

**การปรับปรุงเสถียรภาพของตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบ  
เพื่อลดความสั่นสะเทือนของคาน**  
**Stability Improvement of Negative Velocity Feedback Controller  
to Suppress Beam Vibrations**

จักร จันทลักขณา

ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนน พิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร. 02-9132500-24 ต่อ 8323, 8308, โทรสาร. 02-58700216 กต 111, E-Mail address: chak@kmitnb.ac.th

Chak Chantalakhana

Research center of Advanced Computational Engineering Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering, KMITNB

1518 Pibulsongkram road Bangsue Bangkok 10800

Tel. 02-9132500-24 Ext. 8323, 8308, Fax. 02-5870026 Ext. 111, E-Mail address: chak@kmitnb.ac.th

#### บทคัดย่อ

เสถียรภาพตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยความเร็วค่าลบซึ่งอาศัยคู่ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมและวัดหยังสัญญาณที่ติดตั้งบนโครงสร้าง ณ ตำแหน่งเดียวกันเพื่อควบคุมความสั่นสะเทือนของคานอลูมิเนียม โดยทำการศึกษาถึงเสถียรภาพเมื่อรวมพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจากผลการจำลองทางการทดลองเชิงตัวเลขพบว่าในโครงสร้างที่มีความหน่วงน้อยจะมีโอกาสที่โมดความสั่นสะเทือนสามารถถูกรบกวนจากสัญญาณป้อนกลับค่าลบให้เกิดความไม่เสถียรขึ้นได้เนื่องจากข้อจำกัดด้านการตอบสนองพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นเอง การปรับปรุงเสถียรภาพของตัวควบคุมนี้ได้ปฏิบัติโดยเพิ่มความหน่วงเริ่มต้นให้กับโครงสร้างเพื่อเลื่อนโมดความสั่นสะเทือนจากขอบเขตใกล้มาร์จินไปอยู่ทางซ้ายของระนาบเอสเพื่อป้องกันการรบกวนดังกล่าว แผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับได้นำมาใช้ในการปฏิบัติเพิ่มความหน่วงให้กับคานยื่นนี้ จากการทดลองเชิงตัวเลขได้แสดงผลตอบสนองจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานยื่นที่รวมพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมและยืนยันผลที่ได้กับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งเสถียรภาพของตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบนี้นี้เพิ่มขึ้นจากการติดแผ่นชั้นการหน่วงเข้าไปในโครงสร้างและรูปแบบคานยื่นที่ใช้ศึกษานี้ได้นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับความสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟสำหรับโครงสร้างตึกสองชั้นจำลองเพื่อแสดงการนำตัวควบคุมไปปฏิบัติใช้

#### Abstract

The stability of the negative velocity feedback controller performed on a structure with collocated actuator and sensor to control aluminum beam vibrations has been studied. The effect of the shaker dynamics included in the mathematical model has been simulated to the stability of the controller. For a lightly damped structure, it is that the vibration modes could be disturbed from the feedback signal to cause instability due to the limit of shaker dynamics. Improvement of the controller has been performed by augmenting the inherit damping to shift all the vibration modes to the far left on the s-plane to prevent such a disturbance. The constrained damping layer is used to add the structural damping. Results from the simulation obtained from the cantilever beam finite element model accounting for shaker dynamics are verified with those from the laboratory testing. The stability of the negative velocity feedback controller has been improved with the added damping layer to the structure. This cantilever beam has been used as the active vibration absorber for two-story building to demonstrate the application of the controller.

## 1. บทนำ

ตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบเป็นตัวควบคุมอย่างง่ายในการลดความสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกลด้วยการใช้อุปกรณ์กระตุ้น (shaker) เนื่องจากการป้อนความเร็วค่าลบให้กับอุปกรณ์กระตุ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มสัมประสิทธิ์ความหน่วงเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งการควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อติดตั้งเซ็นเซอร์ (sensor) และชุดกระตุ้นควบคุม (actuator) นั้นอยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกัน (collocated sensor/actuator) [1] แต่กระนั้นก็ได้มีผู้ศึกษาต่อมา [2] ว่าถ้าคำนึงถึงพลศาสตร์ของตัวกระตุ้นควบคุมเข้าไปกับแบบจำลองโครงสร้างทางกลที่ต้องการควบคุมแล้วจะพบว่าอาจเป็นไปได้ที่ระบบควบคุมจะทำให้โครงสร้างไม่เสถียร

ในงานวิจัยต่อมา [3] พบว่าปัญหา spillovers ที่มีผลต่อความเสถียรของตัวควบคุมโมดัล (modal controller) ที่ใช้ในการควบคุมโมดความสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางกลโดยโมดที่ไม่ได้ถูกควบคุมสามารถถูกกระตุ้นได้ อีกทั้งสัญญาณตรวจวัดจะได้ทั้งข้อมูลของโมดที่ควบคุมและไม่ได้ควบคุมปนมาซึ่งจะทำให้สามารถรบกวนต่อระบบที่ถูกควบคุมจนทำให้เกิดความไม่เสถียรของโครงสร้างได้ [4] โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างที่มีความหน่วงในตัวเองน้อยหรือนั้นคือเป็นโมดหรือโพลของระบบแบบ marginally stable ในระนาบเอส (s-plane) ซึ่งโพลเมื่อถูกรบกวนจะสามารถเคลื่อนตัวไปทางขอบเขตเสถียร (ด้านซ้ายของระนาบเอส) หรือขอบเขตไม่เสถียร (ด้านขวาของระนาบเอส) ก็ได้ โดยการใช้วิธีเพิ่มความหน่วงเริ่มต้น (inherit damping) ด้วยอุปกรณ์การหน่วงเช่น กระจบอกไฮดรอลิกน้ำมัน หรือที่ใช้แผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับ (constrained damping layer) ในโครงสร้างผนังบางเช่นคานและแผ่นเรียบบาง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการปรับปรุงเสถียรภาพของการควบคุมความสั่นสะเทือนในคานยื่น (cantilever beam) ที่ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบซึ่งเข้าร่วมกับแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับโดยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานยื่นที่ติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับและพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นจะถูกพิจารณาและพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางผลตอบสนองของโครงสร้างโดยการทดลองถูกออกแบบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขและการประยุกต์ใช้

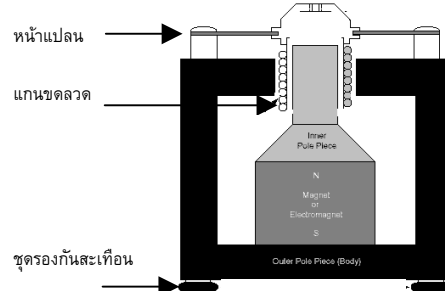
## 2. ทฤษฎี

ในส่วนทฤษฎีจะประกอบด้วยการศึกษาพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้น (shaker) ที่เข้าร่วมกับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของคานยื่นที่ติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับ ทฤษฎีตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบและเกณฑ์ความเสถียร

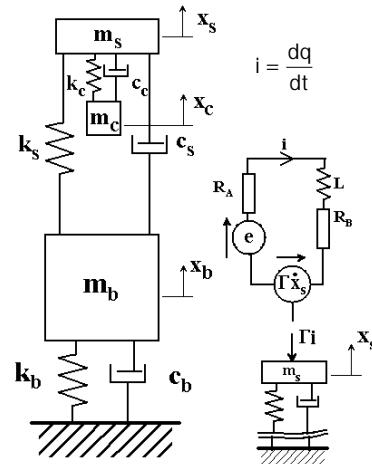
### 2.1 พลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้น

อุปกรณ์กระตุ้นแบบแม่เหล็ก (electromagnetic shaker) ซึ่งหลักการทำงานเพื่อสร้างสัญญาณการสั่นสะเทือนจะคล้ายกับการทำงานของลำโพงที่ขับเคลื่อนผ่านขดลวดตัดสนามแม่เหล็ก ภาพหน้าตัดของอุปกรณ์กระตุ้นดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 1 โดยแต่ละชิ้นส่วนสามารถจำลองเป็นระบบมวล-สปริง-ตัวหน่วงที่มีระดับชั้นความอิสระ (degree of freedom) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งมีระดับชั้นความอิสระเป็นระยะ

เคลื่อนที่ในแนวแกนของหน้าแปลน (suspension table) แกนขดลวด (coil) และชุดรองกันสะเทือน (base isolator) รวมเท่ากับ 3 ระดับและอีก 1 ระดับชั้นความอิสระจากวงจรไฟฟ้าขดลวดแม่เหล็ก สำหรับแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์กระตุ้นจะต้องคำนึงถึงความต้านทานและเหนี่ยวนำของแกนขดลวดด้วยซึ่งรูปแบบสมการแบบจำลองที่เข้าร่วมจากระบบทางกลและไฟฟ้าของอุปกรณ์กระตุ้นแสดงดังในรูปแบบสมการเมตริกซ์ดังนี้ [5,6]



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์กระตุ้นแบบแม่เหล็ก



รูปที่ 2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นแบบแม่เหล็ก

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_b \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_c & -c_c & -c_s & 0 \\ -c_c & c_c & 0 & -\Gamma \\ -c_s & 0 & c_b + c_s & \Gamma \\ 0 & \Gamma & -\Gamma & R_A + R_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_c \\ \dot{x}_b \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_c & -k_c & -k_s & 0 \\ -k_c & k_c & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & k_s + k_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ x_c \\ x_b \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ e \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยสมการที่(1) แสดงมวล  $m$  สัมประสิทธิ์ความหน่วง  $c$  สัมประสิทธิ์เชิงตั้งสปริง  $k$  และระยะขจัด  $x$  ที่มีตัวห้อย  $s$  แทนหน้าแปลน  $c$  แทนแกนขดลวดและ  $b$  แทนชุดรองกันสะเทือน สำหรับปริมาณทางไฟฟ้าแสดงด้วย ประจุ  $q$  แรงดันไฟฟ้า  $e$  ความต้านทาน  $R_A$  และ  $R_B$  และค่า

คงที่  $\Gamma$  ซึ่งเท่ากับพลาซม์แม่เหล็กคุณสมบัติความยาวขดลวดซึ่งระยะเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งของหน้าแปลนจะใช้เป็นจุดที่กระทำร่วมกันกับโครงสร้างที่ถูกควบคุมต่อไป

## 2.2 แบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์คานยันติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับ

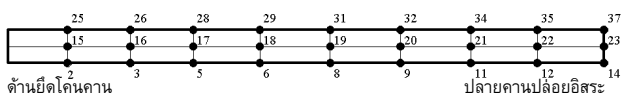
คานอลูมิเนียมยาว 45 ซม. x กว้าง 2.54 ซม. X หนา 0.3 ซม. จะใช้เป็นโครงสร้างหนึ่งบางในการทดสอบวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของการควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบซึ่งแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของคานยันนี้จะพิจารณาสำหรับกรณีที่ไม่ติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับ (constrained damping layer) และกรณีที่ไม่ติดแผ่นหน่วงซึ่งคานจะถูกแบ่งอิลิเมนต์ตามด้านยาวเป็น 9 ส่วนและด้านกว้าง 2 ส่วนเท่าๆกันตั้งในรูปที่ 3 โดยแต่ละอิลิเมนต์เป็นอิลิเมนต์แบบแผ่นเรียบบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า [7] โดยมี 4 จุดโนดและแต่ละโนดมีระดับชั้นความอิสระเท่ากับ 7 กรณีติดแผ่นชั้นการหน่วงและเท่ากับ 5 กรณีไม่ติดแผ่นชั้นการหน่วง และเพื่อให้เหมาะสมต่อการคำนวณเชิงตัวเลขในการจำลองระบบจำนวนระดับชั้นความอิสระจะถูกลดจำนวนลงจาก 195 ขึ้นไปเป็น 37 ชั้น (กรณีที่มีแผ่นชั้นการหน่วง) และแปลงรูปเมตริกซ์ความหน่วงที่อยู่ในรูปเมตริกซ์ความแข็งดิ่งสปริงค่าเชิงซ้อนในแยกออกเป็นเมตริกซ์แข็งดิ่งสปริงค่าจริงและเมตริกซ์ความหน่วงค่าจริง [7] ซึ่งจะเหมาะสมต่อการคำนวณเชิงตัวเลขของสมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบสเปซเฟส (state space):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x} \end{cases} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{x} \end{cases} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}^{-1} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{f}(t) \quad (2)$$

หรือในรูปอย่างย่อ

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{f}(t) \quad (3)$$

โดยที่  $\mathbf{M}, \mathbf{D}$  และ  $\mathbf{K}$  คือเมตริกซ์มวล ความหน่วงและความแข็งดิ่งสปริงของคานอลูมิเนียมติดแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับตามลำดับซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $n \times n$  โดย  $n$  คือจำนวนโนด (node) ในเวกเตอร์ระยะขจัด  $\mathbf{x}$  ซึ่งในที่นี้มีทั้งหมด 37 ชั้นความอิสระโดย 27 ชั้นความอิสระเป็นการเคลื่อนที่ในแนวขวาง (transverse) ของคานยันที่แต่ละโนดและอีก 10 ชั้นความอิสระเป็นการเคลื่อนที่แนวแกนของคานในบางจุดโนด  $\mathbf{B}_0$  เป็นเมตริกซ์สัญญาณเข้าขนาด  $n \times m$  โดย  $m$  คือจำนวนสัญญาณเข้าเมตริกซ์  $\mathbf{P}$  เป็นเมตริกซ์ค่าคงที่  $\mathbf{f}(t)$  เป็นเวกเตอร์แรงกระทำขนาด  $m \times 1$  และ  $\mathbf{I}$  คือเมตริกซ์หนึ่งหน่วยตามแนวทแยงมุม (identity matrix) ขนาด  $n \times n$



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งจุดโนดของระยะขจัดแนวขวางจากแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของคานยัน

## 2.3 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบ

ตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบ (negative velocity feedback) [1] ถูกพิจารณาว่าทำให้ระบบเสถียรโดยไม่มีเงื่อนไข (unconditioned stability) ก็ต่อเมื่อเป็นการติดตั้งจุดวัดสัญญาณความเร็วค่าลบเพื่อป้อน

กลับไปที่อุปกรณ์กระตุ้นที่กระทำ ณ ตำแหน่งเดียวกัน (collocated sensor and actuator) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3) โดยให้สัญญาณออกจากตัวยังสัญญาณความเร็วคือ

$$\mathbf{z}(t) = \overline{\mathbf{C}}\mathbf{Y}(t) \quad (4)$$

โดย  $\overline{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \ \mathbf{0}]$  และ  $\mathbf{C}$  คือเมตริกซ์ที่ยังสัญญาณซึ่งถ้าให้ตัวยังสัญญาณและอุปกรณ์กระตุ้นอยู่เป็นคู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันเสมอดังนั้น  $\mathbf{C} = \mathbf{B}_0^T$  หรือ  $\overline{\mathbf{C}} = \mathbf{B}^T$  สัญญาณออกที่วัดได้  $\mathbf{z}(t)$  จะนำไปใช้เพื่อป้อนกลับค่าลบสำหรับคำสั่งของอุปกรณ์กระตุ้น โดย  $\mathbf{f}(t) = -\mathbf{Q}\mathbf{z}(t)$  โดย  $\mathbf{Q}$  คือเมตริกซ์อัตราขยายขนาด  $m \times m$  ซึ่งถ้าเขียนสมการที่ (3) ใหม่จะได้ว่า

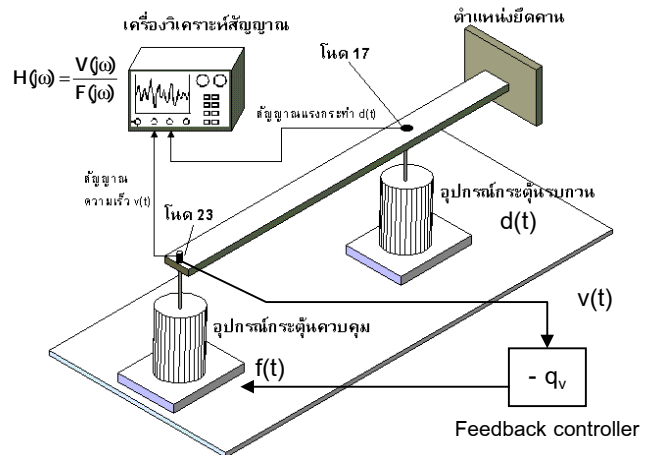
$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Y}} &= \mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{P}(\mathbf{Q}\mathbf{B}^T)\mathbf{Y} \\ \dot{\mathbf{Y}} &= [\mathbf{A} - \mathbf{P}(\mathbf{Q}\mathbf{B}^T)]\mathbf{Y} \end{aligned} \quad (5)$$

ซึ่งจะทำให้เห็นว่าเมตริกซ์ที่แทนระบบ  $\mathbf{A}$  จะถูกบังคับให้โพลของระบบไปอยู่ตามค่าที่ต้องการได้ด้วยการเลือกเมตริกซ์  $\mathbf{Q}$  ให้เหมาะสมที่ซึ่งจะต้องเป็นเมตริกซ์แบบ semi-definite แม้  $\mathbf{Q}$  จะเป็นค่าที่เลือกใดๆก็ได้แต่จะต้องเป็นในลักษณะ full controllability ด้วยจึงจะควบคุมโมดการสั่นสะเทือนได้ โดยถ้าพิจารณาเฉพาะเทอมความหน่วงในสมการที่ (5) จะพบว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ความหน่วงมีค่าเท่ากับ  $\mathbf{D} + (\mathbf{B}_0\mathbf{Q}\mathbf{B}_0^T)$  เทอม  $\mathbf{B}_0\mathbf{B}_0^T$  จะแทนการยกกำลังสองของเมตริกซ์สัญญาณเข้า  $\mathbf{B}_0$  ทำให้เป็นการยืนยันได้ว่ามีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงให้กับเมตริกซ์ระบบเดิม  $\mathbf{A}$

สำหรับกรณีที่ใช้ตัวยังสัญญาณและอุปกรณ์กระตุ้นคู่เดียวเมตริกซ์สัญญาณเข้าจะลดรูปเป็นเวกเตอร์โดยเวกเตอร์แรงกระทำ  $\mathbf{f}(t)$  จะเป็นเพียงชุดคำสั่งควบคุมเดียวและ  $\mathbf{Q}$  จะเป็นอัตราขยายค่าเดียวด้วย

## 3. การทดลองเชิงตัวเลข

รูปที่ 4 แสดงไดอะแกรมของชุดทดลองที่จะใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขโดยที่รวมพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมเข้ากับสมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบสเปซเฟส (สมการที่ (2)) การวัดสัญญาณความเร็วออกที่จุดปลายคาน (โนด 23) และกระตุ้น ณ จุดเดียวกันซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (1) แสดงในตารางที่ 1 และค่าคงที่สำหรับวัสดุต่างๆของคานยันที่ติดแผ่นชั้นการหน่วงแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 4 ลักษณะการต่อชุดทดลองเพื่อการจำลองเชิงตัวเลข

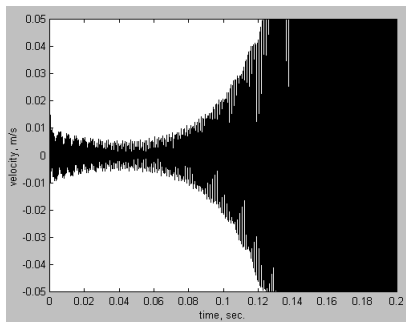
ตารางที่ 1 ค่ารายละเอียดอุปกรณ์กระตุ้นแบบแม่เหล็ก

มวล	$m_c=0.001\text{kg}$	$m_f=65\text{e-}5\text{kg}$	$m_b=0.91\text{kg}$
สัมประสิทธิ์ความหน่วง	$c_c=5\text{kg/s}$	$c_f=5\text{kg/s}$	$c_b=50\text{kg/s}$
ค่าคงที่สปริง	$k_c=5685\text{kN/m}$	$k_f=3150\text{N/m}$	$k_b=10\text{N/m}$
ค่าคงที่ทางไฟฟ้า	$\Gamma=10\text{N/A}$	$R=3\ \Omega$	$L=0.1\ \text{H}$

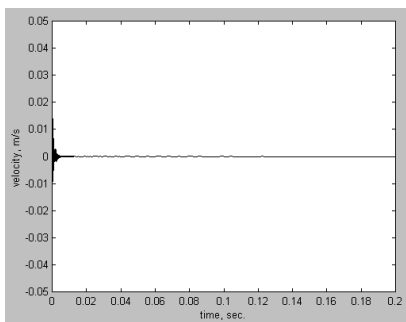
ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางวัสดุของคานแผ่นชั้นการหน่วงและแผ่นบังคับ

ชนิดวัสดุ	ค่า Young Modulus (GPa)	ค่าโมดูลัสการเฉือน (GPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (loss factor)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
คานอลูมิเนียม	45	-	-	2657
Viscoelastic	1.361	0.9135	1.06	1140
เหล็กกล้าไร้สนิม	200	-	-	7000

ผลจากการจำลองเชิงตัวเลขเมื่อใช้คานยื่นที่ไม่ติดแผ่นชั้นการหน่วงและอัตราขยายถูกตั้งไว้ที่ค่าซึ่งทำให้ระบบควบคุมแสดงความไม่เสถียรออกมาดังแสดงในรูปที่ 5 และเมื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่ถูกควบคุมเป็นคานยื่นที่ติดแผ่นชั้นการหน่วงที่โมดูลัสการเฉือนจะอยู่ในรูปค่าเชิงซ้อนเพื่อเพิ่มระดับความหน่วงเริ่มต้นภายในโครงสร้างโดยจะพบว่าทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นดังแสดงผลตอบสนองความเร็วจากโครงสร้างในรูปที่ 6 ซึ่งพอสรุปได้ว่าการเพิ่มความหน่วงเริ่มต้นให้กับโครงสร้างที่มีความหน่วงในตัวเองน้อยจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบป้อนกลับความเร็วค่าลบที่เสถียรภาพของระบบจะถูกรบกวนจากข้อจำกัดพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นเอง ผลจากการทดลองเชิงตัวเลขนี้จะถูกยืนยันด้วยผลการทดสอบโครงสร้างจริงในห้องปฏิบัติการดังในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 5 ความเร็วตอบสนองจากโน้ต 23 จากการปรับจูนโครงสร้างที่ติดตัวควบคุมแสดงความไม่เสถียรออกมา



รูปที่ 6 ความเร็วตอบสนองจากโน้ต 23 ของตัวควบคุมชุดเดียวกับที่ใช้ในรูปที่ 5 แต่เป็นโครงสร้างที่มีการติดแผ่นชั้นการหน่วง

#### 4. การทดสอบเสถียรภาพตัวควบคุมและการประยุกต์ใช้

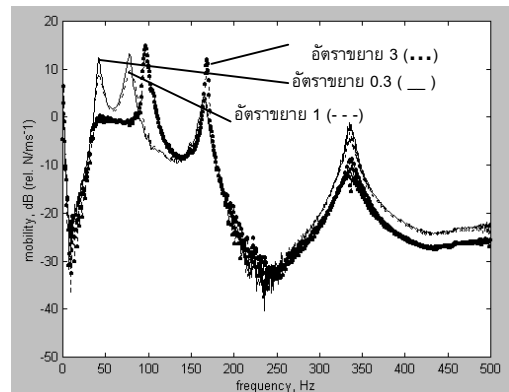
ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในส่วนแรกจะใช้แสดงยืนยันผลจากการทดลองเชิงตัวเลข ในขณะที่ส่วนที่สองจะแสดงการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบนี้กับอุปกรณ์ดูดซับความสั่นสะเทือนแบบแอคทีฟ (active absorber)

##### 4.1. ชุดทดลองและผลการทดสอบ

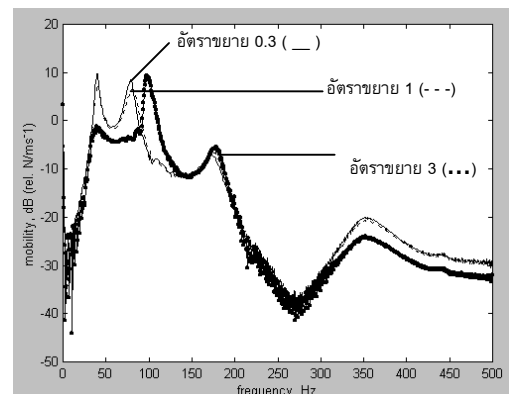
ชุดทดสอบความสั่นสะเทือนของคานยื่นจะใช้อุปกรณ์กระตุ้น 2 ตัวโดยตัวที่หนึ่งกระทำที่โน้ต 17 (รูปที่ 3) เป็นสัญญาณรบกวน ขณะที่ตัวกระตุ้นที่ 2 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์กระตุ้นเพื่อลดความสั่นสะเทือนด้วยตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบที่ปลายคาน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 อุปกรณ์กระตุ้นที่ติดกับคานยื่นเพื่อทดสอบตัวควบคุม



รูปที่ 8 ฟังก์ชันตอบสนองความถี่คานยื่นไม่ติดแผ่นหน่วงที่ใช้ตัวควบคุม 3 ระดับอัตราขยายป้อนกลับ

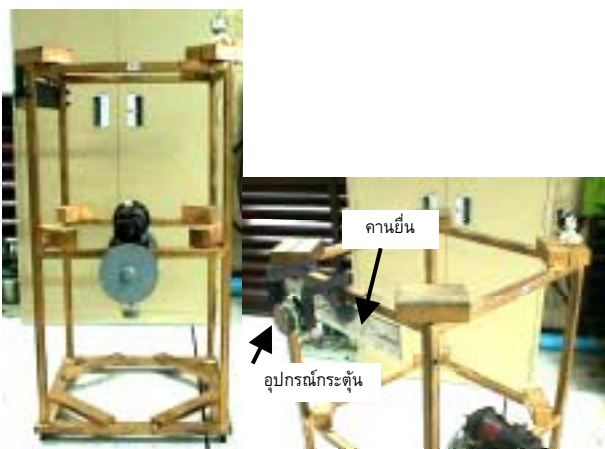


รูปที่ 9 ฟังก์ชันตอบสนองความถี่คานยื่นติดแผ่นหน่วงที่ใช้ตัวควบคุม 3 ระดับอัตราขยายป้อนกลับ

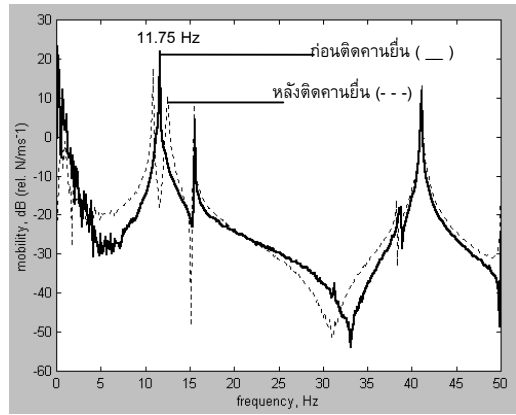
โดยรูปที่ 8 และ 9 แสดงฟังก์ชันตอบสนองความถี่เมื่อใช้ตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบกับคานยี่ห้อที่ไม่ติดและติดแผ่นชั้นการหน่วงตามลำดับ โดยปรับอัตราขยายจากชุดขยายสัญญาณวัดแบบซาร์จทั้งหมด 3 ระดับอัตราขยายซึ่งฟังก์ชันตอบสนองความถี่ที่อัตราขยายสูงสุด (3 เท่า) ของทั้งสองรูปถูกปรับเพื่อให้เกิดความไม่เสถียรกับโครงสร้างคานโดยเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยาย 1 เท่าแล้วจะพบว่ากรณีคานยี่ห้อติดแผ่นชั้นการหน่วงจะยังคงเสถียรอยู่ต่างกับกรณีรูปที่ 8 ที่ความถี่ประมาณ 170 Hz หรือโมดความถี่อิสระที่ 3 ทั้งอัตราขยาย 1 และ 3 เท่าของสัญญาณป้อนกลับแสดงความไม่เสถียร ณ โมดนี้

#### 4.2. อุปกรณ์ดูดซับความถี่อิสระแบบแอคทีฟ

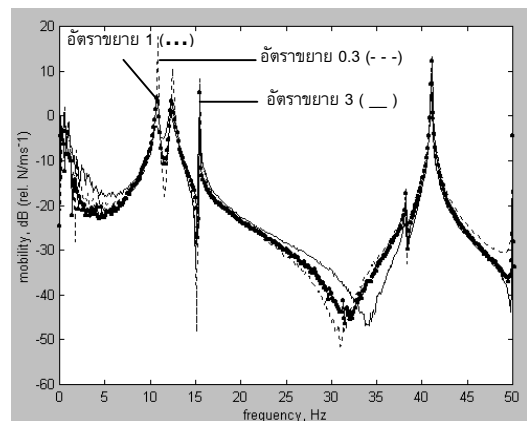
การใช้อุปกรณ์กระตุ้นเพื่อควบคุมความถี่อิสระด้วยตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบของโครงสร้างที่จำลองตึกสองชั้นดังแสดงชุดทดสอบในรูปที่ 10 นั้นถูกแสดงผ่านอุปกรณ์ดูดซับความถี่อิสระ [8] โดยโครงสร้างนี้มีความถี่ธรรมชาติแรกที่ 11.75 Hz คานยี่ห้อจะถูกใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับความถี่อิสระ ณ ความถี่ธรรมชาติแรกนี้โดยถูกปรับตั้งให้มีความถี่ธรรมชาติของคานยี่ห้อตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสองชั้นนี้เพื่อทำให้ ณ ความถี่ธรรมชาติเดิมกลายเป็นแอนติเรโซแนนซ์ (anti-resonance) โดยเกิดเป็นโมดความถี่อิสระใหม่ที่ความถี่ 10.87 Hz และ 12.5 Hz ดังแสดงในรูปที่ 11 อุปกรณ์กระตุ้นร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบจะถูกติดยึดกับโครงสร้างสองชั้นและกระตุ้นไปยังคานที่ปรับตั้งไว้เพื่อเพิ่มความหน่วงควบคุมความถี่ใหม่ทั้งสอง ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงเป็นฟังก์ชันตอบสนองความถี่ในรูปที่ 12 และเช่นเดียวกันในกรณีที่แผ่นคานยี่ห้อที่ใช้เป็นอุปกรณ์ดูดซับความถี่อิสระติดด้วยแผ่นชั้นการหน่วงดังแสดงในรูปที่ 13 โดยเมื่อพิจารณายอดการตอบสนอง ณ ความถี่สองโมดความถี่อิสระแรกจะพบว่าหลังจากปรับอัตราขยายลดลงจากที่อัตราขยาย 3 เท่าซึ่งปรับตั้งให้เกิดความไม่เสถียรทั้งสองรูปไปเป็นค่าอัตราขยาย 1 เท่าจะพบว่ากรณีติดแผ่นชั้นการหน่วงจะให้ประสิทธิภาพในการลดความถี่อิสระได้ดีกว่าโดยระดับขนาดอยู่ที่ประมาณต่ำกว่า 0 dB ทั้งสองโมด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบควบคุมป้อนกลับนี้ด้วยผลการจำลองและทดสอบก่อนหน้านี้เช่นเดียวกัน



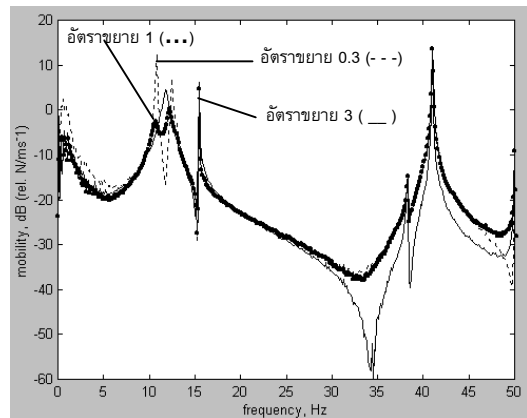
รูปที่ 10 โครงสร้างสองชั้นติดอุปกรณ์ดูดซับความถี่อิสระแบบแอคทีฟ



รูปที่ 11 ฟังก์ชันตอบสนองความถี่ก่อนและหลังติดคานยี่ห้อ



รูปที่ 12 ฟังก์ชันตอบสนองความถี่หลังติดคานยี่ห้อไม่ติดแผ่นหน่วงและใช้ตัวควบคุมป้อนกลับ



รูปที่ 13 ฟังก์ชันตอบสนองความถี่หลังติดคานยี่ห้อที่มีแผ่นหน่วงและใช้ตัวควบคุมป้อนกลับ

#### 5. บทสรุป

ตัวควบคุมป้อนกลับความเร็วค่าลบซึ่งถูกพิจารณาถึงเสถียรภาพของตัวควบคุมเมื่อตัวยังสัญญาณและอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมถูกติดอยู่ ณ จุดเดียวกันบนโครงสร้างนั้นจะมีเสถียรภาพอย่างไม่มีเงื่อนไขแต่เมื่อการศึกษาที่รวมพลศาสตร์ของอุปกรณ์กระตุ้นควบคุมเข้าในการพิจารณาด้วยซึ่งในกรณีที่อุปกรณ์กระตุ้นมีช่วงความถี่การตอบสนองที่จำกัดจะมีผลทำให้เกิดความไม่เสถียรเมื่อปฏิบัติใช้ตัวควบคุมนี้ อย่างไรก็ตามจาก

ผลการคำนวณจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบระบบจริงได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความหน่วงเริ่มต้นให้กับระบบที่มีความหน่วงในตัวเองน้อยเช่นโครงสร้างผนังบางหรือคานยื่นที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีส่วนช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการลดความสั่นสะเทือนของโครงสร้างนี้ได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคณาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนด้านอุปกรณ์การทดสอบและสถานที่ คุณสิทธิเดช ปลั่งวุฒิกุล บริษัท 3M (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นชั้นการหน่วงสำหรับการทดสอบนี้ นายสุวัฒน์ พิทักษ์สุรัชย์ และนายภนก ลิ้มสมุทรเพชร ผู้ช่วยวิจัยประจำศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูงที่จัดสร้างชุดทดสอบโครงสร้างสองชั้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. Balas, 1979, 'Direct velocity feedback control of large space structures.', *Journal of Guidance and Control*, Vol. 2, No. 1, p252-253.
- [2] C. J. Goh and T. K. Caughey, 1985, 'On the stability problem caused by finite actuator dynamics in the collocated control of large space structures.', *International Journal of Control*, Vol. 41, No. 3, p787-802.
- [3] C. Chantalakhana and R. Stanway, 2001, 'Active constrained layer damping of clamped-clamped plate vibrations.', *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 241, No. 5, p755-777.
- [4] M. J. Balas, 1978, 'Active control of flexible systems.', *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 25, No. 3, p415-430.
- [5] G. F. Lang and D. Snyder, 2001, 'Understanding the Physics of Electrodynamic Shaker Performance.', *Sound and Vibration Magazine*, October, Dynamic Testing Reference Issue.
- [6] G. Buzdugan, E. Mihailescu and M. Rades, 1986, 'Vibration Measurement', Martinus Nijhoff Publishers, Bucharest, Romania.
- [7] จักร จันทลักขณา, 2544, 'การเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นชั้นการหน่วงแบบบังคับเพื่อลดความสั่นสะเทือนในคาน.', การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. เล่มที่ 2 หน้า MM 56-61
- [8] J. Ormondroyd and J. P. Den Hartog, 1928, 'The theory of the dynamic vibrations absorber.', *Transaction ASME*, Vol. 50, A9