดบนโครงสร้างแผ่นเรียบบาง เพื่อทำ หน้าที่ตามคำสั่งควบคุม ในการเปลี่ยนระยะเคลื่อนตัวของแผ่นเพียโซเซ รามิก (Piezoceramic) ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งวิธีการแบบนี้จะต้องใช้ หน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ทำงานร่วมกับเซนเซอร์และอุปกรณ์

กระตุ้น ซึ่งค่อนข้างซับซ้อนและเหมาะกับงานที่วิกฤตเรื่อง<sup>1</sup>ปัญหาเสียง และการสั่น [2] สำหรับกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพแผ่นชั้นการ หน่วง วัสดุปี-โซอิเลกทริกถูกใช้เป็นแผ่นบังคับ (Constrained layer) เอง [3] โดยสามารถใช้เป็นตัวเสริมการทำงานของแผ่นชั้นการหน่วงได้ ยังมีในกรณีที่ใช้แผ่นเพียโซเซรามิก ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงาน การสั่นไปเป็นความร้อนเช่นเดียวกับวิธีการหน่วงทางกล แต่ในกรณีนี้ จะใช้วงจรไฟฟ้ามาเชื่อมต่อ (Shunting circuit) เพื่อนำพลังงานการสั่น ไปทิ้งออกในรูปความร้อนที่ตัวต้านทานไฟฟ้า ซึ่งมีหลายลักษณะการ ออกแบบ เพื่อให้สามารถแปลงพลังงานได้มีประสิทธิภาพที่ความถี่ต่ำ หรือ สามารถควบคุมหลายโหมดการสั่นพร้อมกันได้

ด้วอย่างการประยุกต์ใช้แผ่นเพียโซเซรามิกต่อเชื่อมวงจรไฟฟ้า เพื่อลดการสั่นโครงสร้าง เช่น งานวิจัยเครื่องบินทางทหาร [4] มักจะมี ปัญหาทางด้านการล้าตัวของวัสดุในโครงสร้างหลาย ๆจุดด้วยกัน พบว่า ในเครื่องบิน F-15 จะเกิดการล้าตัวบริเวณแผงใกล้กับผิวด้านล่างของ ลำตัวเครื่องบิน เกิดรอยแตกร้าวขึ้นโดยเชื่อว่าเกิดจากการรับภาระทาง พลวัตที่สูง ซึ่งการควบคุมต้องใช้วิธีการที่ไม่เพิ่มน้ำหนักชุดควบคุมเข้า ไปอีกกับตัวเครื่องบินเอง และการทำงานที่อุณหภูมิสูงย่อมมีผลเช่นกัน หรืออย่างการควบคุมการสั่นในชุดถาด CD ROM ที่ใช้ในเครื่อง คอมพิวเตอร์ ได้มีการศึกษา [5] ถึงการนำแผ่นเพียโซเซรามิกมาใช้ลด การสั่นเนื่องจากเนื้อที่ ๆ จำกัดทำให้วิธีการนี้เหมาะสมและไม่ซับซ้อนใน การนำไปใช้ปฏิบัติจริง หรือการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางการกีพาทาง การค้า [6] ที่การใช้งานต้องเกิดสภาวะการสั่นที่รุนแรง

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะได้ศึกษาถึงการนำวัสดุเพียโซอิเลกทริกที่ เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า มาเป็นกลไกควบคุมการสั่นของแผ่นเรียบบาง เพื่อศึกษาถึง ประสิทธิภาพการลดการสั่นเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิม อย่างแผ่นชั้นการหน่วงบังคับ รวมทั้งการใช้แผ่นเพียโซเซรามิกมาเสริม การบังคับร่วมกับแผ่นชั้นการหน่วง แบบจำลองไฟไนด์อิลิเมนต์ของ แผ่นเรียบบาง ใช้เพื่อออกแบบวิธีการติดตั้งแผ่นการหน่วงรวมทั้งระบุ โหมดการสั่นที่ใช้เพื่อออกแบบวงจรไฟฟ้าในการแปลงพลังงาน

#### 2. ทฤษฎี

การศึกษาในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาจำลองเชิงตัวเลขการทำงาน ของวงจรเชื่อมต่อไฟฟ้า (Shunted circuit) ที่จะออกแบบเพื่อใช้ดึง พลังงานการสั่นจากแผ่นเพียโซเซรามิก ว่ารูปแบบที่เหมาะสมในการ เชื่อมต่อควรจะเป็นแบบใด อีกทั้งในการออกแบบวงจรต้องคำนึงถึง ความยากง่ายในการจูน (Tuning) ของวงจรที่ใช้งานจริงโดยแบบจำลอง ไฟในต์อิลิเมนต์ของแผ่นเรียบบางจะใช้ เพื่อระบุโหมดความถี่ต่ำที่สนใจ เพื่อลดระงับการสั่น

2.1 การทำงานของวัสดุเพียโซอิเลกทริกในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ดุณสมบัติที่เรียกว่า Piezoelectricity เป็นปรากฏการณ์เบื้องต้นใน การปฏิสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับทางกล ซึ่งเป็นการแปลง รูปพลังงาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญในการนำวัสดุเพียโซอิเลกทริกมา ประยุกต์ใช้ คือ คุณสมบัติ electromechanical coupling coefficient ซึ่ง การนิยามคุณสมบัตินี้ จะต้องกำหนดความสัมพันธ์ให้ชัดเจนว่าทิศทาง ของแรงหรือการเคลื่อนที่ทางกล กับ ขั้วแรงดันทางไฟฟ้าที่สนใจจะอยู่ ในทิศทางใด โดยค่า coupling factor, k นี้สามารถนิยามได้ว่าคือ

 k<sup>2</sup> = (พลังงานทางกลที่เก็บไว้) / (พลังงานทางไฟฟ้าที่จ่ายให้) สำหรับแผ่นเพียโซเซรามิกที่ใช้จะกำหนดทิศทางแรงทางกลกระทำใน ทิศทางการยึดตัวตามแนวแผ่น และให้แรงดันไฟฟ้าออกมาในทิศทางตั้ง ฉากกับแนวแผ่นหรือที่ขั้วแผ่นอิเลกโทรดบนล่าง ซึ่งการเลือกใช้ แผ่นเพียโซเซรามิกควรให้การการแปลงพลังงานในทิศทาง 1 ไป 3 หรือย้อนกลับคือ 3 ไป 1 ให้มีค่าสูง (k<sub>31</sub>)



รูปที่ 1 แผ่นเพียโซเซรามิกที่มีแผ่นอิเลกโทรด บน-ล่าง (ทิศทาง 3) และ รับแรงตามแนวแกนแผ่น (ทิศทาง 1) [Piezo, Inc.]

### 2.2 การออกแบบวงจรเชื่อมต่อแผ่นเพียโซเซรามิก

เนื่องจากการทำงานของเพียโซเซรามิกเปรียบได้กับ ตัวเก็บ ประจุไฟฟ้า (Capacitance) ดังนั้นการออกแบบเพื่อดึงพลังงานจากการ สั่นสะเทือนที่แปลงเป็นประจุทางไฟฟ้าสามารถที่จะปล่อยออกเป็นในรูป ของพลังงานความร้อนผ่านตัวต้านทานที่มาต่อคร่อม ซึ่งการต่อแบบนี้ เรียกว่าเป็นวงจร RC ซึ่งเหมือนกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้าเชื่อมต่อกับเพียโซเซรามิก A) วงจร RC B) วงจร RLC ขนาน C) วงจร RLC อนุกรม

ฉะนั้นในการออกแบบวงจรนี้จะมีการคำนวณค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency) ของวงจรกรอง โดยเป็นความถี่ในช่วงโหมดการสั่นสะเทือน ของโครงสร้างที่สนใจ หรือเป็นไปตามสมการนี้ [6]

$$\omega = \frac{\sqrt{1 - k_{31}^2}}{RC_{piezo}}$$
(1)

โดยที่ C<sub>piezo</sub> เป็นสัมประสิทธิ์การเก็บประจุของดัวเพียโซเซรามิกที่ได้ จากผู้ผลิต และ R เป็นค่าความด้านทานไฟฟ้า ซึ่งการจูนวงจรดัด ความถี่นี้จะลดพลังงานการสั่นตลอดช่วงความถี่ เหมือนกับวงจรกรอง

(8)

ความถี่ต่ำทั่วไป ในการลดขนาดการสั่นเฉพาะความถี่ที่สนใจอาจจะใช้ วงจร RLC ที่สามารถเลือกจูนความถี่ที่สนใจเฉพาะเพื่อดึงพลังงานทิ้งที่ ตัวต้านทานได้ ซึ่งเป็นได้สองรูปแบบคือตัวต้านทาน R และตัว เหนี่ยวนำ L ต่อขนานกัน หรือ ต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2

## 2.3 พลศาสตร์ของแผ่นเรียบบางติดแผ่นเพียโซเซรามิกเชื่อมต่อ วงจรไฟฟ้า

## พิจารณาว่าถ้าการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางกล กับวงจร ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับเพียโซเซรามิก สามารถเกิดการกระตุ้นจากแรงดัน ทางไฟฟ้าภายนอกได้เป็น V<sub>a</sub>(s) และจากแรงดันย้อนกลับจากวงจร เชื่อมต่อ V<sub>z</sub>(s) ดังนั้นการตอบสนองจากเพียโซเซรามิกเขียนได้ดังนี้ [7]

$$V(s) = G_{va}(s)V_{a}(s)+G_{vv}V_{z}(s)$$
(2)

โดย G<sub>va</sub>(s) และ G<sub>vv</sub>(s) เป็นฟังก์ชั่นถ่ายโอน และจาก Kirchhoff's law

 $V(s) = G_{va}(s) / (1 + G_{vv} K(s))$ 

$$\begin{split} &V_z(s) = I(s)Z(s) \eqno(3) \\ &V_z(s) = V(s) - (1/(sC_{\text{piezo})}) \eqno(3) \end{split}$$

หรือ โดยที่

$$K(s) = -Z(s) / (Z(s)+1/((sC_{piezo})))$$
 (5)

(4)

และถ้าตัวกระตุ้นกระทำกับเพียโซเซรามิกตัวเดียวกันที่จะทำหน้าที่ เชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า ดังนั้น G<sub>vv</sub>(s) = -G<sub>va</sub>(s) โดยที่ฟังก์ชั่นถ่ายโอน, G<sub>va</sub>(s)

$$G_{va}(s) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha_k}{s^2 + 2\zeta_k \omega_k s + \omega_k^2}$$
(6)

โดย  $\alpha_k$  เป็นค่า Piezo constant ณ โหมดการสั่น k ใดๆ



รูปที่ 3 การปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางกลกับวงจรทางไฟฟ้า ของเพียโซเซรามิก

ซึ่งถ้าวงจรเชื่อมต่อที่ใช้เป็นแบบ RL ต่ออนุกรมกัน ดังนั้น

$$s) = R + sL \tag{7}$$

ซึ่งการจำลองการตอบสนองในการต่อวงจรแบบอนุกรม เข้ากับ โครงสร้างทางกลที่ติดเพียโซอิเลกทริกจะแสดงในการศึกษาเชิงตัวเลข ดังในหัวข้อถัดไป

### การศึกษาเชิงตัวเลข

การจำลองเชิงตัวเลข จะจำลองประสิทธิภาพการออกแบบวงจร RL ที่ต่อเชื่อมเข้ากับเพียโซเซรามิกเพื่อลดการสั่น โดยการจำลองจะ แบ่งผลการศึกษาเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ RL ต่อขนานกัน และกรณีที่ RL ต่ออนุกรมกัน วงจรดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ จำลองว่าเป็นเพียโซเซรามิก โดยกำหนดค่า Cpiezo ไว้ และทำการ คำนวณค่าความต้านทาน R จากที่ทราบความถี่ธรรมชาติของระบบ mass-spring-damper ระดับการเคลื่อนที่เดียว โดยคำนวณจากสมการ ที่ (1) และค่าตัวเหนี่ยวนำ L คำนวณได้จาก อย่างไรก็ตามการจำลองนี้ ได้เลือกแบบจำลองระบบการสั่นก้อนมวลเดียวที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำ ประมาณ 0.712 Hz เพื่อการแสดงเปรียบเทียบรูปแบบการต่อวงจรทั้ง 2 กรณีที่ต้องการศึกษา ซึ่งทำให้ค่าเวลาคงที่ (Time constant) ในวงจร เชื่อมด่อใช้เวลานาน



รูปที่ 4 ผลการจำลองระบบระดับการเคลื่อนที่เดียวที่เชื่อมต่อเพียโซอิ เลกทริกกับวงจร RL (บน) ต่อขนาน (ล่าง) ต่ออนุกรม

ผลการจำลองดังแสดงเป็น การตอบสนองในแกนเวลากับขนาดการสั่น โดยเส้นบางเป็นระบบที่ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับวงจร RL และเส้นทึบ เป็นการต่อระบบกับวงจร RL เห็นได้ชัดเจนว่าวงจร RL ต่อแบบอนุกรม ให้ประสิทธิภาพในการลดการสั่นได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ไหล ผ่านตัวต้านทานไม่ได้มีการแบ่งเหมือนเช่นวงจรต่อขนาน (รูปที่ 2) ทำ ให้สามารถปล่อยพลังงานได้ดีกว่า จากผลการจำลองนี้จะเลือกใช้วงจร RL ต่ออนุกรมกันเพื่อทดสอบปฏิบัติในห้องปฏิบัติการ

### 4. การทดลองในห้องปฏิบัติการ

การทดลองในห้องปฏิบัติการแบ่งได้ออกเป็น 2 การทดลอง หลัก ๆ ตามวิธีการกระตุ้นการสั่นที่ใช้ คือในแบบแรกจะเป็นการทดสอบ การสั่นของแผ่นเรียบบางแบบแขวนห้อยอิสระ และการทดสอบการสั่น ของแผ่นเรียบบางแบบยึดตรึงขอบทั้งสี่ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียด ดังต่อไปนี้

### 4.1 การทดสอบแผ่นเรียบบางแขวนห้อยอิสระ

ดังรูปที่ 5 แสดงแผ่นเรียบบางด้านเท่าที่แขวนห้อยอิสระ ซึ่ง โหมดการสั่นที่สนใจจากการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์จะเป็นโหมด ที่สาม ที่สามารถสร้างเสียงรบกวนออกมาได้ โดยมีความถี่การสั่นจาก การคำนวณเท่ากับ 239 Hz อย่างไรก็ตามผลการทดสอบพบว่า

ค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นเรียบบางนี้อยู่ประมาณ 260 Hz ขั้นตอน การออกแบบวงจรสรุปเป็นตารางที่ 1 ซึ่งสามารถดูได้จาก เอกสารอ้างอิง [8] โดยเพียโซเซรามิกที่ใช้เป็นของบริษัท Piezo, Inc. รุ่น PSI 5A4E ขนาด 72.5 x 72.5 x 0.508 มม. และมีค่า k<sub>31</sub> = 0.35 และแผ่นเรียบบางอลูมิเนียม ขนาด 255 x 255 x 3 มม. เนื่องจากค่าตัว เหนี่ยวนำนั้นไม่มีขนาดที่พอดีที่จะใช้ในทางปฏิบัติ จึงใช้วงจรจำลอง แทน ซึ่งมีทั้งแบบวงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) หรือวงจร General Impedance Converter ซึ่งจะนำมาใช้ในการทดสอบนี้ เนื่องจาก สามารถจูนวงจรได้ง่าย โดยค่า L จะเท่ากับ (R1.R3.R4.C1)/R2 ดังรูปที่ 6 โดยค่า R คงที่ทั้งหมดใช้ค่า 10 kΩ และ C1 = 68 nF



รูปที่ 5 แผ่นเรียบบางจัตุรัสติดแผ่นเพียโซเซรามิกที่แขวนห้อยอย่าง อิสระ และรูปร่างการสั่นในโหมดที่สามของโครงสร้าง



รูปที่ 6 วงจร General Impedance Converter ที่ใช้จำลองการทำงาน ของตัวเหนี่ยวนำ L

ค้าอธิบาย การค้านวณ	ค่าการออกแบบ			
1. ความถี่โหมดแรก, ω <sub>ο</sub> (ทดสอบ)	2π(262) rad/s			
2. ความถี่โหมดแรก short circuit แผ่น	2π(260) rad/s			
Piezoceramic, $\omega_{ m S}$ (ทดสอบ)				
3. ค่าตัวเก็บประจุ ของ PZT วัดได้, C <sub>s</sub>	190 nF			
4. ค่าความต้านทาน, R	3.2 k $\Omega$			
(วงจร RC shunting)				
5. ค่าความต้านทาน, R <sub>opt</sub>	616 Ω			
(วงจร RLC shunting)				
6. ค่าตัวเหนี่ยวนำ, L <sub>opt</sub>	2.2 H			
(วงจร RLC shunting)				
7. ค่าความต้านทานปรับค่าได้, R <sub>2</sub>	31 kΩ			
(วงจร RLC shunting)				

ตารางที่	1	สรปการคำนวณวงจร	RI C	ของแผ่นเรียบบางเ	แขวนอิสระ
		61 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10		TTT 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	ы памацы а



รูปที่ 7 กราฟตอบสนองความถี่ของแผ่นเรียบบางที่ต่อเชื่อมวงจรไฟฟ้า แบบ RC และ RLC อนุกรม

ผลการทดสอบตามรูปที่ 7 โดยเป็นการกระตุ้นให้แรงกับแผ่นเรียบบาง ด้วยวิธีกระแทกด้วยค้อนที่ติดหัววัดแรง และติดตัววัดความเร่งไว้บน แผ่นเรียบบาง ฟังก์ชั่นดอบสนองความถี่ (FRF) ระหว่างสัญญาณเข้า และออกแผ่นเรียบบางด้วยการแปลง FFT จากรูปแสดงให้เห็นว่าการ เชื่อมต่อเพียโซอิเลกทริกเข้ากับตัวต้านทาน (RC) (เส้นประ) กราฟ ตอบสนองความถี่ จะมีขนาดการสั่นลดลงที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ ธรรมชาติ รวมทั้งยอดที่ความถี่ธรรมชาติด้วย เป็นลักษณะเดียวกับการ ทำงานของวงจรกรองความถี่ แต่สำหรับวงจรRL จะยกความถี่ นอกเหนือจากที่จูนไว้ให้มีขนาดสูงขึ้นมาเหมือนกับการทำงานของ Absorber ทางกล การลดขนาดที่เห็นในรูปที่ 7 เป็นหน่วยเดซิเบล โดย ที่ขนาด 3 dB จะหมายถึงการลดขนาดสองเท่าในสเกลเซิงเส้น

อย่างไรก็ตาม การทดสอบกับแผ่นเรียบบางที่ดิดแผ่นชั้นการ หน่วงบังคับ ไม่สามารถแสดงผลการทดสอบได้กรณีการให้แรงแบบ กระแทก เนื่องจากวงจรไฟฟ้ามีค่า time constant ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะ คงตัวการทำงานของวงจร และการตอบสนองจากแผ่นเรียบบางที่ติด แผ่นชั้นการหน่วงจะมีการสั่นหายไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่เห็นถึงการ ทำงานของวงจรเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการทดสอบเป็นจับยึดตรึง แผ่นเรียบบางทั้งสี่ด้านและติดตั้งบนหัวเขย่า (Shaker)

## 4.2 การทดสอบแผ่นเรียบบางยึดตรึงขอบ

ในการทดสอบนี้จะทำการติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับ โดย ชั้นการหน่วงเป็นวัสดุ Viscoelastic ของบริษัท 3M รุ่น ISD112 ความ หนา 0.0508 มม. สำหรับแผ่นบังคับใช้วัสดุสแตนเลสแผ่นหนา 0.3 มม. โดยพื้นที่การติดแผ่นชั้นการหน่วง 200 x 200 มม. โดยแผ่นภาพการ เชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9 การติดแผ่นเพียโซอิ-เลกทริกของแผ่นเรียบบางที่มีชั้นการหน่วงบังคับ จะติดในด้านตรงกัน ข้ามกับที่ติดแผ่นชั้นการหน่วง



รูปที่ 8 ชุดทดสอบการสั่นกระตุ้นแผ่นเรียบบาง และรูปร่างการสั่นที่ สนใจในการออกแบบวงจรระงับการสั่น



รูปที่ 9 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแผ่นเรียบบาง

โหมดการสั่นที่สนใจและทำการคำนวณจากโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ ค่าความถี่ 450 Hz กรณีไม่มีแผ่นชั้นการหน่วงบังคับ ฉะนั้นต้อง ออกแบบวงจรเชื่อมต่อใหม่ โดยการทดสอบจะเริ่มตั้งแต่ 1. แผ่นเรียบ บางที่ไม่มีแผ่นชั้นการหน่วง 2. แผ่นเรียบบางเชื่อมต่อแบบวงจร RC 3. แผ่นเรียบบางเชื่อมต่อแบบวงจร RLC 4. แผ่นเรียบบางติดแผ่นชั้นการ หน่วง 5. แผ่นเรียบบางติดแผ่นชั้นการหน่วงเชื่อมต่อแบบวงจร RC และ 6. แผ่นเรียบบางติดแผ่นชั้นการหน่วงเชื่อมต่อแบบวงจร RLC ตารางที่ 2 สรุปค่าการคำนวณออกแบบและอุปกรณ์ในวงจรเชื่อมต่อ การกระตุ้นจะให้สัญญาณกวาดความถี่จาก 350 – 520 Hz เฉลี่ย 16 ครั้ง

d				, A	a a
ดารางท	2	สราโการด้านากเางจร	RIC	ของแผ่นเรยาเร	การเดตรงของเ
41 1 0 1 0 1 1	~	21 2 D I I 1 2 I I I PO 2 6 PO 2 0 0 2	I LO		

คำอธิบาย การคำนวณ	แผ่นเรียบบาง	แผ่นเรียบบาง
		ติดแผ่นชั้นการ
		หน่วง
1. ความถี่โหมดแรก, ω <sub>ο</sub>	2π(440) rad/s	2π(454) rad/s
2. ความถี่โหมดแรก short	2π(436) rad/s	2π(450) rad/s
circuit แผ่น		
Piezoceramic, $\omega_s$		
3. ค่าตัวเก็บประจุ ของ	151 nF	154 nF
PZT วัดได้		
4. ค่าความต้านทาน, R	2.4 kΩ	2.3 kΩ
(วงจร RC shunting)		
5. ค่าความต้านทาน, R <sub>opt</sub>	503 Ω	470 Ω
(วงจร RLC shunting)		
6. ค่าตัวเหนี่ยวนำ, L <sub>opt</sub>	0.98 H	0.90 H
(วงจร RLC shunting)		
7. ค่าความต้านทานปรับ	75 k $\Omega$	69 k $\Omega$
ค่าได้, R <sub>2</sub>		
(วงจร RLC shunting)		



รูปที่ 10 การตอบสนองแกนความถี่แผ่นเรียบบางติดแผ่นชั้นการหน่วง (บน)ไม่มีวงจร (กลาง)วงจร RC (ล่าง)วงจร RLC (linear scale mag.)

ผลการทดสอบจากการเปรียบเทียบขนาดการสั่นที่ลดลงได้ ดั้งแต่กรณี ที่ 1 ถึง 6 ดังแสดงระดับการสั่นจากการตอบสนองความถี่ และร้อยละ การสั่นที่ลดลงได้เปรียบเทียบกับกรณีแผ่นเรียบบางไม่มีการปฏิบัติใด ๆ หรือกรณีทดสอบที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3 และแสดงเป็นกราฟแท่งดัง ในรูปที่ 11 ข้อสังเกตคือระดับการสั่นที่ลดได้ในแผ่นชั้นการหน่วงนั้นจะ มากกว่ากรณีแผ่นเรียบบางเปล่าที่เชื่อมต่อวงจร RLC คือร้อยละ 79 กับ ร้อยละ 59 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำหนักของแผ่นเรียบบางเปล่า จะน้อยกว่า และสามารถทำงานได้ช่วงอุณหภูมิกว้างกว่าแผ่นชั้นการ หน่วงบังคับ และการระงับการสั่นจะลดได้สูงสุดถึงร้อยละ 89 เมื่อดิด วงจรเชื่อมต่อ RLC กับแผ่นเรียบบางที่มีแผ่นชั้นการหน่วงบังคับไว้

		844 7
คำอธิบาย วิธีปฏิบัติ	ระดับการสั่น	เปรียบเทียบ ร้อยละ
ระงับการสั่น	(หน่วย)	ระดับการสั่นที่ลดได้
		เทียบกับแผ่นเรียบ
		บางเปล่า
1. แผ่นเรียบบางเปล่า	93.4	0%
2. แผ่นเรียบบาง	56.6	39%
ติดวงจร RC shunting		
3. แผ่นเรียบบาง	38.4	59%
ติดวงจร RLC		
shunting		
4. แผ่นเรียบบางติด	19.4	79%
แผ่นชั้นการหน่วง		
5. แผ่นเรียบบางติด	15.7	83%
แผ่นชั้นการหน่วง		
ติดวงจร RC shunting		
6. แผ่นเรียบบางติด	11.9	87%
แผ่นชั้นการหน่วง		
ติดวงจร RLC		
shunting		

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดการสั้นวิธีปฏิบัติต่างๆ



รูปที่ 11 ร้อยละของระดับการสั่นที่สามารถลดลงได้ของแต่ละวิธีปฏิบัติ เทียบกับกรณีแผ่นเรียบบางที่ไม่มีการปฏิบัติใดๆ

#### 5. สรุป

การศึกษาเปรียบเทียบวิธีปฏิบัติเพื่อลดการสั่นของโครงสร้างผนัง บาง ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นแผ่นเรียบบางอลูมิเนียม โดยแบ่งการศึกษาเป็น แผ่นเรียบบางที่ดิดแผ่นเพียโซเซรามิกเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า และแผ่น เรียบบางที่มีแผ่นชั้นการหน่วงบังคับพร้อมเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า ซึ่ง วิธีการติดทั้งแผ่นชั้นการหน่วง และติดแผ่นเพียโซเซรามิกที่เชื่อมต่อ วงจรแบบ RLC ให้ผลในการระงับการสั่นได้ถึงร้อยละ 89 อย่างไรก็ตาม วิธีการลดการสั่นแบบใช้แผ่นเพียโซเซรามิกนี้ มีการทำงานร่วมกับ วงจรไฟฟ้าที่มีค่าเวลาล่าช้าก่อนเข้าสู่ค่าคงตัวอยู่ ซึ่งจะไม่เหมาะกับการ ประยุกต์ปัญหาการสั่นแบบชั่วครู่ (Transient) แต่จะทำงานได้ดีกับ โครงสร้างที่เผชิญการสั่นอย่างต่อเนื่อง เช่นการกระพือ ของโครงสร้าง ผนังบาง จะช่วยลดการล้าตัวและเสียงรบกวนที่เกิดจากโครงสร้างได้

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ขอขอบคุณ บริษัท 3M (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์แผ่นชั้นการหน่วง (ISD112) สำหรับ งานวิจัยนี้ และขอบคุณเจ้าหน้าที่และผู้ช่วยวิจัยของศูนย์วิจัย RACE ทุกท่าน

#### เอกสารอ้างอิง

[1] C.T. Sun and Y.P. Lu, 'Vibration Damping of Structural Elements.', Prentice Hall, 1<sup>st</sup> edition, 1995

[2] C. Chantalakhana and R. Stanway Active Constrained Layer Damping of Clamped-Clamped Plate Vibrations, Journal of Sound and Vibration, 2001, Vol. 241, pp. 755-777.

[3] R. L. Dai and W. H. Liao, 'Modeling and Implementation of a Plate with Enhanced Active Constrained Layer Damping.', Proceedings of The Eleventh International Congress on Sound and Vibration, 2004, pp. 1821-1828.

[4] S. Y. Wu, T. L. Turner and S. A. Rizzi, 'Piezoelectric shunt vibration damping of an F-15 panel under high-acoustic excitation.', Proc. SPIE Smart Structures and Materials 2000: : Damping and Isolation, 2000, Vol. 3989, p. 276-287.

[5] J.S. Park et al., 'Vibration Reduction of a CD-ROM Drive Base Using a Piezoelectric Shunt Circuit.', Journal of Sound and Vibration, 2004, Vol. 269, pp 1111-1118.

[6] E. Bianchini and R. Spangler, 'The use of piezoelectric devices to control snowboard vibrations,' in Proc. SPIE Conf. Integrated Systems, 1998, vol. 3329, pp. 106–114.

[7] D. Niederberger et al., 'Online-Tuned Multi-Mode Resonant Piezoelectric Shunt for Broadband Vibration Suppression.', 3rd IFAC Symposium on Mechatronic Systems, September 6-8, Manly Beach, Sydney, Australia, 2004, pp. 301-306

[8] K. M. Jeric 'An Experimental Evaluation of the Application of Smart Damping Materials for Reducing Structural Noise and Vibrations.', Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1999.