# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่งานวิจัย

การพัฒนาทางเทคโนโลยีสะพานเป็นสิ่งจำเป็นตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบันและมีส่วนช่วยในการพัฒนาความเจริญเติบโตทางสังคมเป็นอย่างมากตัวอย่างเช่น สะพานที่สร้างขึ้นในเมืองใหญ่เพื่อใช้เป็นเส้นทางคมนาคมขนส่ง ช่วยให้การติดต่อระหว่างกันสะดวกยิ่งขึ้น ทำให้สินค้าหรือผลผลิตกระจายสู่ตลาดได้รวดเร็ว และช่วยระบายการจราจรบนท้องถนนที่มีความหนาแน่นในชั่วโมงเร่งด่วน เป็นต้น

ปัจจุบันนี้การคมนาคมและขนส่งทางรถยนต์ในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทุก ๆ ปี สืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้ปริมาณการจราจรบนท้องถนนหลายสายมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าได้มีการก่อสร้างสะพานข้ามทางแยก เพื่อช่วยระบายการจราจรบนท้องถนนอย่างต่อเนื่องก็ตาม ปัญหาดังกล่าวพบมากในสะพานที่มีปริมาณช่องทางการจราจรบนสะพานไม่เพียงพอกับปริมาณการจราจรที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสะพานข้ามทางแยกที่เปิดใช้มากว่า 20 ปี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสะพานโครงสร้างเหล็ก อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปความหนาแน่นของปริมาณการจราจรจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองทิศทางของการจราจรบนสะพานข้ามทางแยก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จะมีการจราจรบนสะพานในทิศทางใดทิศทางหนึ่งสามารถใช้การสัญจรได้อย่างคล่องตัว ซึ่งก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนเริ่มขึ้นในทิศทางการจราจรนั้นแล้วส่งผ่านการสั่นไหวไปยังฝั่งที่การจราจรเคลื่อนตัวไม่ได้ ทำให้ผู้ใช้รถยนต์หรือยานพาหนะได้รับผลกระทบต่อความรู้สึกสั่นสะเทือนได้ โดยที่ระดับความรุนแรงของการสั่นไหวที่รู้สึกได้นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สะพานช่วงยาวจะเกิดการสั่นไหวได้มากกว่าสะพานช่วงสั้น สะพานคอนกรีตเกิดการสั่นไหวได้น้อยกว่าสะพานเหล็ก ความถี่ของแรงพลวัต (Dynamic force) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในฝั่งที่การจราจรสามารถเคลื่อนตัวได้ ซึ่งหากความถี่ของแรงใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสะพานหรือยานพาหนะต่างๆบนสะพาน จะส่งผลให้ระดับความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งผลจากน้ำหนักบรรทุกที่มากและความเร็วที่สูงของยานพาหนะในฝั่งตรงข้ามก็สามารถทำให้สะพานเกิดการสั่นไหวได้มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ รอยต่อและความขรุขระของผิวจราจรก็ส่งผลให้ยานพาหนะเกิดการกระโดด ทำให้การสั่นตัวของสะพานเพิ่มมากขึ้น

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่ผู้ใช้ยานพาหนะต้องเผชิญอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะฉะนั้น วิศวกรโครงสร้างทางด้านสะพานจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ถึงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถออกแบบหรือปรับปรุงโครงสร้างสะพานให้เกิดการสั่นไหวน้อยที่สุด ซึ่งทำให้สะพานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเกิดประโยชน์ในการใช้งานสูงสุด ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานข้ามทางแยกในเขตกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นสะพานโครงสร้างเหล็กหน้าตัดประกอบรับแรงร่วมกับแผ่นพื้นคอนกรีต โดยที่คานหน้าตัดเหล็กประกอบแบบคานช่วงเดียวถูกติดตั้งอยู่บนคานขวางเหล็กประกอบที่จะถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดลงสู่เสาเหล็กกลม อีกทั้งจะดำเนินการศึกษาถึงผลของการสั่นสะเทือนที่กระทบต่อความรู้สึกรับรู้ได้ของผู้ใช้รถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานตามเกณฑ์ของมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 ควบคู่ไปกับแนวทางการลดผลการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จะกระทบต่อความรู้สึกรับรู้ได้ของผู้ใช้โดยสารด้วยการใช้มวลหน่วงปรับค่า (Passive tuned mass damper: TMD) ซึ่งจะถูกติดตั้งเข้าไปที่บริเวณกึ่งกลางช่วงใต้ท้องสะพาน

ในงานวิจัยนี้จะนำผลของค่าความเร่งและการเคลื่อนที่ของฐานรองที่ปลายคานช่วงเดียวทั้งสองด้านในแนวดิ่งที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งได้จากการตรวจวัดสัญญาณเก็บข้อมูลในภาคสนามของธนวรรธน์ โสภณมหาผล (2010) เพื่อใช้เป็นข้อมูลของแรงกระทำที่ฐานรองในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสะพานช่วงเดียวที่มีรถยนต์จอดนิ่งอยู่บนสะพานเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 ผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อมนุษย์ตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997

การสั่นไหวจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่เกิดขึ้นจากแรงพลวัตแล้วส่งผ่านไปสู่ร่างกายมนุษย์นั้น โดยทั่วไปมักจะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถเกิดขึ้นได้หลายทิศทางและมีช่วงความถี่มากมายจนทำให้ร่างกายของมนุษย์เกิดการสั่นไหวและอาจจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายเป็นที่น่ารำคาญใจ ความสามารถในการทำกิจกรรมบางอย่างลดลงหรือแม้กระทั่งผลกระทบต่อสุขภาพและอาจร้ายแรงถึงขั้นเจ็บป่วยได้ในที่สุด ดังนั้นจึงได้มีความพยามทำการค้นคว้าวิจัยในการที่จะสร้างมาตรฐานการตรวจวัดและประเมินผลเพื่อมารองรับปัญหาดังกล่าว เช่น มาตรฐาน ISO 2631-1:1997 ซึ่งมาตรฐานนี้ได้กำหนดแนวทางการ

ตรวจวัดการสั่นไหวของร่างกายมนุษย์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดและแปลงสัญญาณคลื่นความถี่ ซึ่งมีช่วงความถี่ที่ใช้พิจารณาอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 80 Hz ที่จะสามารถส่งผลต่อสุขภาพ (Health) ความสะดวกสบาย (Comfort) การรับรู้ (Perception) และความเจ็บป่วยจากการเคลื่อนไหว (Motion sickness) โดยที่ตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งอุปกรณ์จะขึ้นกับลักษณะของสภาพพื้นผิวสัมผัสร่างกาย (นุ่มหรือแข็ง) และการจัดวางตำแหน่งท่าทางของร่างกายขณะกำลังทำกิจกรรมแต่ละประเภท พร้อมทั้งการประเมินผลทางตัวเลขที่เสนอด้วยรูปแบบของค่าความเร่งภายใต้ช่วงระยะเวลาการตรวจวัดการสั่นไหว หลังจากนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าต่างๆที่กำหนดไว้ในมาตรฐานเพื่อหาระดับขั้นของการสั่นไหวของร่างกายที่อาจจะส่งผลต่อสุขภาพ ความสะดวกสบาย การรับรู้ และความเจ็บป่วยจากการเคลื่อนไหว ทั้งนี้มาตรฐานได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ความถี่ถ่วงน้ำหนัก (Frequency weighting) ที่แตกต่างกันไปเพื่อปรับกรองค่าการสั่นไหวของร่างกายตามค่าความถี่และลักษณะการจัดวางตำแหน่งท่าทางในแต่ละกิจกรรม คือ นั่ง นอน และยืน ซึ่งท่าทางเหล่านี้ให้ผลทางความรู้สึกต่อการสั่นไหวไม่เหมือนกัน

Griffin (2007) ได้ทำการศึกษาทบทวนมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 และ BS 6841:1987 ที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจวัด ประเมินผลและการหาค่าการสั่นไหวของร่างกายที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกไม่สะดวกสบายของผู้ขับขี่และผู้โดยสารรถยนต์ โดยการพิจารณาถึงความแตกต่างของขนาด ความถี่ ทิศทางและระยะเวลาการสั่นสะเทือน พบว่าทั้งสองมาตรฐานมีความคล้ายคลึงกันของหลักการข้อกำหนดการทำนายผลการสั่นสะเทือนที่มีต่อความรู้สึกสะดวกสบายในท่านั่งของผู้ใช้รถยนต์โดยสาร อันที่จริงแล้วมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 มีรากฐานมาจากมาตรฐาน BS 6841:1987 แต่ยุ่งยากต่อความเข้าใจมากกว่า อย่างไรก็ตามการตรวจวัดและประเมินผลการสั่นสะเทือนที่ก่อให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายโดยทั่วไปแล้วมักจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ เพราะนอกเหนือจากการเคลื่อนที่ที่เป็นปัจจัยหลักในการตรวจวัดแล้วอาจจะมีปัจจัยอย่างอื่น เช่น เสียง หรือความไม่สะดวกสบายของที่นั่ง เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัดและประเมินผลได้

Bonin และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบายและคุณภาพในการขับขี่ของผู้ใช้รถยนต์อันมีสาเหตุมาจากการขับขี่บนสภาพพื้นผิวการจราจรจริงที่มีความขรุขระด้วยการใช้มาตรฐาน ISO 2631-1:1997 ในการตรวจวัดและประเมินผล โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Seat Pad Accelerometer เข้าไปที่เบาะนั่ง

(บริเวณที่รองนั่งหรือที่พักหลัง) ของผู้โดยสารเพื่อตรวจวัดสัญญาณด้วยการใช้ความเร็วคงที่ที่แตกต่างกันทั้งหมด 8 ค่าของรถยนต์โดยสาร ซึ่งวิ่งในระยะทางที่กำหนดบนพื้นผิวถนนชนิดเดียวกันและได้แบ่งกลุ่มการเก็บข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มแรกไม่มีผู้โดยสารและใช้ระยะทาง 100 เมตร ส่วนกลุ่มที่เหลือจะมีผู้โดยสารและใช้ระยะทาง 100 เมตร ( 2 กลุ่ม) 185 เมตร (1 กลุ่ม) ตามลำดับ ข้อมูลทั้งหมดที่ตรวจวัดได้จะถูกนำไปประเมินผลด้วยการใช้แบบจำลองรถยนต์โดยสารชนิดที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับแปด เพื่อหาระดับขั้นของการสั่นไหวของร่างกาย พบว่าสภาพความขรุขระของพื้นผิวถนนทำให้เกิดความรู้สึกไม่สะดวกสบายจนส่งผลให้คุณภาพของการขับขี่ลดลง นอกจากนี้ ยังก่อให้เกิดความเสียหายต่อผิวถนนและรถยนต์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีปฏิกิริยาต่อกันระหว่างรถยนต์และถนนจนทำให้เกิดแรงพลวัตขึ้น อย่างไรก็ตาม การประเมินผลอาจให้ระดับขั้นของความรู้สึกต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกับความรู้สึกจริงๆของผู้ใช้โดยสาร เพราะอาจจะมีการสั่นสะเทือนภายในรถยนต์ส่งผ่านไปยังผู้ใช้โดยสารโดยตรงในส่วนต่างๆ ของร่างกายที่ไม่ได้สัมผัสกับอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญานตรงตำแหน่งที่ติดตั้งไว้

ธนวรรธน์ โสภณมหาผล (2010) ได้ทำการเก็บสัญญาณข้อมูลการเคลื่อนที่จริงตามแนวดิ่งของฐานรองรับคานในภาคสนามของสะพานข้ามทางแยกพระราม 9 บริเวณแยก อ.ส.ม.ท. ในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นสะพานช่วงเดียวหน้าตัดเหล็กประกอบรองรับแผ่นพื้นคอนกรีต โดยการเคลื่อนที่นี้มีผลมาจากการสั่นของคานขวางภายใต้การเคลื่อนที่ของรถบรรทุกผ่านสะพานด้วยความเร็ว 5, 30 และ 60 km/hr และสัญญาณข้อมูลจากการเคลื่อนที่ผ่านของยานพาหนะจากสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้สัญญาณข้อมูลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างสะพานและถูกใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าผลตอบสนองการสั่นสะเทือนในรูปแบบความเร่งสูงสุดของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานที่ตำแหน่งต่างๆ บนสะพาน ซึ่งค่าความเร่งสูงสุดที่ได้นี้ผู้วิจัยได้นำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากล ISO 2631-1:1997 เพื่อประเมินผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่ส่งผลโดยตรงต่อผู้ใช้รถยนต์ ผลการศึกษาพบว่าผู้ใช้รถยนต์สามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นไหวของสะพานและมีความเป็นไปได้ที่อาจจะส่งผลกระทบต่อความรู้สึกสะดวกสบาย แต่ผลกระทบต่อสุขภาพจะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างต่ำ

1.2.2 ผลกระทบจากการสั่นไหวของสะพานที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะที่วิ่งผ่าน

Moghimi และ Ronagh (2008) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานช่วงเดียวหน้าตัดประกอบรับแรงร่วมระหว่างคานเหล็กรูปหน้าตัดตัวไอและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มียานพาหนะวิ่งผ่านบนสะพาน ซึ่งจะพิจารณาถึงปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความเร็ว คุณสมบัติ

ของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองคานสะพาน อัตราส่วนความลึกของคานเหล็กต่อความยาว ประเภทของยานพาหนะ ความต่อเนื่องของแผ่นพื้นคอนกรีต และการกระโดดของยานพาหนะเนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวถนนด้วยการใช้แบบจำลองไฟไนเอลลิเมนท์ 3 มิติในการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางพลศาสตร์ ผลจากการวิเคราะห์จะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟความรู้สึกได้ต่อการสั่นไหวของมนุษย์ผ่านทางความเร่งที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงความถี่ต่างๆ ทั้งนี้มาตรฐาน ISO ได้แนะนำช่วงความถี่ที่มนุษย์สามารถรู้สึกได้ต่อการสั่นสะเทือนในแนวราบอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 Hz และการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งอยู่ระหว่าง 4 ถึง 8 Hz ผลจากงานวิจัยนี้ พบว่าความเร็วของยานพาหนะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสั่นไหวของสะพาน กล่าวคือ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองของความเร่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งยังส่งผลให้การกระโดดของยานพาหนะเพิ่มมากขึ้นและที่บริเวณตำแหน่งใกล้ฐานรองจะเกิดการสั่นไหวมากกว่าตรงกลางช่วงคาน ถ้าค่าสติฟเนสของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองมีค่าน้อยซึ่งจะทำให้เกิดการยืดตัวสูง สำหรับการเพิ่มค่าอัตราส่วนความลึกของคานต่อความยาวจะทำให้ค่าสติฟเนสของสะพานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น การสั่นไหวจะเกิดน้อยลง ในทำนองเดียวกัน หากยานพาหนะมีน้ำหนักบรรทุกน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักสะพาน การสั่นไหวจะไม่เกิดขึ้นมากนัก นอกจากนี้ การลดจำนวนรอยต่อที่แยกขาดจากกัน (Expansion joint) ของแผ่นพื้นคอนกรีตจะช่วยลดการสั่นไหวลงได้ และจากผลสรุปต่างๆ เหล่านั้น ทางผู้วิจัยและคณะได้มีข้อแนะนำให้ใช้ค่าอัตราส่วนความลึกของคานต่อความยาวไม่เกินกว่า 1/20 ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของสะพานบนตำแหน่งใดๆ ภายใต้การกระทำของน้ำหนักแบบสถิต 100 กิโลนิวตัน ไม่ควรมากกว่า 6 มิลลิเมตร ซึ่งค่าการแอ่นตัวนี้อยู่บนพื้นฐานของยานพาหนะที่มีน้ำหนักปกติ (ไม่รวมถึงรถบรรทุกหนัก) วิ่งผ่านสะพานบนสภาพพื้นผิวที่ดีไม่มีความขรุขระ

1.2.3 การใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว (Single tuned mass damper: STMD) เพื่อลดการสั่นไหว

การใช้มวลหน่วงปรับค่าเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อลดการสั่นไหวของโครงสร้างประกอบด้วย มวล (Auxiliary mass) สปริง (Spring) ตัวหน่วง (Viscous damper) ติดตั้งเข้ากับโครงสร้างหลัก (Main structure) แล้วทำการปรับจูนค่าความถี่ ทั้งนี้หากปรับจูนค่าความถี่ให้มีความเหมาะสมแล้ว จะสามารถดูดซับหรือสลายพลังงานจากโครงสร้างหลักได้เป็นอย่างดีจนส่งผลให้ขนาดการสั่นไหวลดลง

Warburton และ Ayorinde (1980) ได้ทำการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimum parameters) ของมวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดผลการสั่นไหวของโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย อัตราส่วนปรับค่าความถี่ (Tuning ratio: $\alpha$) อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า (TMD's damping ratio: $\zeta_d$) และค่าสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamic magnification factor: $DMF$) โดยได้ทำการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าเข้ากับโครงสร้างหลักที่มีความหน่วงต่ำ (Light damped main structure) ได้แก่ คานช่วงเดียว แผ่นเหล็ก และโครงสร้างแผ่นเปลือกบางรูปทรงกระบอก (Cylindrical shell) ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode) เท่านั้นและใช้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค (Harmonic excitation) กระทำต่อโครงสร้างหลัก การวิเคราะห์จะใช้วิธีการเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากสูตรแบบปิด (Closed-form formulae) ของระบบอย่างง่ายประกอบด้วย โครงสร้างหลักที่ไม่มีความหน่วง (Undamped main structure) และมวลหน่วงปรับค่า จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเทียบกับค่าอัตราส่วนของมวล (Mass ratio: $\mu$) จากสูตรแบบปิดหรือเรียกว่ากราฟมาตรฐาน จะให้ผลใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้มาจากวิธีการเชิงตัวเลขของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับคานและแผ่นเหล็ก ในทางตรงกันข้าม กรณีของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับโครงสร้างแผ่นเปลือกบางซึ่งมีค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดใกล้เคียงกันมาก (Closely spaced frequency) ซึ่งค่าอัตราส่วนของความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ 2 ต่อโหมดที่ 1 มีค่าน้อยกว่าสอง จะให้ค่าที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นกราฟมาตรฐานมาก ดังนั้นทางผู้วิจัยได้ให้ข้อสรุปว่า สามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากเส้นกราฟมาตรฐาน ซึ่งให้ความแม่นยำเพียงพอในการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับคานและแผ่นเหล็กภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค แต่จะมีความคลาดเคลื่อนหากนำไปประยุกต์กับโครงสร้างแผ่นเปลือกบาง

Warburton (1981) ได้ทำการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับระบบที่มีการรวมมวล (Lumped mass) สำหรับโครงสร้างหลักที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสอง (2-DOF main structure) ไม่มีความหน่วงเพื่อลดผลการสั่นไหวภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคที่กระทำต่อโครงสร้างหลักที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง (มวลก้อนเดียว) ด้วยการแปลงมวลของโครงสร้างหลักไปเป็นมวลประสิทธิผล (Effective mass) เทียบเท่าในระบบอย่างง่ายที่มีโครงสร้างหลักที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่ง (1-DOF main structure) ไม่มีความหน่วงทำงานร่วมกับมวลหน่วงปรับค่า หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเทียบเท่าจะหาได้จากสูตร

แบบปิด และสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเทียบเท่าเทียบกับค่าอัตราส่วนของมวลประสิทธิผล (Effective mass ratio: $\mu_{eff}$) จากสูตรแบบปิดเช่นเดียวกับงานของ Warburton และ Ayorinde (1980) ที่กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้จะพิจารณาช่วงความถี่ของแรงกระตุ้นแบ่งออกเป็นช่วงความถี่แคบ (Narrow frequency band) และช่วงความถี่กว้าง (Broad frequency band) จากผลของข้อมูลทั้งหมดทางผู้วิจัยให้ข้อสรุปว่า การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าของโครงสร้างหลักระบบ 2-DOF ไม่มีความหน่วงภายใต้แรงกระทำแบบฮาร์โมนิคสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากสูตรแบบปิดด้วยการใช้มวลประสิทธิผลเทียบเท่า แต่ค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลักทั้งสองโหมดจะต้องมีความแตกต่างกันมากพอจึงจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Warburton (1982) ได้วิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าและผลตอบสนองของโครงสร้างที่มีและไม่มีความหน่วง ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคและไร้รูปแบบ (Random excitation) ประเภท White noise โดยที่แรงกระตุ้นเหล่านี้แบ่งเป็นแรงกระทำที่โครงสร้างและกระทำที่ฐานของโครงสร้างเนื่องจากการเคลื่อนที่และความเร่ง ในกรณีแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่างๆ สามารถทำได้ด้วยการ minimize ค่าผลตอบสนองมากที่สุดของโครงสร้างให้มีค่าน้อยที่สุดซึ่งมีเงื่อนไขคือ $\partial R_j / \partial \alpha = 0$ และ $\partial R_j / \partial \zeta_d = 0$ และในกรณีแรงกระตุ้นที่ไร้รูปแบบจะ minimize ค่าการแปรผันของผลตอบสนอง (Variance of response: $\sigma^2$) หรือ Mean square ของโครงสร้างให้มีค่าน้อยที่สุดซึ่งมีเงื่อนไขคือ $\partial \sigma^2 / \partial \alpha = 0$ และ $\partial \sigma^2 / \partial \zeta_d = 0$ ทั้งนี้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่าง ๆ จะแสดงในรูปของสูตรแบบปิดและอยู่ในเทอมของอัตราส่วนมวล ($\mu$) สำหรับโครงสร้างไม่มีความหน่วง แต่สำหรับกรณีโครงสร้างมีความหน่วงไม่สามารถทำให้อยู่ในรูปของสูตรแบบปิดได้ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Fujino และ Abe (1993) ได้พัฒนาและเสนอสูตร Empirical formulas ด้วยการใช้วิธี Perturbation technique ที่มีรากฐานมากจากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีภายใต้ข้อสมมุติฐานของอัตราส่วนมวลที่น้อย นั่นคือ $\mu < 0.02$ สำหรับใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวติดเข้ากับโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วงภายใต้แรงกระตุ้นหลายรูปแบบ คือ แรงกระตุ้นไร้รูปแบบประเภท White noise แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค และ Self-excitation อีกทั้งยังรวมถึงกรณีการสั่นแบบอิสระด้วย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ minimize ค่าขนาดของ

ผลตอบสนองการสั่นให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย อัตราส่วนมวล อัตราส่วนปรับจูนความถี่ อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าและโครงสร้างหลัก และอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent damping) ซึ่งเปรียบเสมือนความหน่วงที่เพิ่มเข้าไปในโครงสร้าง สูตรที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสูตรแบบปิดซึ่งได้จากการวิเคราะห์ตามทฤษฎี ทางผู้วิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสูตรทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสูตรที่พัฒนาขึ้นนี้จึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้ได้กับโครงสร้างที่มีความหน่วงน้อยกว่า 0.02

Tsai และ Lin (1993) ได้นำเสนอวิธีการเชิงตัวเลขสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าซึ่งติดเข้ากับโครงสร้างหลักที่มีความหน่วงเพื่อลดผลการสั่นไหวภายใต้แรงกระตุ้นที่ฐานของโครงสร้างหลักแบบฮาร์โมนิค จนทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กระตุ้นด้วยระยะเคลื่อน (Fixed-displacement amplitude) และกระตุ้นด้วยความเร่ง (Fixed-acceleration amplitude) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ อัตราส่วนของมวล อัตราส่วนปรับค่าความถี่ อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างหลักและสัมประสิทธิ์ปรับขยายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ จะถูกนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนมวลซึ่งทำให้สามารถสร้างสูตรแบบชัดแจ้ง (Explicit formulae) สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัตราส่วนปรับค่าความถี่ และอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าจากแรงกระตุ้นทั้งสองกรณี โดยที่ความสัมพันธ์จะอยู่ในเทอมของอัตราส่วนมวลและอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างหลัก แต่สูตรที่สร้างขึ้นนี้จะใช้ได้สำหรับค่าอัตราส่วนมวลไม่มากกว่า 0.2 และค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างหลักจะต้องน้อยกว่า 0.15 อย่างไรก็ตาม วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถใช้สร้างสูตรเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีค่าอัตราส่วนมวลและอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างหลักนอกเหนือจากช่วงดังกล่าว จากค่าพารามิเตอร์ทีได้ยังพบอีกว่า ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่จะมีอิทธิพลต่อผลตอบสนองการสั่นไหวมากกว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าโดยเฉพาะในกรณีของแรงกระตุ้นที่ฐานด้วยความเร่ง นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการลดความสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าจะลดลง เมื่อใช้กับโครงสร้างหลักที่มีค่าความหน่วงมาก อย่างไรก็ตาม ค่าผลตอบสนองต่อการสั่นไหวโดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสูตรที่นำเสนอเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสูตรสำหรับโครงสร้างหลักที่ไม่มีความหน่วงจะให้ค่าไม่แตกต่างกันมาก

Lin และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับโครงสร้างหลักที่มีความหน่วงเพื่อลดผลการสั่นที่เกิดขึ้นด้วยการใช้แบบจำลองการรวมมวลที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสองภายใต้แรงกระทำที่ไร้รูปแบบประเภท White noise excitation โดยแรงที่ใช้ในการศึกษานี้กำหนดให้เป็นแรงลมกระทำที่โครงสร้างหลักและแรงแผ่นดินไหวกระทำที่ฐานของโครงสร้างหลักด้วยการทำให้ได้ค่าน้อยที่สุด (Minimize) ของค่า Mean square ratios ของการขจัดเนื่องจากแรงลม ($R_{dW}$) และแผ่นดินไหว ($R_{dE}$) และความเร่งเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว ($R_{aE}$) ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นเป้าหมายของโครงสร้างหลักที่มีและไม่มีมวลหน่วงปรับค่าเพื่อหาค่าอัตราส่วนมวลที่เหมาะสม อัตราส่วนปรับค่าความถี่และอัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่า โดยที่ค่าฟังก์ชั่นเป้าหมายเหล่านี้จะอยู่ในเทอมของค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนมวล ($\mu$) ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ ($\alpha$) ค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ($\zeta_d$) และของโครงสร้างหลัก ($\zeta_s$) จากการศึกษานี้พบว่าโครงสร้างที่มีความถี่ธรรมชาติพื้นฐานต่ำกว่าความถี่แรงกระตุ้นจากแรงลมและแผ่นดินไหวซึ่งจะต้องเป็นโครงสร้างประเภทอาคารหรือหอสูงที่ตั้งอยู่บนดินแข็งจะมีความเหมาะสมในการใช้งานมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวเพื่อลดผลของการสั่นไหวได้ภายใต้การจำลองแรงกระทำเป็นประเภท White noise excitation และทางผู้วิจัยยังพบอีกว่า มวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีในการลดผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างที่มีค่าความหน่วงน้อย (Lightly damped structure) และมวลหน่วงปรับค่าจะลดผลตอบสนองการสั่นของค่า $R_{dW}$ เนื่องจากแรงลมได้มากกว่าค่า $R_{dE}$ เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว นอกเหนือจากนี้ ทางผู้วิจัยได้เสนอสูตรเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าซึ่งเมื่อนำค่าเหล่านี้ไปออกแบบมวลหน่วงปรับค่าจะสามารถช่วยลดผลตอบสนองการกระจัดและความเร่งของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro ได้เป็นอย่างดี

Rana และ Soong (1998) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของมวลหน่วงปรับค่าที่ติดเข้ากับโครงสร้างหลักทั้งที่มีและไม่มีความหน่วงซึ่งเป็นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสองภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคกระทำที่โครงสร้างและฐานของโครงสร้างรวมถึงแรงแผ่นดินไหว El Centro กระทำที่ฐานของโครงสร้างด้วย ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของมวลหน่วงปรับค่ามากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ทางผู้วิจัยชี้ให้เห็นว่า สำหรับกรณีของแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค เมื่อค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบมวลหน่วงปรับค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (อัตราส่วนปรับค่าความถี่และอัตราส่วนความหน่วง) หรือเรียกว่า

Detuning จะส่งผลทำให้ผลตอบสนองการสั่นที่สภาวะคงที่สูงขึ้น โดยที่การเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่จะมีผลกระทบต่อผลตอบสนองการสั่นมากกว่าการเบี่ยงเบนของค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของ Detuning จะลดลงเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนมวลเพิ่มมากขึ้นหรือใช้มวลหน่วงปรับค่ากับโครงสร้างที่มีความหน่วงสูง และสำหรับกรณีของแรงแผ่นดินไหวซึ่งจากผลการวิเคราะห์ของ Time-history analysis ผู้วิจัยพบว่ามวลหน่วงปรับค่าจะลดผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างที่มีความหน่วงมากได้น้อย อีกทั้งสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากสูตรแบบปิด (Closed-form formulae) ที่ได้ด้วยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสำหรับโครงสร้างไม่มีความหน่วงภายใต้แรงกระตุ้นที่ฐานแบบฮาร์โมนิคไปออกแบบมวลหน่วงปรับค่าในการลดผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้ นอกจากนี้แล้วทางผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวกับโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง (MDOF structure) โดยที่โครงสร้างจะมีโหมดการสั่นอยู่หนึ่งโหมดที่มีอิทธิพลมากกว่าโหมดอื่นๆ ซึ่งสามารถพิจารณาเปรียบเสมือนโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งได้โดยการวิเคราะห์เชิงโหมด

1.2.4 การใช้มวลหน่วงปรับค่ามากกว่าหนึ่งชุด (Multiple tuned mass damper: MTMD) เพื่อลดการสั่นไหว

มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นได้ดีสำหรับโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งและโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่งซึ่งมีความถี่ธรรมชาติในโหมดพื้นฐานแตกต่างจากโหมดที่สองมาก จึงทำให้สามารถเทียบเท่าเป็นโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งได้ ทั้งนี้ความถี่แรงกระตุ้นจะต้องอยู่ในช่วงแคบและมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ในทางตรงกันข้าม ถ้าความถี่แรงกระตุ้นมีช่วงกว้างและ/หรือโครงสร้างมีความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นใกล้เคียงกันแล้ว อิทธิพลของโหมดการสั่นที่สูงจะส่งผลต่อผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างทำให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวลดลง ดังนั้น ในการกำจัดข้อด้อยเหล่านี้จึงได้มีการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของระบบโครงสร้างที่ใช้มวลหน่วงปรับค่าหลายชุดเพื่อลดผลการสั่นและผลของ Detuning ในช่วงเวลาต่อมา

Xu และ Igusa (1992) ได้ศึกษาลักษณะพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดติดเข้ากับโครงสร้างหลักซึ่งเป็นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่งภายใต้แรง

กระตุ้นแบบฮาร์โมนิคกระทำต่อโครงสร้าง โดยที่คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดที่ใช้จะกำหนดให้มีค่าสติฟเนสของปริงและสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากันทุกชุด อีกทั้งค่าความถี่ปรับจูนจะมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยมีค่าแตกต่างของความถี่เท่ากัน (Equally spaced frequency) ในช่วงความถี่ใช้งาน (Span of natural frequency) นอกจากนี้ยังกำหนดให้ค่าเฉลี่ยของความถี่ปรับจูนมีค่าเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลักด้วย แต่มวลของมวลหน่วงปรับค่าแต่ละชุดจะไม่เท่ากัน โดยผลเฉลยสำหรับผลตอบสนองของโครงสร้างหลักของระบบนี้จะถูกทำให้ง่ายลงเป็นค่าโดยประมาณภายใต้เงื่อนไขคือ ความถี่ปรับจูนของมวลหน่วงปรับค่าแต่ละชุดจะต้องมีค่าใกล้เคียงกันมากและมีค่าแตกต่างของความถี่น้อยมากเช่นกัน โดยค่าผลตอบสนองของโครงสร้างนี้สามารถเทียบเท่ากับระบบที่มีเฉพาะโครงสร้างหลักที่ไม่ติดมวลหน่วงปรับค่าเพียงแต่ในเทอมของอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างหลักจะมีอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent damping) เพิ่มเติมเข้ามา กล่าวคือ มวลหน่วงปรับค่าจะช่วยเพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้างหลักส่งผลให้การสลายพลังงานของระบบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่านี้จะแปรผันโดยตรงกับมวลของมวลหน่วงปรับค่า และแปรผกผันกับค่าแตกต่างของความถี่ นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าจะไม่ขึ้นกับค่าความถี่แรงกระตุ้นภายใต้เงื่อนไขของความถี่ใช้งานต้องกว้างกว่าผลต่างระหว่างความถี่แรงกระตุ้นกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลักมาก และยังไม่ขึ้นกับอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าโดยที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงนี้จะต้องมีค่าน้อยมาก ทางผู้วิจัยได้นำระบบดังกล่าวข้างต้นไปเปรียบเทียบกับระบบอย่างง่ายซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสองที่มีมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวติดเข้ากับโครงสร้างหลัก โดยที่มวลรวมทั้งหมดของทั้งสองระบบนี้จะมีค่าเท่ากันภายใต้แรงกระทำเนื่องจากความเร่งที่ฐานแบบ White noise base acceleration ซึ่งผู้วิจัยชี้ให้เห็นว่า ผลตอบสนองของโครงสร้างที่ติดมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวและมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดมีค่าไม่แตกต่างกันมากเมื่อค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากพอ ในทางตรงกันข้าม เมื่อค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าน้อยมากจะส่งผลให้มวลหน่วงปรับค่าหลายชุดมีประสิทธิภาพในการลดผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างได้มากกว่ามวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว ในความเป็นจริงแล้วการที่จะทำให้มวลหน่วงปรับค่ามีค่าความหน่วงน้อยๆ นั้นเป็นไปได้ยากมาก แต่ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยใช้ Liquid tuned damper (LTD) แทนมวลหน่วงปรับค่า

Yamaguchi และ Harnpornchai (1993) ได้ศึกษาสมรรถนะของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดที่ใช้เพื่อลดผลการสั่นของโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง โดยที่มวลและอัตราส่วน

ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าถูกกำหนดให้เท่ากันทุกชุด อีกทั้งใช้ความถี่ปรับค่าของมวลหน่วงปรับค่าชุดที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลักและมีค่าแตกต่างของความถี่เท่ากันตลอดช่วงความถี่ใช้งาน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงและสติฟเนสจะไม่เท่ากันในแต่ละชุดภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคที่มีความถี่ค่าหนึ่งกระทำต่อโครงสร้างหลัก จากการศึกษาทางผู้วิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์หลักที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพสำหรับลดการสั่นในโครงสร้างหลักของมวลหน่วงปรับค่าประกอบด้วย ช่วงความถี่ใช้งาน (Frequency range) อัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า และจำนวนชุดของมวลหน่วงปรับค่าที่ใช้ ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์หากมีค่าที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ผลตอบสนองของโครงสร้างลดลงได้อย่างมากและมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างขึ้น อย่างไรก็ดี ผู้วิจัยให้คำแนะนำสำหรับการออกแบบมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดว่า จำนวนที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีนั้นจะต้องขึ้นกับช่วงความถี่ใช้งานและอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าซึ่งจะต้องพิจารณาควบคู่กันไปดังนี้ กรณีที่ 1 ใช้จำนวนของมวลหน่วงปรับค่าน้อยหรือมีค่าแตกต่างของความถี่มากร่วมกับค่าอัตราส่วนความหน่วงมาก กรณีที่ 2 ใช้จำนวนของมวลหน่วงปรับค่ามากหรือมีค่าแตกต่างของความถี่น้อยและใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงน้อย โดยที่ทั้งสองกรณีนี้มีช่วงความถี่ใช้งานเหมือนกัน ซึ่งค่านี้จะเป็นพารามิเตอร์หลักที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างหลัก นอกจากนี้แล้วทางผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความสามารถใช้งานที่ยังน่าเชื่อถือได้ของมวลหน่วงปรับค่าเมื่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของระบบเปลี่ยนไปหรือเกิด Detuning ซึ่งเรียกว่า Robustness ระหว่างมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดกับมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว พบว่า เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดจะมีประสิทธิภาพสำหรับลดผลการสั่นได้ดีกว่า แต่จะมีคุณสมบัติด้าน Robustness น้อยกว่ามวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว (เฉพาะในการศึกษานี้เท่านั้น) แต่อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มคุณสมบัติ Robustness ให้ดีกว่ามวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวได้โดยการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานมากกว่าค่าที่เหมาะสมขึ้นอีกเล็กน้อยซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าลดลงไปไม่มากนัก

Abe และ Igusa (1995) ได้นำมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว (TMD) และมวลหน่วงปรับค่าหลายชุด (MTMD) ไปติดกับโครงสร้างที่มีทั้งแบบจำลองที่มีความต่อเนื่องซึ่งเป็นคานช่วงเดียวที่มีความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดการสั่นแตกต่างกันมากและคานช่วงเดียวที่มีส่วนยื่นและมีฐานรองข้างหนึ่งเป็นสปริงที่มีความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดใกล้เคียงกัน และแบบจำลองรวมมวลซึ่งมีมวลสองก้อน Couple กันอยู่โดยจำลองมากจากโครงสร้างจริง เช่น อาคารสองหลังเชื่อมด้วย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สะพานคนเดิน หรือ เสาสะพานแขวน เป็นต้น ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการสั่นของระบบโดยใช้วิธี Perturbation ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคที่มีความถี่ในช่วงกว้างกระทำที่โครงสร้าง และใช้ค่าพารามิเตอร์ของ TMD จากวิธีที่เสนอโดย Den Hartog ซึ่ง Warburton และ Ayorinde (1980) ได้กล่าวไว้ จากผลการศึกษาทางผู้วิจัยพบว่า ในกรณีของคานช่วงเดียวซึ่งมีแรงกระตุ้นกระทำที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่และกึ่งกลางคาน และติด TMD 1 ชุดที่ตำแหน่ง L/2, TMD 3 ชุดที่ตำแหน่ง L/6, L/2 และ 5L/6 และใช้ MTMD 3 ชุดซึ่งในแต่ละชุดจะประกอบด้วย TMD 7 ชุดที่ตำแหน่ง L/6, L/2 และ 5L/6 โดยที่อัตราส่วนมวลทั้งหมดของมวลหน่วงปรับค่าในแต่ละกรณีจะเท่ากัน จากผลการศึกษาผู้วิจัยพบว่า ตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่าและแรงกระตุ้นจะมีผลต่อผลตอบสนองการสั่นซึ่งหากต้องการลดผลกระทบจากโหมดการสั่นที่สูงสามารถทำได้โดยการใช้จำนวนของมวลหน่วงปรับค่าเพิ่มมากขึ้นพร้อมทั้งจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม และผลตอบสนองการสั่นสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการใช้ MTMD ซึ่งจะทำให้มีช่วงความถี่ใช้งานกว้างกว่ากรณีการใช้ TMD สำหรับกรณีของแบบจำลองรวมมวลซึ่งมีมวลสองก้อน Couple กันอยู่และมีแรงกระตุ้นกระทำที่ Main mass 1 ทั้งนี้ในกรณีที่ 1 ได้ติด TMD 1 ชุดเข้ากับ Main mass 1 โดยใช้อัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.01 และ 0.02 กรณีที่ 2 ได้ติด MTMD 1 ชุดที่มีจำนวน 20 TMDs เข้ากับ Main mass 1 กรณีที่ 3 ได้ติด TMD 1 ชุดเข้ากับ Main mass 1 และ Main mass 2 โดยใช้อัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.01 และสำหรับกรณีที่ 4 ได้ติด MTMD 1 ชุดที่มีจำนวน 10 TMDs เข้ากับ Main mass 1 และ Main mass 2 ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 และ 2 แม้จะมีการติดมวลหน่วงปรับค่าเข้าไปที่โครงสร้างตรงตำแหน่งที่มีแรงกระตุ้นกระทำของระบบโครงสร้างที่ Couple กันอยู่ซึ่งมีความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดใกล้เคียงกันก็ไม่สามารถที่จะลดผลตอบสนองการสั่นได้มากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการติด TMD และ MTMD เข้าไปที่ Main mass ทั้งสองตามกรณีที่ 3 และ 4 ก็จะสามารถลดการสั่นได้ดี โดยเฉพาะสำหรับกรณีที่ใช้ MTMD จะมีผลตอบสนองการสั่นที่ต่ำและมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างกว่ากรณีที่ใช้ TMD และสุดท้ายสำหรับกรณีของคานช่วงเดียวที่มีส่วนยื่นและมีฐานรองข้างหนึ่งเป็นสปริงซึ่งมีแรงกระตุ้นกระทำที่ตำแหน่ง L ซึ่งเป็นตำแหน่งปลายคานส่วนยื่นและ 0.471L ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคานช่วงเดียว และติด TMD 1 ชุดที่ตำแหน่ง L, TMD 2 ชุดที่ตำแหน่ง L และ 0.471L โดยที่อัตราส่วนมวลทั้งหมดของมวลหน่วงปรับค่าในแต่ละกรณีจะเท่ากัน ผู้วิจัยได้แบ่งการออกแบบเป็น 3 กรณีคือ กรณี A จะหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าโดยการ minimize หรือทำให้เกิดค่าน้อยสุดของผลตอบสนองสูงสุดของการสั่นภายใต้แรงกระตุ้นที่ตำแหน่ง L กรณี B จะ minimize ผลตอบสนองสูงสุดของการสั่นภายใต้แรง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 29 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 247061
เลขเรียกหนังสือ

กระตุ้นที่ตำแหน่ง 0.471L กรณี C จะ minimize ผลตอบสนองสูงสุดของการสั่นด้วยการเทียบเท่าโครงสร้างคานไปเป็นแบบจำลองของ Den Hartog จากการศึกษาผู้วิจัยพบว่า การใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยมากกว่าหนึ่งชุดและจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมบนโครงสร้างสำหรับแบบจำลองที่มีความต่อเนื่องซึ่งมีความถี่ธรรมชาติใกล้เคียงกันจะมีประสิทธิภาพในการลดผลตอบสนองการสั่นของโครงสร้างและมีคุณสมบัติ Robustness ดีกว่าการใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวหนึ่งชุด

Joshi และ Jangid (1997) ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดที่ติดเข้ากับโครงสร้างหลักมีความหน่วงซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้ความเร่งกระตุ้นที่ฐานที่ไร้รูปแบบประเภท White noise โดยกำหนดให้ค่าสติฟเนสและสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่ามีค่าเหมือนกันทุกชุด อีกทั้งใช้ความถี่เฉลี่ยของมวลหน่วงปรับค่าทุกชุดปรับจูนให้ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างหลักและมีค่าแตกต่างของความถี่เท่ากันตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าประกอบด้วยอัตราส่วนช่วงความถี่ใช้งานต่อค่าเฉลี่ยความถี่ของมวลหน่วงปรับค่าทุกชุด ($\gamma_{opt}$) ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่ ($\alpha_{opt}$) และค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความหน่วง ($\zeta_{d,opt}$) ซึ่งค่าเหล่านี้ได้ถูกหาโดยการทำให้ฟังก์ชั่นเป้าหมาย Root mean square (r.m.s.) ของการขจัดของโครงสร้างหลักมีค่าน้อยที่สุดด้วยวิธีการเชิงตัวเลข นอกจากนี้ยังได้หาค่าอัตราส่วนความหน่วงเทียบเท่าที่เหมาะสม ($\zeta_{eq}^{opt}$) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการเพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้าง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ได้นำไปเปรียบกับระบบโครงสร้างที่มีมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวซึ่งมีมวลรวมของมวลหน่วงปรับค่าเท่ากันทั้งสองระบบ และจากผลการวิเคราะห์ทางผู้วิจัยพบว่า ค่า $\zeta_{d,opt}$ มีค่าน้อยกว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว สำหรับค่า $\gamma_{opt}$ จะมากกว่าหรือมีช่วงความถี่ใช้งานกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว และในกรณีของค่า $\alpha_{opt}$ จะมากกว่ากรณีของการใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว สำหรับค่า $\zeta_{eq}^{opt}$ ของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดจะสูงกว่ากรณีของมวลหน่วงปรับค่าเพียงชุดเดียวหรืออีกนัยหนึ่ง ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าหลายชุดจะดีกว่ามวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวเมื่อใช้อัตราส่วนมวลเท่ากัน

Park และ Reed (2001) ได้ศึกษาสมรรถนะในด้านประสิทธิภาพและคุณสมบัติ Robustness อีกทั้งยังรวมถึงประสิทธิภาพในการทำงานได้ของ MTMD เมื่อมีมวลหน่วงปรับค่าบางตัวชำรุดเสียหายหรือใช้การไม่ได้ (Redundancy) โดยที่ MTMD ได้ถูกติดเข้ากับโครงสร้าง

หลักมีความหน่วงน้อย ($\zeta_s = 0.01$) ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคกระทำต่อโครงสร้างและแรงแผ่นดินไหว El Centro และ Imperial Valley ทั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ใช้มวลของมวลหน่วงปรับค่าแต่ละชุดเท่ากันหรือกระจายอย่างสม่ำเสมอ (Uniformly distributed mass dampers: UDMRS) กรณีที่ 2 ใช้มวลของมวลหน่วงปรับค่ากระจายแบบเชิงเส้น (Linearly distributed mass dampers: LDMRS) ซึ่งมวลที่อยู่ตำแหน่งตรงกลางจะมีค่ามากที่สุด และได้มีการกำหนดให้ค่าอัตราส่วนมวลรวมทั้งหมดเท่ากับ 1% ค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าแต่ละชุดและค่าแตกต่างของความถี่มีค่าเท่ากันตลอดช่วงกว้างของความถี่ที่ใช้สำหรับทั้งสองกรณี อีกทั้งยังปรับค่าความถี่เฉลี่ยของ MTMD ให้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง วิธีการเชิงตัวเลขได้ถูกใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าประกอบด้วย ช่วงกว้างของความถี่ที่ใช้ ($FR_{opt}$) ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่เฉลี่ย ($\alpha_{opt}$) และค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า ($\zeta_{d,opt}$) โดยมีผลตอบสนองการกระจัดสูงสุดเป็นฟังก์ชั่นเป้าหมาย จากผลการศึกษาผู้วิจัยพบว่าในกรณี UDMRS จะให้ค่าผลตอบสนองที่ต่ำซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่ากรณี LDMRS และในเรื่องคุณสมบัติ Robustness ภายใต้สภาวะการเกิด Detuning ผู้วิจัยให้ข้อสรุปว่า กรณี LDMRS จะมีคุณสมบัติในด้านนี้ดีกว่ากรณี UDMRS เล็กน้อย และสามารถเพิ่มคุณสมบัติ Robustness ให้ดีขึ้นได้โดยการเพิ่มช่วงกว้างของความถี่ $FR$ แต่จะทำให้ผลตอบสนองการสั่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งจะใกล้เคียงกับกรณีของ STMD และมีคุณสมบัติ Robustness ดีกว่า ในทางตรงกันข้าม UDMRS จะมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีกว่า LDMRS เมื่อมีมวลหน่วงปรับค่าบางตัวชำรุดเสียหายหรือใช้การไม่ได้ (Redundancy) ในเรื่องสุดท้ายผู้วิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ STMD และ MTMD ในการลดผลการสั่นของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro และ Imperial Valley โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค พบว่า MTMD โดยเฉพาะเมื่อใช้จำนวน 21 ชุดจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมการสั่นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวทั้งสองกรณีได้มากที่สุด

1.2.5 การใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของคาน

Lin และ Cho (1993) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์เพื่อหาค่าผลตอบสนองของคานช่วงเดียวซึ่งพิจารณาเฉพาะโหมดพื้นฐานเท่านั้นและติดมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวที่กึ่งกลางคาน ภายใต้แรงกระทำแบบจุดมากกว่าหนึ่งชุดและแบบแผ่สม่ำเสมอเคลื่อนที่ผ่านตลอดช่วงความยาวคาน จากการวิเคราะห์ผู้วิจัยพบว่า สำหรับคานที่ไม่มีมวลหน่วงปรับค่าซึ่งถ้าให้ชุดของแรงกระทำ

แบบจุดจำนวนมากที่สุด 2 จุดที่มีอัตราส่วนระยะห่างต่อความยาวคาน $d/L = 0.5$ เคลื่อนที่ผ่านบนคาน ผลตอบสนองการขจัดที่กึ่งกลางคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เหตุการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าแรงกระทำแบบจุดหลายชุดที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่ผ่านบนช่วงความยาวคานจะทำให้เกิดแรงพลวัตแบบกระแทกน้อย สำหรับในกรณีของแรงกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอเมื่อใช้ความเร็วไม่มาก ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่กึ่งกลางคานจะคล้ายกับกรณีแรงกระทำแบบสถิตบนคาน ในทางกลับกัน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ค่าผลตอบสนองที่กึ่งกลางคานจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งแม้ว่าความเร็วจะสูงขึ้นก็ตาม และเมื่อทำการติดมวลหน่วงปรับค่าซึ่งไม่คิดผลของความหน่วงจะทำให้สามารถลดผลการสั่นของคานภายใต้แรงกระทำแบบจุดที่กล่าวไว้ข้างต้นลงได้ สำหรับในกรณีของแรงกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอเคลื่อนที่ผ่านคานเมื่อทำการติดมวลหน่วงปรับค่าโดยไม่คิดผลของความหน่วงจะทำให้ผลตอบสนองมีค่าลดลง แต่จะไม่ลดลงมากเหมือนกรณีของแรงกระทำแบบจุด นอกจากนี้แล้วทางผู้วิจัยพบว่า มวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับลดการสั่นของคานภายใต้แรงกระทำแบบจุดเคลื่อนที่ผ่านคานมากกว่าแรงกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอเคลื่อนที่ผ่านคาน

Chen และ Huang (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของคานช่วงเดียวติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวจำนวน 1, 3 และ 5 ชุด ตามลำดับ บนช่วงความยาวคานซึ่งมวลรวมทั้งหมดจะมีค่าเท่ากันสำหรับทุกชุดและมีการกระจายมวลสม่ำเสมอเพื่อลดผลการสั่นไหวภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคกระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานซึ่งเป็นแรงกระทำแบบจุด โดยไม่คำนึงถึงผลความหน่วงของคานและพิจารณาการรวมผลเฉพาะโหมดการสั่นพื้นฐานเท่านั้น ทั้งนี้สมการของการเคลื่อนที่จะถูกสร้างขึ้นจากระบบที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่งซึ่งใช้แบบจำลองที่มีความต่อเนื่องสำหรับคาน อย่างไรก็ตาม สมการของการเคลื่อนที่จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายของระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสองและใช้หลักการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Optimum parameters) ของมวลหน่วงปรับค่าด้วยวิธีที่เสนอโดย Den Hartog อยู่ในรูปของสูตรแบบปิด (Closed-form formulae) สำหรับโครงสร้างหลักไม่มีความหน่วง โดยที่มวลหน่วงปรับค่าจะออกแบบให้มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคาน พบว่า มวลหน่วงปรับค่าจำนวน 1 ชุด จะมีประสิทธิภาพลดการสั่นได้ดีที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความถี่แรงกระตุ้นมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของคานเพราะมวลหน่วงปรับค่าได้ถูกออกแบบไว้สำหรับโหมดพื้นฐานของคาน อีกทั้งทางผู้วิจัยได้เสนอกราฟออกแบบเบื้องต้นในการหาค่าพารามิเตอร์ของมวลหน่วงปรับค่าสำหรับโครงสร้างคานไม่มีความหน่วงและได้ให้ข้อเสนอแนะ

ว่า ถ้าใช้อัตราส่วนมวลมากกว่า 15 % จะเป็นการไม่ประหยัดเพราะค่าผลตอบสนองทางพลศาสตร์ลดลงไม่มากนัก

Yang, Sedaghati และ Esmailzadeh (2009) ได้ใช้วิธีการเชิงตัวเลขด้วยสเตทส-เปซฟอร์มเพื่อวิเคราะห์หาค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของคานช่วงเดียวไม่มีความหน่วงที่มีฐานรองแบบยืดแน่นติดมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานโดยใช้วิธีไฟไนเอลลิเมนท์ในการสร้างสมการของการเคลื่อนที่ด้วยวิธี Galerkin method ร่วมกับการใช้เทคนิค SQP (Sequential quadratic programming) เพื่อทำการ Optimize หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าภายใต้แรงกระตุ้นแบบแผ่สม่ำเสมอตลอดช่วงความยาวคานโดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงกระตุ้นที่ไร้รูปแบบ (Random excitation) ซึ่งสมมุติให้เป็นประเภท White noise โดยใช้ค่า Root mean square (r.m.s) ของการกระจัดของคานเป็นฟังก์ชั่นเป้าหมาย (Objective function) และแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคซึ่งใช้ค่าขนาดการขจัดของคานเป็นฟังก์ชั่นเป้าหมาย ทั้งนี้จะแบ่งการพิจารณาผลตอบสนองของฟังก์ชั่นเป้าหมายออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 พิจารณาเฉพาะโหมดการสั่นพื้นฐานของคาน กรณีที่ 2 พิจารณามากกว่าหนึ่งโหมดการสั่น ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ใช้แบบจำลองที่มีความต่อเนื่องสำหรับคาน และกรณีที่ 3 พิจารณาเป็นระบบอย่างง่ายโดยมีมวลหน่วงปรับค่าติดกับโครงสร้างคานซึ่งเทียบเท่าให้เป็นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งไม่มีความหน่วงและคิดผลเฉพาะโหมดการสั่นพื้นฐานเท่านั้น โดยที่ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนเอลลิเมนท์ของฟังก์ชั่นเป้าหมายของ 2 กรณีแรกถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าตามวิธีวิเคราะห์ทางทฤษฎีของกรณีที่ 3 โดยใช้หลักการของ Warburton (1982) สำหรับแรงกระตุ้นที่ไร้รูปแบบ และใช้หลักการของ Den Hartog สำหรับแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิค พบว่า ทั้งกรณีของแรงกระตุ้นที่ไร้รูปแบบและแบบฮาร์โมนิคผลตอบสนองที่ได้จากกรณีที่ 1 และ 2 ให้ผลใกล้เคียงกัน นั่นคือผลตอบสนองของคานขึ้นกับโหมดพื้นฐานเป็นส่วนมากโดยโหมดการสั่นที่สูงให้ผลน้อย และยังพบอีกว่าค่าผลตอบสนองที่ได้จากกรณีที่ 3 ให้ค่าแตกต่างกับ 2 กรณีแรกค่อนข้างมาก เพราะฉะนั้นระบบโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องเมื่อเทียบเท่าให้เป็นระบบอย่างง่ายสำหรับโครงสร้างไม่มีความต่อเนื่องหรือใช้แบบจำลองการรวมมวลจะให้ผลตอบสนองไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงหรืออีกนัยหนึ่งคือ ค่าผลตอบสนองที่ได้จะไม่มีความถูกต้องแม่นยำมากพอในการนำไปใช้ออกแบบ ดังนั้นการใช้วิธีไฟไนเอลลิเมนท์สามารถใช้ได้ดีกับโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องที่ติดมวลหน่วงปรับค่า อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคานที่มีสภาพของฐานรองที่แตกต่างไปจากงานวิจัยนี้และ

รวมถึงคานที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอด้วย นอกจากนี้ ผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของมวลหน่วงปรับค่าโดยพบว่า เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่หรืออัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าที่เหมาะสม ค่าอัตราส่วนปรับค่าความถี่จะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองมากกว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่า โดยที่ถ้าค่าเบี่ยงเบนลดลงจากค่าที่เหมาะสมจะมีผลกระทบต่อค่าผลตอบสนองมากกว่าค่าที่เบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น

Chtiba และคณะ (2010) ได้เสนอวิธีการแบบใหม่สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อใช้ออกแบบมวลหน่วงปรับค่าซึ่งติดกับโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นหรือให้ตัวได้ดี (Flexible structure) อย่างเช่นคาน ด้วยการใช้พลังงานรวมทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของโครงสร้างคาน (Total energy of beam) เป็นฟังก์ชั่นเป้าหมาย โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะถูก Optimize มีดังนี้คือ ตำแหน่ง มวล สติฟเนส และสัมประสิทธิ์ความหน่วงของมวลหน่วงปรับค่าเพื่อให้ได้พลังงานรวมทั้งหมดของคานน้อยที่สุด ทั้งนี้โครงสร้างคานช่วงเดียวทั้งที่มีและไม่มีความหน่วงซึ่งมีความต่อเนื่องจะถูกพิจารณาแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ด้วยการประยุกต์ใช้วิธี Galerkin method สำหรับสร้างสมการของการเคลื่อนที่และฟังก์ชั่นเป้าหมายโดยการใช้เงื่อนไขเริ่มต้นและแรงกระตุ้นแบ่งออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีที่ 1 กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นแต่ไม่มีแรงกระตุ้นกระทำต่อโครงสร้างคาน กรณีที่ 2, 3 และ 4 กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์และให้มีแรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคไซน์ซึ่งเป็นแรงกระทำแบบจุดที่มีค่าความถี่ของแรงกระตุ้นแตกต่างกันในแต่ละกรณี โดยที่จะให้แรงกระทำพร้อมกัน ณ ตำแหน่ง $L/3$ และ $2L/3$ จากปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวจำนวน 3 ชุด ติดเข้ากับคาน และได้นำเสนอผลด้วยกราฟความสัมพันธ์ผลตอบสนองการขจัดกับเวลา พบว่า จำนวนของโหมดที่ใช้รวมผลไม่ส่งผลต่อค่าผลตอบสนองการกระจัดที่กึ่งกลางคานเมื่อใช้การรวมผลของโหมดเป็น 3, 4 และ 5 ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการ Optimize เมื่อนำไปออกแบบมวลหน่วงปรับค่าซึ่งติดเข้ากับคานจะช่วยลดผลการสั่นไหวได้เป็นอย่างดีเพราะมวลหน่วงปรับค่าทำหน้าที่ช่วยในการดูดซับและสลายพลังงานที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่

1.2.6 การใช้มวลหน่วงปรับค่าเพื่อลดการสั่นไหวของสะพาน

Jo, Tae และ Lee (2001) ได้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของสะพานเหล็กหน้าตัดรูปกล่องซึ่งเป็นสะพานที่มีช่วงต่อเนื่องกันสามช่วงภายใต้น้ำหนักรถบรรทุกประเภท DB-24 ตาม

มาตรฐานของประเทศเกาหลีที่เทียบเท่ากับน้ำหนักรถบรรทุกประเภท HS20-44 ตามมาตรฐานของ AASHTO เคลื่อนที่ผ่านสะพาน โดยการกระจัดสูงสุดที่กึ่งกลางคานได้พิจารณารวมผลของค่าภารขจัดเริ่มต้นเนื่องจากความขรุขระหรือไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวสะพาน ทั้งนี้การวิเคราะห์จะพิจารณาการรวมผลสองโหมดแรกของสะพานซึ่งพบว่า เมื่อรถบรรทุกวิ่งผ่านที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานสามารถจำแนกการสั่นได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นการสั่นที่เกิดจากแรงกระแทก (Forced vibration) และช่วงที่สองเป็นการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) โดยที่ความเร็ว 100 km/hr จะทำให้เกิดการกระจัดสูงที่สุด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานเท่ากับ 8.72 mm และอยู่ในช่วงการสั่นเนื่องจากแรงกระแทกขณะที่รถบรรทุกวิ่งผ่านซึ่งมีค่ามากกว่าในกรณีของการสั่นแบบอิสระ ในการที่จะลดผลการสั่นลง ทางผู้วิจัยได้ติดมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวที่ตำแหน่งกลางสะพานโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าตามวิธีของ Den Hartog ซึ่งใช้ค่าปรับจูนความถี่ใกล้เคียงกับความถี่โหมดพื้นฐานของสะพานและอัตราส่วนมวลเท่ากับ 1% พบว่า การกระจัดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานในช่วงการสั่นเนื่องจากแรงกระแทกลดลงเป็น 8.49 mm ซึ่งลดลงน้อยมาก ในทางตรงกันข้าม การกระจัดจะลดลงอย่างมากและรวดเร็วสำหรับกรณีการสั่นแบบอิสระ นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของมวลหน่วงปรับค่ามีค่ามากกว่าการกระจัดที่กึ่งกลางสะพาน นั่นหมายความว่ามวลหน่วงปรับค่าช่วยในการดูดซับพลังงานจากสะพาน ดังนั้น จากผลการศึกษาผู้วิจัยได้สรุปว่า มวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพลดการสั่นได้ดีสำหรับการสั่นแบบอิสระแต่ไม่สามารถควบคุมการสั่นขณะเกิดแรงกระแทกได้

Yau และ Yang (2001) ได้ใช้มวลหน่วงปรับค่าหลายชุด (MTMD) ที่มีช่วงความถี่ใช้งานกว้างติดเข้ากับสะพานเหล็กที่เป็นโครงถักต่อเนื่องกันสองช่วงที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานทั้งสองช่วงเพื่อทำหน้าที่ลดการสั่นไหวของสะพานภายใต้การกระทำของน้ำหนักล้อรถไฟที่เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ซึ่ง MTMD ที่ใช้ในแต่ละช่วงของสะพานได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ MTMD-1 และ MTMD-2 ทั้งนี้ MTMD-1 และ MTMD-2 ถูกปรับจูนโดยใช้ค่าเฉลี่ยของความถี่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 หรือโหมดพื้นฐาน และในโหมดที่ 2 ของสะพาน ตามลำดับ เนื่องจากว่าสะพานโครงถักนี้มีความถี่ธรรมชาติในสองโหมดแรกไม่ต่างกันมาก และคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของ MTMD ที่ใช้จะมีสติฟเนส อัตราส่วนความหน่วง และค่าแตกต่างความถี่เท่ากันในแต่ละชุดซึ่งค่าเหล่านี้สำหรับ MTMD-1 จะไม่เท่ากันกับ MTMD-2 ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า Max. $DMF$ ของสะพานเป็นฟังก์ชั่นเป้าหมายด้วยการทำให้ได้ค่าน้อยที่สุด (Minimum-maximum $DMF$) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MTMD ในแต่ละชุดคือ ค่าอัตราส่วนปรับจูนความถี่เฉลี่ย

($\alpha_{d,opt}$) อัตราส่วนความหน่วงเฉลี่ย ($\zeta_{d,opt}$) และอัตราส่วนช่วงความถี่ใช้งานต่อค่าเฉลี่ยความถี่ของมวลหน่วงปรับค่า ($\gamma_{opt}$) โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข และอธิบายผลตอบสนองการสั่นของสะพานด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงกระแทกของการแอ่นตัว (Deflection impact factor: I) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสะพาน จากผลการศึกษาทางผู้วิจัยพบว่า เมื่อทำการติด MTMD เข้ากับสะพานที่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางทั้งสองช่วงความยาวของสะพาน โดยใช้จำนวนของ MTMD-1 และ MTMD-2 ในหนึ่งช่วงความยาวสะพานชุดละ 1 (STMD), 5 และ 11 พบว่า ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละชุดของ MTMD ทุกกรณีสามารถทำให้ค่า I ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีของสะพานก่อนติดตั้ง MTMD อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีที่ใช้จำนวนชุดของ MTMD มากกว่าหนึ่งชุดจะมีประสิทธิภาพในการลดผลของค่า I ได้ดีกว่าเล็กน้อยเพราะ MTMD มีช่วงความถี่ใช้งานที่กว้างกว่า STMD นอกจากนี้แล้วทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติ Robustness ของ MTMD โดยการใช้ค่าความถี่ปรับค่าเบี่ยงเบนไป 5% จากค่าที่เหมาะสม พบว่า เมื่อเกิด Detuning จะทำให้ประสิทธิภาพในการลดผลตอบสนองการสั่นแย่ลงซึ่งมีคุณสมบัติ Robustness ไม่ดีพอที่จะนำ MTMD มาใช้งาน อย่างไรก็ตาม ในการที่จะเพิ่มคุณสมบัติ Robustness สามารถทำได้โดยการเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของ MTMD สูงกว่าค่าที่เหมาะสมไม่มากนัก แต่ประสิทธิภาพในการลดผลการสั่นจะลดลงเล็กน้อย โดยที่สำหรับกรณีที่ใช้จำนวน MTMD มากจะมีคุณสมบัติ Robustness และประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ MTMD ในจำนวนน้อย

Shi และ Cai (2008) ได้ศึกษาการควบคุมการสั่นของสะพานช่วงเดียวโดยพิจารณาผลของค่าการกระจัดเริ่มต้นเนื่องจากความขรุขระของผิวทางด้วยการใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวติดที่กึ่งกลางสะพานซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการกระจัดสูงสุดโดยกำหนดให้มีค่าอัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.01 และใช้ค่าปรับจูนความถี่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพาน ภายใต้น้ำหนักรถบรรทุกประเภท HS20-44 ตามมาตรฐานของ AASHTO โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 มีรถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานทั้งสองด้านของช่องทางจราจรพร้อมกันสองคัน กรณีที่ 2 มีรถบรรทุกหลายคันวิ่งผ่านสะพานต่อเนื่องกันสำหรับหนึ่งช่องทางจราจร และได้มีการจำแนกสะพานดังนี้คือ สะพานช่วงสั้นโครงสร้างหลักเป็นแผ่นพื้นตันมีความยาวช่วง 6.00, 8.00, 10.00 และ 12.00 m และสะพานช่วงยาวโครงสร้างหลักเป็นคานมีความยาวช่วง 16.70, 24.38. 30.48 และ 39.62 m จากผลการศึกษาทางผู้วิจัยพบว่า ในกรณีที่ 1 การสั่นในช่วงแรกเนื่องจากแรงกระแทกขณะที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางสะพานซึ่งเป็นช่วงเวลาสั้นๆ มวลหน่วงปรับค่าจะยังคงไม่สามารถลดการสั่นได้สักเท่าไรนักแต่เมื่อเวลาผ่านไปซึ่งรถบรรทุกได้วิ่งผ่าน

สะพานไปแล้ว กล่าวคือ สะพานจะอยู่ในสภาวะการสั่นแบบอิสระและที่สภาวะนี้มวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพในการลดผลการสั่นเป็นอย่างมาก จากผลที่ได้นี้แสดงว่าในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ช่วงแรกที่โครงสร้างได้รับแรงกระตุ้น มวลหน่วงปรับค่าจะยังไม่ทำงานซึ่งต้องรอเวลาระยะหนึ่งถึงจะมีการตอบสนองเกิดขึ้น และผลที่ได้นี้เป็นไปในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Jo และคณะ (2001) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีของสะพานช่วงสั้นมวลหน่วงปรับค่าจะมีประสิทธิภาพลดการสั่นได้มากกว่าสะพานช่วงยาวอาจเป็นเพราะว่าสะพานช่วงสั้นมีความถี่ธรรมชาติและความถี่ของแรงเนื่องจากรถบรรทุกวิ่งผ่านที่สูงกว่าสะพานช่วงยาว จึงทำให้เกิดผลตอบสนองการกระจัดมากและสั่นได้เร็วกว่าสะพานช่วงยาว นอกจากนี้แล้วทางผู้วิจัยยังพบอีกว่า (ซึ่งเป็นอีกเหตุผลหนึ่งสนับสนุนเหตุการณ์ดังกล่าวข้างต้น) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งและความถี่แรงกระตุ้นซึ่งเรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT) ของความเร่ง ในกรณีของสะพานช่วงสั้นนั้นโหมดการสั่นพื้นฐานจะมีอิทธิพลมากที่สุดซึ่งแตกต่างกับกรณีของสะพานช่วงยาวทั้งโหมดการสั่นพื้นฐานและในโหมดการสั่นที่สูงกว่าจะมีผลตอบสนองของความเร่งที่สูงเช่นกัน ดังนั้น มวลหน่วงปรับค่าที่ปรับค่าความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของสะพานจึงไม่สามารถลดผลตอบสนองของความเร่งได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับสะพานช่วงยาว ด้วยเหตุนี้อาจจำเป็นต้องใช้มวลหน่วงปรับค่าหลายชุด (Multiple tuned mass damper: MTMD) เพื่อลดการสั่นของโครงสร้างภายใต้แรงกระตุ้นที่มีหลายช่วงความถี่ และสำหรับกรณีที่ 2 ใช้ความยาวสะพาน 8.00 m และ 39.62 m เป็นสะพานช่วงสั้นและยาว ตามลำดับ โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างรถบรรทุกเท่ากับ 6.50 m จากผลการวิเคราะห์ทางผู้วิจัยพบว่า เมื่อรถบรรทุกสองคันวิ่งผ่านสะพานช่วงสั้นต่อเนื่องกันประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดผลตอบสนองการสั่นจะดีกว่ากรณีรถบรรทุกหนึ่งคันวิ่งผ่านสะพาน อย่างไรก็ตาม ถ้าจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานช่วงสั้นต่อเนื่องกันเกินกว่าสองคันขึ้นไปจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของมวลหน่วงปรับค่าในการลดผลการสั่นของสะพาน สำหรับกรณีของสะพานช่วงยาวประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดผลตอบสนองการสั่นจะมากขึ้นเมื่อจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานมากขึ้นเกินกว่าหนึ่งคันซึ่งให้ผลในทำนองเดียวกันกับกรณีของสะพานช่วงสั้น แต่ต่างกันตรงที่เมื่อจำนวนรถบรรทุกที่วิ่งผ่านสะพานต่อเนื่องกันเกินกว่าสี่คันขึ้นไปจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าสำหรับสะพานช่วงยาว นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่า มวลหน่วงปรับค่าที่ใช้ในกรณีที่ 2 จะมีประสิทธิภาพลดผลการสั่นได้ดีกว่ากรณีที่ 1 อีกทั้งยังพบว่าการที่รถหลายคันวิ่งผ่านสะพานต่อเนื่องกันสำหรับหนึ่งช่องทางจราจรนั้นจะไปเพิ่มเวลาในช่วงการสั่นเนื่องจากแรงกระแทกขณะที่รถบรรทุกวิ่งผ่าน ดังนั้น จึงทำให้มวลหน่วงปรับค่ามีเวลามากพอที่จะ

ตอบสนองหรือทำงานได้และส่งผลให้ผลตอบสนองในช่วงการสั่นนี้ลดลงมากกว่ากรณีที่มีรถบรรทุกสองคันวิ่งผ่านสะพานพร้อมกันทั้งสองด้านของช่องทางจราจร อย่างไรก็ตาม การลดลงของผลตอบสนองการสั่นเนื่องจากแรงกระแทกยังคงน้อยกว่าในช่วงการสั่นแบบอิสระเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 1

อย่างไรก็ตาม กรณีของสะพานโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีการศึกษาที่พิจารณาเฉพาะโครงสร้างสะพานซึ่งไม่มียวดยานจอดติด และเป้าหมายของการลดการสั่นไหวก็เน้นไปที่เฉพาะโครงสร้างสะพานเท่านั้นซึ่งแตกต่างจากสภาพปัญหาที่พิจารณาในการศึกษานี้

## 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. เพื่อสร้างแบบจำลองสะพาน-รถยนต์-มวลหน่วง ในกรณีที่สะพานมีรถยนต์จอดติดและถูกกระตุ้นด้วยการเคลื่อนที่ของฐานรองรับคาน
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์การสั่นไหวของรถยนต์ที่จอดนิ่งอยู่บนสะพานที่ติดและไม่ติดมวลหน่วงปรับค่า
3. เพื่อศึกษาแนวทางในการที่จะลดผลการสั่นของรถยนต์ที่จอดติดอยู่บนสะพานด้วยการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าที่มีประสิทธิภาพ

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ และมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเชิงเส้น
2. ใช้แบบจำลองคานที่มีความต่อเนื่องช่วงเดียวหน้าตัดสม่ำเสมอ (Uniform simply supported beam) เปลี่ยนตำแหน่งได้ตามแนวดิ่ง
3. ใช้แบบจำลองรถยนต์โดยสารที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งและใช้รถยนต์จำนวน 5 คันจัดวางบนคานสะพานในแบบจำลองเพื่อเป็นตัวแทนจำนวนรถยนต์ที่จอดติดบนสะพาน
4. สปริงและตัวหน่วงของแบบจำลองรถยนต์และมวลหน่วงปรับค่ามีพฤติกรรมการเสียรูปแบบเชิงเส้น

5. ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าตามสูตรที่ได้จากการกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคที่ฐานรอง

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ทำให้ทราบพฤติกรรมการสั่นไหวของโครงสร้างคานจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสะพาน-รถยนต์-มวลหน่วง ภายใต้แรงกระตุ้นแบบพลวัต (Dynamic excitation) ในแนวดิ่งที่ฐานรองรับทั้งสองด้าน
2. ทำให้ทราบพฤติกรรมการสั่นไหวของรถยนต์ที่จอดนิ่งบนสะพานทั้งก่อนและหลังการติดมวลหน่วงปรับค่าภายในช่วงคาน
3. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าที่ใช้เพื่อลดผลการสั่นของคานสะพานและรถยนต์
4. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบหรือปรับปรุงโครงสร้างสะพานให้เกิดการสั่นไหวน้อยที่สุดเพื่อให้สะพานมีประสิทธิภาพในการให้บริการมากยิ่งขึ้น

## 1.6 การดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของปัญหาในงานวิจัยด้วยการสืบค้น รวบรวมข้อมูลและทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องหรือใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้
2. ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับปัญหาในงานวิจัยนี้
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาที่นำมาวิจัยพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องที่น่าเชื่อถือได้ของแบบจำลอง
4. ศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นถึงแนวทางที่จะลดการสั่นไหวของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายใต้แรงกระตุ้นสมมติแบบฮาร์โมนิคด้วยการใช้มวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยวโดยทำการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น
5. จัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์

6. ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่จอดติดบนสะพานภายใต้แรงกระตุ้นแบบฮาร์โมนิคและแรงกระตุ้นจากสภาพการจราจรจริงที่ได้จากการตรวจวัดสัญญาณเก็บข้อมูลในภาคสนามทั้งก่อนและหลังติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าชนิดเดี่ยว โดยจะเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของมวลหน่วงปรับค่าของระบบโครงสร้างที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับหนึ่งจากงานวิจัยในอดีตซึ่งจะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้
7. ประเมินระดับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของรถยนต์ที่ส่งผลต่อผู้ใช้โดยสาร
8. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา
9. จัดทำวิทยานิพนธ์