

การควบคุมการสั่นไหวของสะพานด้วยมวลหน่วงปรับค่า  
กรณีศึกษาสะพานบางกะปิ  
A Bridge Vibration Control using Tuned Mass Damper  
A case study of Bangkapi Bridge

ชยุตม์ ธนชรุจกร<sup>1</sup> อธิภัทร เอี่ยมวัชรินทร์<sup>2</sup> และ ทศพล ปิ่นแก้ว<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับมวลหน่วงปรับค่าโดยจะมีขอบเขตการวิจัยครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบและการผลิตจากโรงงานรวมถึงการตรวจสอบคุณสมบัติและการใช้งานของมวลหน่วงปรับค่าที่บริเวณหน้างานจริง อีกทั้งยังมุ่งเน้นการวิจัยไปถึงการเก็บข้อมูลความเร่งของสะพานเพื่อนำมาวิเคราะห์และศึกษาถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการสั่นไหวของสะพานโดยในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาถึงสะพานข้ามแยกบางกะปิ (ลาดพร้าว-เสรีไทย) ซึ่งเป็นสะพานที่ถูกยกระดับและมีการถูกรื้อเรียนว่าเกิดการสั่นไหวที่รู้สึกได้จากคนที่ใช้สะพานโดยในงานวิจัยจะทำการวิเคราะห์ถึงพลังงานที่ TMD ดูดซับตลอดจนเปรียบเทียบกับพลังงานที่จะเกิดขึ้นกับสะพานทั้งก่อนและหลังติดตั้ง TMD เพื่อเป็นการยืนยันว่า TMD ที่ติดตั้งสามารถลดการสั่นไหวและสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้และในส่วนสรุปที่สามารถยืนยันถึงการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าได้คือการหาการเคลื่อนที่เปรียบเทียบในช่วงเหตุการณ์ที่มีรถใหญ่เคลื่อนผ่านโดยการเคลื่อนที่ของสะพานที่เกิดขึ้นก่อนการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าอยู่ที่ 1.151 มิลลิเมตรและมีการเคลื่อนที่ของสะพานหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่ามีค่าอยู่ที่ 1.037 มิลลิเมตรซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวสะพานมีการเคลื่อนที่ที่ลดน้อยลงถึง 11 %

คำสำคัญ: มวลหน่วงปรับค่า ; การลดการสั่นไหวของสะพาน ; การดูดซับพลังงาน ; ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่า

## Abstract

This research investigates a Tuned Mass Damper (TMD), covering design, factory production, and inspection of its properties and applications at the actual site. The research focuses on collecting acceleration data of a bridge to analyze

the TMD's efficiency in reducing bridge vibrations. Specifically, the examination pertains to the Bangkapi flyover (Lat Phrao-Seri Thai), an elevated bridge that has received complaints of noticeable vibrations. The research analyzes the energy absorbed by the TMD and compares the bridge's energy levels before and after TMD installation to confirm that the TMD effectively reduces vibrations and resolves the issue. The conclusion, confirming the TMD's efficiency, is based on comparing bridge movement during heavy vehicle passage. Before installing the TMD, the bridge movement was 1.151 mm, and after installation, it was 1.037 mm, showing an 11% reduction in bridge movement.

Keywords: Tuned Mass Damper; reducing bridge vibration; the energy absorbed by the TMD

## 1. ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องด้วยปัจจุบันประชากรในกรุงเทพมหานครมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องมีการจัดการคมนาคมที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาเมืองให้มีความเจริญทั้งทางด้านเศรษฐกิจและสังคม จึงทำให้เกิดแนวคิดการก่อสร้างเส้นทางขนส่งมวลชนในหลายๆเส้นทาง หนึ่งในนั้นคือแผนการก่อสร้างรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีเหลืองจากเส้นทางลาดพร้าวไปสำโรงเพื่อลดปัญหาการจราจรติดขัดรวมไปถึงปัญหาการเดินทางที่ยุ่งยาก แต่ได้พบปัญหาเสาตอม่อของรถไฟฟ้าสายสีเหลืองมีการก่อสร้างทับซ้อนกับสะพานยกระดับบริเวณหน้าห้างสรรพสินค้าเดอะมอลล์บางกะปิ จึงได้มีการรื้อถอนสะพานยกระดับเดิมออกแล้วก่อสร้างใหม่ อีกทั้งยังมีแผนการก่อสร้างทางเดินสกายวอล์ค(Skywalk)ร่วมด้วย ทำให้มีการ

ยกระดับสะพานข้ามแยกบางกะปิเดิมให้สูงขึ้น และทำให้ความยาวช่วงคานามีค่ามากขึ้นจากเดิม ทำให้มีข้อกังวลเกี่ยวกับความสั่นไหวที่เกิดขึ้นต่อสะพานข้ามแยกบางกะปิ

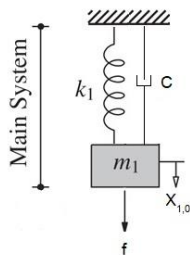
จึงเป็นที่มาทำให้ทางวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานเพื่อนำไปปรับใช้กับมวลหน่วงปรับค่าที่จะช่วยลดการสั่นไหวของสะพาน รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการช่วงลดการสั่นไหวที่จะเกิดขึ้นต่อสะพาน

## 2. เนื้อความหลัก

### 2.1 มวลหน่วงปรับค่า

มวลหน่วงปรับค่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างอาคารต่างๆ เช่น สะพาน ตึกสูง เป็นต้น โดยปกติแล้วมวลหน่วงปรับค่าจะประกอบไปด้วย มวล สปริง และตัวหน่วง หลักการทำงานคือ เมื่อโครงสร้างเกิดการสั่นไหว จะกระตุ้นให้มวลหน่วงปรับค่าเกิดการสั่นในทิศทางตรงข้ามกับโครงสร้างหลัก โดยที่พลังงานจลน์ของโครงสร้างหลักจะถูกถ่ายเทให้กับมวลหน่วงปรับค่า และถูกดูดซับด้วยตัวหน่วง (Viscous damper) ที่ติดตั้งภายในระบบของมวลหน่วงปรับค่า เพื่อประสิทธิภาพที่สูงที่สุดจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สอดคล้องกับโครงสร้างหลัก เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงปรับค่าและของโครงสร้างต้องมีค่าที่เท่ากันเพื่อให้ตัวมวลหน่วงปรับค่ามีการดูดซับพลังงานที่สูงที่สุด

### 2.2 แบบจำลองโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้ง TMD



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งTMD

โดยมีสมการของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปแรงภายนอก  $f$  และการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง  $X_{1,0}$  ดังนี้

$$\ddot{X}_{1,0} + c_1 \dot{X}_{1,0} + k_1 x_{1,0} = f$$

และมีฟังก์ชันความถี่ตอบสนองจากแรงภายนอก  $f = e^{i\omega t}$  และการกระจัดของโครงสร้าง  $x_{1,0} = H_0 e^{i\omega t}$  เท่ากับ

$$H_0(\omega) = \frac{1}{-m_1\omega^2 + c_1 i\omega + k_1}$$

โดยที่  $m_1$  คือ มวลของโครงสร้างหลัก

$c_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสลายพลังงานของโครงสร้าง

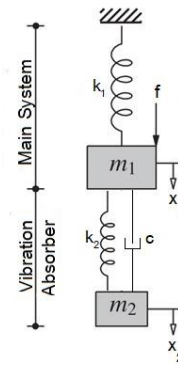
$k_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งของโครงสร้าง

$f$  คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้าง

$\omega$  คือ ความถี่ของแรงภายนอกในหน่วยเรเดียน/วินาที

$H_0(\omega)$  คือ ฟังก์ชันความถี่ตอบสนองจากแรงภายนอก  $f$  และการกระจัดของโครงสร้าง  $x_{1,0}$

### 2.3 แบบจำลองโครงสร้างที่มีการติดตั้ง TMD



รูปที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างที่มีการติดตั้งTMD

โดยมีสมการของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปแรงภายนอก  $f$  และระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก  $x_1$  และระยะการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงปรับค่า  $x_2$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) &= f \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned}$$

และจะได้ค่า  $H_1(\omega)$  และ  $H_2(\omega)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันความถี่ตอบสนองซึ่งแรงภายนอก  $f$  และระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลัก  $x_1$  และระยะการเคลื่อนที่ของ TMD  $x_2$

$$\begin{aligned} H_1(\omega) &= \frac{-m_2\omega^2 - c_2 j\omega - k_2}{\Delta} f \\ H_2(\omega) &= \frac{-(c_2 j\omega + k_2)}{\Delta} f \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta &= (-m_1\omega^2 + c_1 j\omega + k_1)(-m_2\omega^2 - c_2 j\omega - k_2) \\ &\quad - (c_2 j\omega + k_2)^2 \end{aligned}$$

โดยที่  $m_2$  คือ มวลของมวลหน่วงปรับค่า

$c_2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสลายพลังงานของมวลTMD

$k_2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งเกร็งของโครงสร้างTMD

$x_1$  คือ ระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหลักเทียบกับจุดเริ่มต้น

$x_2$  คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวล TMD เทียบกับจุดเริ่มต้น

### 2.4 พารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับ TMD

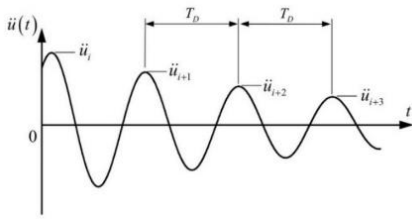
อัตราส่วนความถี่ของ TMD กับสะพาน:  $f_T = \frac{1}{1+\mu}$  เมื่อ  $\mu = m_2/m_1$

อัตราส่วนการสลายพลังงานของ TMD:  $\zeta_t = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}$

อัตราส่วนประสิทธิภาพการสลายพลังงานของสะพาน:

$$\zeta_{add} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}}$$

## 2.5 Damping ratio



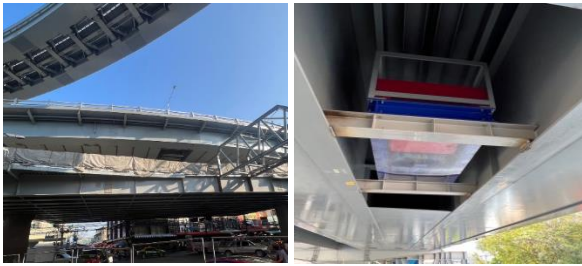
รูปที่ 3 ค่าความเร่งเมื่อเทียบกับเวลา

ข้อมูลความเร่งสามารถนำไปหาอัตราความหน่วง,  $\zeta$  สำหรับระบบโครงสร้างได้ดังนี้

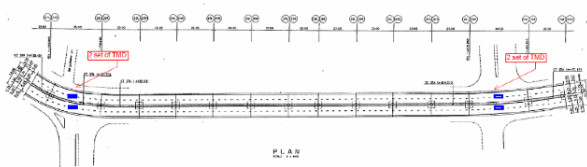
$$\zeta \approx \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+1}} \right)$$

## 3. ระเบียบวิจัย

สะพานข้ามแยกบางกะปิ (สะพานลาดพร้าว- เสรีไทย), กรุงเทพมหานคร เป็นสะพานคานเหล็กรูปตัวไอ (Steel I Girder) ข้างบนเทห์ด้วยคอนกรีต จำนวน 2 ทิศทาง ทิศทางละ 2 ช่องจราจร รวมจำนวน 4 ช่องจราจร โดยมวลหน่วงปรับค่าจะติดตั้งในบริเวณข้ามทางแยกที่มีความยาวช่วงคานมากกว่าปกติ ในตำแหน่งกึ่งกลางคานทั้งสองทิศทางการจราจร



รูปที่ 4 สะพานข้ามแยกบางกะปิ รูปที่ 5 มวลหน่วงปรับค่าหลังติดตั้ง



รูปที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าบริเวณสะพานข้ามแยกบางกะปิ

### 3.1 การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวมวลหน่วงปรับค่า

#### 3.1.1 การตรวจสอบขนาดของมวลหน่วงปรับค่า

จากการตรวจสอบขนาดของมวลหน่วงปรับค่าทั้ง 4 ตัว และนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO 13920 ที่ว่าด้วยเรื่องของคุณคลาดเคลื่อนโดยทั่วไปของโครงสร้างที่ใช้งานเชื่อม รวมถึงเป็นการตรวจสอบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต พบว่าตัวมวลหน่วงปรับค่าทั้ง 4 ตัวที่นำมาติดตั้งบริเวณสะพานข้ามแยกบางกะปิมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

### 3.1.2 การตรวจสอบน้ำหนักของมวลหน่วงปรับค่า

การตรวจสอบน้ำหนักของมวลหน่วงปรับค่ามีความสำคัญเนื่องจากจะมีผลต่อการสั่นที่เกิดขึ้นของตัวมวลหน่วงปรับค่าและผลของการดูดซับพลังงานจากการสั่นของสะพานอีกด้วย ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักมวลหน่วงปรับค่าจะต้องมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ตามที่กำหนดไว้ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่ามวลหน่วงปรับค่าที่ทำการติดตั้งมีค่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

### 3.1.3 การตรวจสอบความหนาของสีเคลือบ

ตามสภาวะการใช้งานจริงที่พบเจอจะสามารถพบได้ทั้งความชื้น แสงแดด อากาศ ทำให้มวลหน่วงปรับค่าจึงต้องมีการลงสีเคลือบผิว โดยได้ทำการกำหนดปริมาณของสีเคลือบไว้เพื่อป้องกันดังนี้ 1.สีรองพื้นอีพ็อกซี (Epoxy Primer) หนาไม่น้อยกว่า 100 ไมครอน 2. สีโพลียูรีเทน (PU Top Coat) หนาไม่น้อยกว่า 100 ไมครอนเพื่อทำหน้าที่เพิ่มความทนทานของมวลหน่วงปรับค่าให้มีระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น

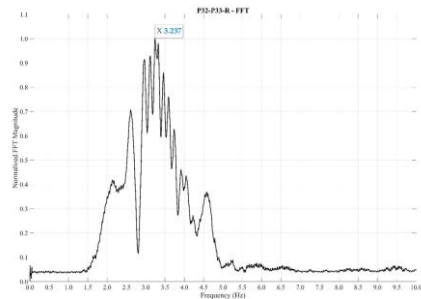
### 3.1.3 การตรวจสอบแรงเสียดทาน

การทดสอบแรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงเคลื่อนที่บนอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าแรงเสียดทานที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของมวลหน่วงปรับค่าไม่ได้มีมากเกินไปจนส่งผลกระทบต่อการทำงานของมวลหน่วงปรับค่า โดยวิธีการทดลองคือการวางก้อนมวลไว้บนมวลหน่วงแล้วค่อยๆเพิ่มก้อนมวลขึ้นไปจนถึงจุดที่มวลหน่วงเริ่มเคลื่อนที่และใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ (Displacement Sensor) ในการเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

## 3.2 การทดสอบมวลหน่วงปรับค่าก่อนการติดตั้ง

### 3.2.1 การทดสอบหาค่าคุณสมบัติของสะพาน

การหาค่าคุณสมบัติของสะพานมีส่วนสำคัญในการออกแบบตัวมวลหน่วงปรับค่า (Tuned Mass Damper) เนื่องจากการจะต้องมีการปรับแก้ค่าความถี่ธรรมชาติของตัวมวลหน่วงปรับค่าให้ใกล้เคียงกับกับข้อมูลความถี่ธรรมชาติของสะพานเพื่อให้การทำงานของตัวมวลหน่วงปรับค่ามีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการช่วยลดการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7 กราฟ FFT ค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

จากกราฟ Fast Fourier Transform (FFT) ที่แสดงดังรูปที่ 7 จะพบว่าสะพานมีความถี่ธรรมชาติ อยู่ในช่วง  $2.8 \text{ Hz} < f < 3.6 \text{ Hz}$  ซึ่งสามารถนำค่าความถี่ธรรมชาติของสะพานไปใช้ในการออกแบบปรับค่าตัวมวลหน่วงปรับค่าเพื่อให้ค่าความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าตรงกับสะพาน

### 3.2.2 การทดสอบหาค่า stiffness of TMD ( $k$ of spring)

การทดสอบหาค่าคงที่ของสปริงที่ถูกติดตั้ง ณ ตัวหน่วงปรับค่าซึ่งมีความสำคัญในการลดซับพลังงานของตัวมวลหน่วงปรับค่า สามารถทดสอบได้จากสมการ  $F = kx$  --- (4)

โดย  $F$  = แรงที่กระทำลงบนสปริง

$k$  = ค่าคงที่ของสปริง

$x$  = ระยะการเคลื่อนตัวของสปริง

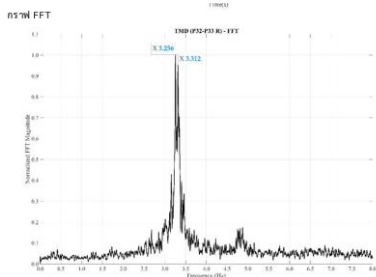
ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดค่าการเคลื่อนที่บนตัวมวลหน่วงปรับค่า
2. ทำการปรับแก้ตัวเครื่องมือวัดให้เรียบร้อย จากนั้นเริ่มทำการเพิ่มมวลครั้งละ 100 kg แล้วทำการวัดค่าการเคลื่อนที่ด้วยจนครบ 300 kg แล้วจึงนำมวลที่เพิ่มเข้าไปออกครั้งละ 100 kg จนหมด
3. นำค่าระยะการเคลื่อนตัวของสปริงที่วัดได้มาคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงตามสมการที่ (4)

### 3.2.3 การทดสอบการสั่นอย่างอิสระของมวลหน่วงปรับค่า

(Free vibration of TMD)

มวลหน่วงปรับค่าที่นำมาติดตั้งกับสะพานต้องมีการทดสอบหาความถี่เพื่อให้แน่ใจว่าความถี่ของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับความถี่ของสะพาน โดยจะทำการทดสอบโดยการให้พลังงานเข้าไปด้วยการเขย่ามวลในแนวตั้ง แล้วปล่อยให้อุปกรณ์สั่นแบบอิสระ (Free Vibration) ทำการวัดค่าความเร่งบริเวณมวลที่เคลื่อนที่เป็นระยะเวลา 3-5 นาที หรือจนมวลหยุดนิ่ง นำค่าความเร่งที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 8 กราฟ FFT ค่าความถี่ธรรมชาติของTMD

จากกราฟ Fast Fourier Transform (FFT) ที่แสดงดังรูปที่ 8 จะพบว่าสะพานมีความถี่ธรรมชาติของมวลหน่วงปรับค่าอยู่ที่ 3.237 Hz ซึ่งพบว่ามีความถี่อยู่ในช่วงที่ทำการออกแบบไว้

### 3.3 กรณีหลังการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

การทดสอบมวลหน่วงปรับค่าหลังติดตั้งเข้ากับสะพาน เป็นการตรวจสอบเพื่อหาอัตราการสลายพลังงาน (Damping ratio) ที่เพิ่มขึ้นในระบบสะพานหลังจากติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า

#### 3.3.1 การทดสอบกรณีมวลหน่วงปรับค่าไม่ทำงาน

1. หลังจากติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับสะพานแล้วทำการล็อก (Lock) มวลหน่วงปรับค่าไม่ให้มวลของอุปกรณ์สั่นไหว

2. ให้รถบรรทุก 6 ล้อ(2เพล) น้ำหนักรวม 15 ตัน 1 คัน วิ่งบนสะพานด้วยความเร็ว 2 รูปแบบ คือ 1) วิ่งด้วยความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ผ่านตัวสะกด (Jumper) แล้วให้รถบรรทุกวิ่งผ่านช่วงสะพานที่ทำการทดสอบปล่อยให้สะพานสั่นไหวแบบอิสระ (Free Vibration)
- 2) ให้รถจอดนิ่งบนช่วงสะพานที่ต้องการทำการทดสอบแล้วติดตั้งตัวสะกด (Jumper) บริเวณล้อหลังจากนั้นให้รถบรรทุกไต่ตัวสะกดแล้วกระแทกสะพานและเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว 5 km/hr



รูปที่ 9 การทดสอบรูปแบบที่1 และ 2 ตามลำดับ

3. ทำการตรวจวัดค่าความเร่ง (acceleration) ของสะพานแล้วนำมาหาค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานโดยวิธี Log Decrement Method จะได้อัตราการสลายพลังงานของสะพานในขณะที่มวลหน่วงปรับค่าไม่ทำงาน

#### 3.3.2 การทดสอบกรณีมวลหน่วงปรับค่าทำงาน

1. นำตัวป้องกันการเคลื่อนที่มวล TMD ออกเพื่อให้มวลหน่วงปรับค่าสามารถสั่นไหวได้ปกติ
2. ทำการให้พลังงานแก่มวลหน่วงปรับค่าโดยการเขย่ามวลของอุปกรณ์ในแนวตั้งแล้วปล่อยให้อุปกรณ์สั่นไหวแบบอิสระ
3. ทำการตรวจวัดค่าความเร่ง (acceleration) ของสะพานแล้วนำมาหาค่าอัตราส่วนการสลายพลังงานโดยวิธี Log Decrement Method จะได้อัตราการสลายพลังงานของสะพานในขณะที่มวลหน่วงปรับค่าทำงาน

### 3.4 กรณีภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

ในการหาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าภายใต้สภาวะการใช้งานจริงสามารถทำได้จากการเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำข้อมูลที่รับมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าหลังการติดตั้งว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด เช่น ค่าการสลายพลังงานและค่าการเคลื่อนตัวที่เปลี่ยนแปลงไปของสะพานในกรณีที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า เป็นต้น

#### 3.4.1 การแปลงสัญญาณความเร่งเป็นสัญญาณความเร็ว

ในวันทดสอบจริงมีสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ทำให้สัญญาณที่ได้รับมีความปะปนกัน ทางผู้วิจัยจึงมีการตัดข้อมูลสัญญาณรบกวนโดยใช้ฟังก์ชัน detrend และ highpass ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) เพื่อกรองสัญญาณให้เหลือเพียงสัญญาณที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน จากนั้นจึงนำความเร่งหลังจากการกรองสัญญาณมาอินทิเกรตเทียบกับเวลาโดยใช้ฟังก์ชัน cumtrapz ในโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) เพื่อแปลงความเร่งที่ได้รับเป็นความเร็วเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.4.2 การหาพลังงานที่ TMD ดูดซับจากข้อมูลความเร็ว

นำความเร็วที่ได้จากการอินทิเกรตมาคูณกับแรงที่ TMD กระทำต่อโครงสร้างจากนั้นจึงทำการอินทิเกรตค่าที่ได้เทียบกับเวลาหรือคือการใช้ฟังก์ชัน cumtrapz เพื่อหาพลังงานที่ TMD ดูดซับเมื่อมีพลังงานภายนอกกระทำกับสะพาน

### 3.4.3 การหาพลังงานของสะพานหลังจากการติดตั้ง TMD

ใช้สูตรการหาพลังงานจลน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{2}mv^2$  โดย modal mass ของสะพานที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ 90 ตันเมื่อได้ข้อมูลพลังงานจึงทำการใช้ฟังก์ชัน plot กราฟเพื่อดูแนวโน้มของพลังงานของสะพานที่เกิดขึ้น

### 3.4.4 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนที่ของสะพาน

นำพลังงานที่เกิดขึ้นทั้งของสะพานและของมวลห้วงปรับค่ามาแปลงค่าเป็นความเร็วแล้วจึงแปลงค่าความเร็วนี้เป็นค่าการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นทั้งก่อนการติดตั้งและหลังการติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

โดยจะนำผลของการเคลื่อนที่ส่วนต่างระหว่างกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้ง TMD มาหาสัดส่วนเทียบกับการเคลื่อนที่กรณีที่ไม่ติดตั้ง TMD เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของ TMD ว่าสามารถลดการเคลื่อนที่ของสะพานลงได้มากน้อยเพียงใดหากมีเหตุการณ์ที่มีแรงภายนอกมากระทำต่อสะพาน

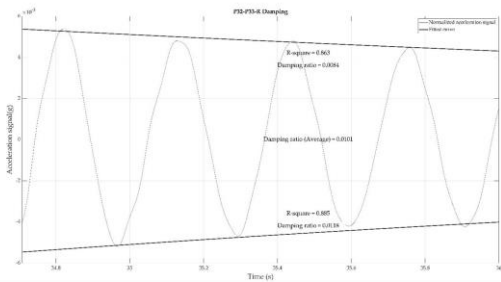
## 4. ผลการศึกษา

### 4.1 การทดสอบหลังติดตั้งมวลห้วงปรับค่า

อัตราการสลายพลังงานจากวิธี Logarithmic decrement สามารถ

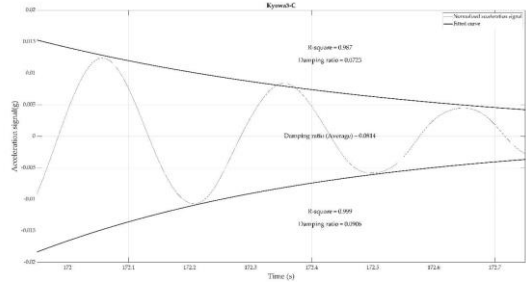
$$\text{คำนวณได้จากสูตร } \zeta \approx \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+1}} \right)$$

จากค่าความเร่งของสะพานในขณะที่มีมวลห้วงปรับค่าไม่ทำงานที่ตรวจวัดได้ จะพบว่าอัตราการสลายพลังงาน(Damping ratio),  $\zeta$  เฉลี่ยอยู่ที่ 1.01 % ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่าอัตราการสลายพลังงานของสะพาน ขณะ TMD ไม่ทำงาน

จากค่าความเร่งของสะพานในขณะที่มีมวลห้วงปรับค่าทำงานที่ตรวจวัดได้ จะพบว่าอัตราการสลายพลังงาน(Damping ratio),  $\zeta$  เฉลี่ยอยู่ที่ 0.0814 หรือ 8.14 % ตามรูปที่ 11

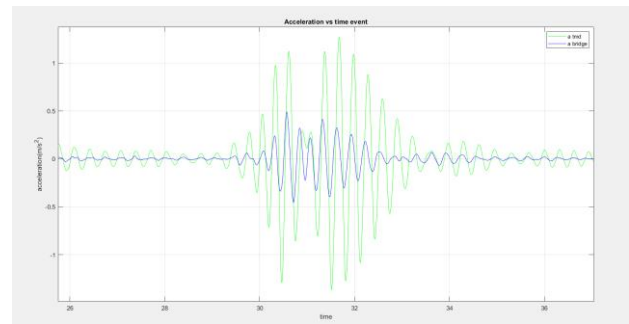


รูปที่ 11 ค่าอัตราการสลายพลังงานของสะพาน ขณะ TMD ทำงาน

จากค่าอัตราการสลายพลังงานของสะพานขณะมวลห้วงปรับค่าไม่ทำงานและทำงานเมื่อเปรียบเทียบกับมีค่าเพิ่มขึ้น 0.0713 หรือ 7.13 % ซึ่งผ่านเกณฑ์ตามที่ทางกรุงเทพมหานครได้กำหนดไว้อยู่ที่ 0.05 หรือ 5 %

### 4.2 การทดสอบภายใต้ภาวะการใช้งาน

#### 4.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณความเร่งจากข้อมูลที่ได้รับ

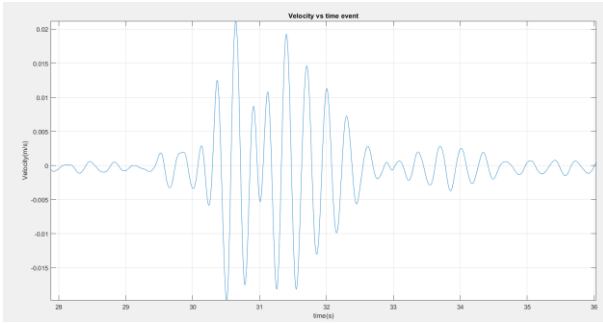


รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งของ TMD กับสะพานต่อเวลา

จากรูปที่ 12 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงถึงสัญญาณความเร่งของ TMD และสะพาน เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่มีรถใหญ่วิ่งผ่านโดยผู้วิจัยเลือกชุดข้อมูลที่ทำการตรวจวัดในวันที่ 02/04/2024 เวลา 11:42:32 - 11:42:34 ซึ่งเป็นช่วงเวลา 2 วินาทีเนื่องจากลักษณะของสัญญาณอยู่ในรูปแบบที่ไม่มีสัญญาณความถี่สูงมาปะปนซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นในส่วนถัดไปมีความแม่นยำและมีความแปรปรวนของข้อมูลน้อยลง

#### 4.2.2 การแปลงสัญญาณความเร่งเป็นสัญญาณความเร็ว

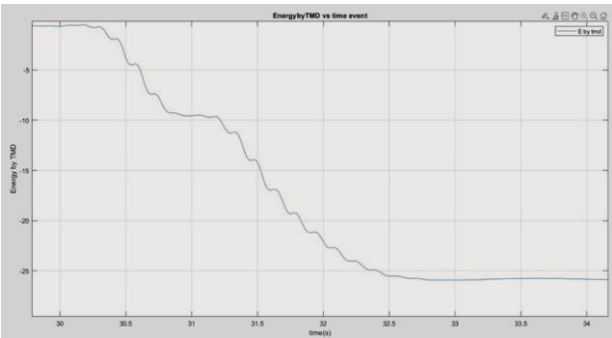
เมื่อได้สัญญาณความเร่งที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวนในขั้นตอนที่ 4.2.1 จึงได้ทำการอินทิเกรตความเร่งของสะพานต่อเวลาเพื่อแปลงเป็นสัญญาณความเร็วของสะพานเพื่อนำค่าความเร็วที่ได้ไปใช้สำหรับการหาพลังงานที่ถูกดูดซับหลังจากมีการติดตั้ง TMD



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของสะพานและเวลา

#### 4.2.3 พลังงานที่ TMD ดูดซับเมื่อเกิดแรงกระทำภายนอกต่อสะพาน

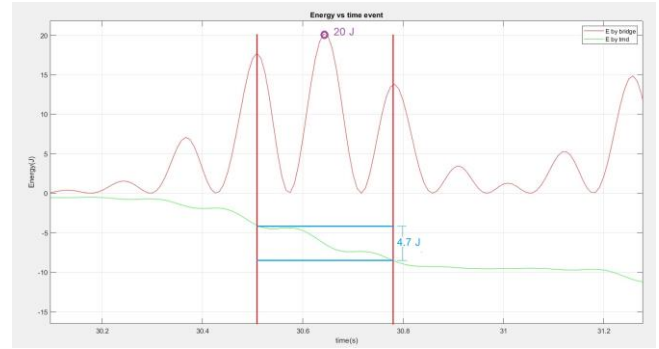
จากการอินทิเกรตผลคูณระหว่างแรงที่ TMD กระทำต่อสะพานและความเร็วของสะพานเทียบกับเวลาซึ่งผลที่ได้จะเป็นกราฟที่แสดงถึงพลังงานสะสมที่ถูกดูดซับจาก TMD เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้นกับสะพาน และจากรูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 30 – 32 มีแนวโน้มของกราฟที่ตกลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งบ่งบอกถึงช่วงเวลาที่เหตุการณ์รถใหญ่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ผลปรากฏว่า TMD จะออกแรงในทิศทางตรงข้ามกับแรงที่เกิดขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือการดูดซับพลังงานบางส่วนเพื่อไปลดทอนพลังงานที่จะกระทำต่อสะพานโดยตรง



รูปที่ 14 กราฟพลังงานที่ TMD ดูดซับในช่วงวินาทีที่ 30-32

#### 4.2.4 การหาการเคลื่อนที่ของสะพานก่อนการติดตั้ง TMD

ผู้วิจัยได้เลือกช่วงเวลาที่สะพานมีแอมพลิจูดของความเร่งสูงที่สุด 1 cycle เพื่อมาเปรียบเทียบโดยจากรูปพลังงานพบว่าจุดสูงสุดมีค่าพลังงานเท่ากับ 20 จูลซึ่งในช่วงเวลาที่สนใจเดียวกันนี้ TMD ได้ทำการดูดซับพลังงานจากสะพานออกไป 4.7 จูล และจากกฎอนุรักษ์พลังงานจึงสามารถหาพลังงานรวมที่จะเกิดขึ้นหากไม่ติดตั้ง TMD ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.7 จูลจึงสามารถนำพลังงานส่วนนี้แปลงเป็นความเร็วที่มีค่าเท่ากับ 0.0234 เมตรต่อวินาทีและนำความเร็วที่ได้มาอินทิเกรตเพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 1.151 มิลลิเมตรโดยรูปที่ 15 จะบอกถึงพลังงานของสะพานและพลังงานที่ TMD ดูดซับ



รูปที่ 15 พลังงานของสะพานและTMD

พลังงานรวม (พลังงานสะพานกรณีTMDไม่ทำงาน) = 20+4.7=24.7 J

หมายเหตุ : M (Modal mass) = 90 tons ,

$$f (\text{ความถี่ธรรมชาติของสะพาน}) = 3.237 \text{ Hz}$$

$$\text{ความเร็วสะพานก่อนการติดตั้ง TMD} = \sqrt{\frac{2E}{M}} = \sqrt{\frac{2 \times 24.7}{90,000}} = 0.0234$$

สมมติความเร่งที่ได้จากเซนเซอร์เป็นกราฟฟังก์ชัน SIN

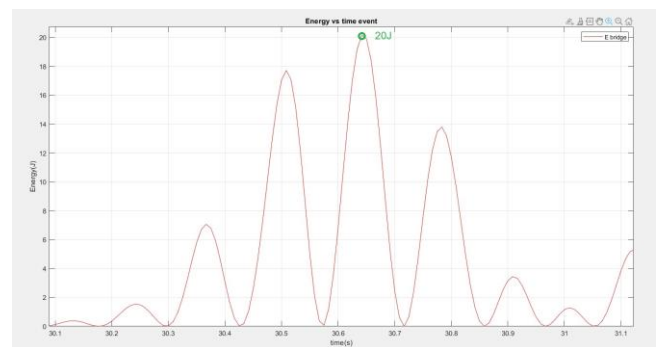
$$\text{สมการความเร็วของสะพาน} = V' \cos(\omega t) dt$$

$$\text{ค่าการเคลื่อนที่ของสะพาน} = \int V' \cos(\omega t) dt$$

$$= -\frac{V'}{\omega} \sin(\omega t) = \frac{V'}{2\pi f} = \frac{0.0234}{2 \times \pi \times 3.237} = 1.151 \text{ มิลลิเมตร}$$

#### 4.2.5 การหาการเคลื่อนที่ของสะพานหลังการติดตั้ง TMD

ผู้วิจัยได้เลือกช่วงที่สะพานมีพลังงานสูงสุดซึ่งเป็นช่วงที่เกิดเหตุการณ์ที่มีรถใหญ่วิ่งผ่านซึ่งมีพลังงานที่จุดสูงสุดเท่ากับ 20 จูลซึ่งสามารถนำพลังงานส่วนนี้แปลงเป็นความเร็วที่มีค่าเท่ากับ 0.021 เมตรต่อวินาทีและนำความเร็วที่ได้มาอินทิเกรตเพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่อยู่ที่ 1.037 มิลลิเมตรโดยรูปที่ 16 จะบอกถึงพลังงานของสะพานหลังติดตั้ง TMD



รูปที่ 16 พลังงานหลังติดตั้ง TMD

พลังงานสะพานหลังติดตั้งTMD = 20 J

$$\text{ความเร็วสะพานก่อนการติดตั้ง TMD} = \sqrt{\frac{2E}{M}} = \sqrt{\frac{2 \times 20}{90,000}} = 0.021$$

สมมติความเร่งที่ได้จากเซนเซอร์เป็นกราฟฟังก์ชัน SIN

$$\text{สมการความเร็วของสะพาน} = V' \cos(\omega t) dt$$

$$\text{ค่าการเคลื่อนที่ของสะพาน} = \int V' \cos(\omega t) dt$$

$$= -\frac{V'}{\omega} \sin(\omega t) = \frac{V'}{2\pi f} = \frac{0.021}{2 \times \pi \times 3.237} = 1.037 \text{ มิลลิเมตร}$$

#### 4.2.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของสะพานกรณีหลังการติดตั้ง TMD และกรณีสมมติให้ TMD ไม่ทำงาน

การเคลื่อนที่ของสะพานหลังการติดตั้ง TMD มีค่าเท่ากับ 1.037 มิลลิเมตร การเคลื่อนที่ของสะพานกรณีสมมติให้ TMD ไม่ทำงาน มีค่าเท่ากับ 1.151 มิลลิเมตร ดังนั้นประสิทธิภาพของ TMD ทำให้การเคลื่อนที่ของสะพานลดลงไป 0.114 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 11 %

### 5.อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากปัญหาการก่อสร้างรถไฟฟ้ายานยนต์ที่มีพื้นที่ซ้อนทับกับสะพานข้ามแยกบางกะปิเดิมจึงเป็นเหตุทำให้ต้องรื้อถอนสะพานและยกระดับสะพานขึ้นให้สูงกว่าเดิมทำให้มีความยาวช่วงที่มีมากกว่าปกติ ทำให้เกิดความกังวลใจในเรื่องการสั่นไหวที่จะเกิดขึ้น ทางกรุงเทพมหานครจึงนำมวลดทอนปรับค่ามาติดตั้งกับสะพานและนำพามาสู่การทำงานวิจัยศึกษาการทำงานของมวลดทอนปรับค่าที่ช่วยลดการสั่นไหวของสะพานที่จะเกิดขึ้นบริเวณสะพานข้ามแยกบางกะปิรวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของมวลดทอนปรับค่าหลังการติดตั้งเพื่อเผยแพร่ให้ผู้ที่สนใจได้ศึกษา โดยในรายงานวิจัยฉบับนี้ได้กล่าวถึงการตรวจสอบหาคุณสมบัติต่างๆของมวลดทอนปรับค่าและของสะพาน และการติดตั้งมวลดทอนปรับค่าตลอดจนการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นหลังการติดตั้งมวลดทอนปรับค่า

หลังจากมีการทดสอบเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของมวลดทอนปรับค่าก่อนการติดตั้งจึงสามารถยืนยันได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของมวลดทอนปรับค่าและสะพานมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี และต่อมาได้มีการทดสอบหาอัตราการสลายพลังงาน(damping ratio) ของสะพานในกรณีมวลดทอนปรับค่าทำงานและไม่ทำงานตามลำดับ พบว่าอัตราการสลายพลังงานของสะพาน มีค่าอยู่ที่ 8.14 และ 1.01 % ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าอัตราการสลายพลังงานของสะพานกรณีมวลดทอนปรับค่าทำงานมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 7.13 % ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ทางกรุงเทพมหานครได้กำหนดไว้ว่ามวลดทอนปรับค่าไม่เกิน 2,000 กิโลกรัม จะต้องเพิ่มอัตราการสลายพลังงานได้ไม่น้อยกว่า 5% ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่ทางกรุงเทพมหานครได้กำหนดไว้ และยังได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งของมวลดทอนปรับค่าและสะพานไว้เพื่อศึกษาปัจจัยการทำงานต่างๆ โดยหลังจากที่ได้รับสัญญาณความเร่งจากอุปกรณ์ตรวจวัด ผู้วิจัยได้ทำการแปลงสัญญาณความเร่งเป็นสัญญาณความเร็วและหาพลังงานของสะพาน, พลังงานที่มวลดทอนปรับค่าดูดซับและการเคลื่อนที่เปรียบเทียบของสะพานผ่านการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MATLAB) โดยช่วงเวลาของผู้วิจัยทำการศึกษาคือช่วงเวลาที่ไม่มีแรงภายนอกกระทำกับสะพานเป็นเวลา 2 วินาที ซึ่งเหตุผลที่ผู้วิจัยเลือกช่วงเวลานี้เนื่องจากพบว่าลักษณะของสัญญาณที่ได้รับมีสัญญาณรบกวนน้อยและพลังงานที่มวลดทอนปรับค่าดูดซับในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจึงนำพลังงานที่เกิดขึ้นนี้แปลงเป็นค่าการเคลื่อนตัวของสะพานทั้งก่อนการติดตั้งและหลังการติดตั้งมวลดทอนปรับค่า ซึ่งการเคลื่อนที่ของสะพานหลังการติดตั้งมวลดทอนปรับค่า มีค่าเท่ากับ 1.037 มิลลิเมตร ในขณะที่การเคลื่อนที่ของสะพานในกรณีสมมติให้มวลดทอนปรับค่าไม่ทำงาน มีค่าเท่ากับ 1.151 มิลลิเมตร ดังนั้นประสิทธิภาพของมวลดทอนปรับค่า ทำให้การเคลื่อนที่ของสะพานลดลง 0.114 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 11%

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากปราศจากคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้วิชาพื้นฐานในภาคทฤษฎี โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ที่ได้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการทำวิจัยรวมถึงสนับสนุนในด้านต่างๆอย่างเต็มที่ และขอขอบคุณนายฐิติพงศ์ เจริญสุข ที่สนับสนุนข้อมูลที่เกี่ยวข้องในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงวิธีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆเพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณนายวรากร อิมรักษา ที่สนับสนุนให้คำแนะนำเพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจในภาคปฏิบัติที่มากยิ่งขึ้น ท้ายที่สุดนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีส่วนให้ข้อมูลแก่ผู้ที่สนใจที่จะศึกษาต่อเพื่อพัฒนานวัตกรรมต่างๆเพื่อเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพโรจน์ วัฒนานันท์, “การลดการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานด้วยมวลดทอนปรับค่า”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, pp. 26-45, 2010.
- [2] Elyas Bayat, Meysam Bayat and Raheb Hafezzadeh, “Numerical performance assessment of Tuned Mass Dampers to mitigate traffic-induced vibrations of a steel box-girder bridge”, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 78, no. 2, pages 125-134, 2021.
- [3] Let'icia Fleck Fadel Miguel and Guilherme Piva dos Santos (2021), Optimization of Multiple Tuned Mass Dampers for Road Bridges Taking into Account Bridge-Vehicle Interaction Random Pavement Roughness and Uncertainties, Hindawi Shock and Vibration, Vol. 2021, Article ID 6620427, pp 1-18, 2021.
- [4] Jiří Mäca, “Dynamic response of footbridges with tuned mass dampers”, Materials Science and Engineering, Vol.236, Article ID 012060, pp.2-6, 2017
- [5] Chopra, A. K., “Theory and Applications to Earthquake Engineering,” Dynamic of Structures, Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, New Jersey, USA, 2012.
- [6] ISO 13920, “Welding — General tolerances for welded constructions -Dimensions for lengths and angles — Shape and position,” International Standard, 1996
- [7] GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG, “Tuned mass damper”, brochure, pp.5.
- [8] ธนกฤต สุริยะพันธ์และพีรณีย์ ลอออรณพงศ์, การประยุกต์ใช้มวลดทอนปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2022.

- [9] ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, “ รายงานผลการทดสอบ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้านทานการสั่นไหว TUNED MASS DAMPER โครงการก่อสร้างปรับปรุงสะพานข้ามแยกบางกะปิ (สะพานลาดพร้าว- เสรีไทย)”, กรุงเทพมหานคร, 2024
- [10] Sukjun Joo, “Factory Acceptance Test Report for Bankapi Flyover Bridge TMD”, TESolution, 2023