บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา

น้ำหนักรถบรรทุกและการกระจายน้ำหนักเป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) ข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตลอดจนการบำรุงรักษาถนนและสะพานให้มีประสิทธิภาพ ทั้งในเชิงวิศวกรรมและเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นเพื่อที่จะได้ข้อมูลเหล่านี้มา ระบบ Weigh-In-Motion (WIM) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

ระบบ WIM คือ วิธีการหาข้อมูลต่าง ๆ เช่น น้ำหนักเพลา ระยะห่างระหว่างเพลา จำนวนเพลาของยวดยานพาหนะ ขณะที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือสะพาน ซึ่งโดยปกติยวดยานพาหนะดังกล่าว มักจะเป็นรถที่มีน้ำหนักมาก เช่น รถบรรทุก รถพ่วง เพราะรถกลุ่มดังกล่าวมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างถนนและสะพาน

ในต่างประเทศ เช่น แคนาดา อเมริกา ฮ่องกง ไต้หวัน และออสเตรเลีย ได้มีการนำระบบ WIM มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบ WIM สามารถใช้ได้ทั้งกับผิวทาง (ถนน) หรือ สะพาน ในกรณีที่ใช้กับถนน อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ท่อลอดคอนกรีตหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม (culvert) ซึ่งจะวางอยู่ใต้ถนนโดยที่ภายในท่อลอดนี้จะมีเกจ์วัดความเครียด (strain gauge) ติดตั้งอยู่ หรือการใช้แผ่นโลหะติดตั้งอยู่บนผิวถนนโดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะวางบนตัวเซลล์วัดน้ำหนัก (load cell) สำหรับในกรณีของสะพาน จะมีการนำตัวจับสัญญาณต่างๆ เช่น เกจ์วัดความเครียด เกจ์วัดความเร่ง (accelerometer) ไปติดไว้ที่คานของสะพาน ข้อมูลที่ได้จากตัวจับสัญญาณดังกล่าวสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนถนนหรือสะพานได้

สำหรับประเทศไทย การศึกษาในเรื่อง Weigh-In-Motion ในอดีตมีค่อนข้างน้อย การเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกจะเก็บจากการที่ให้รถขึ้นชั่งน้ำหนักบนตราชั่ง ซึ่งทำให้เสียเวลามากและก่อให้เกิดปัญหาทางการจราจร นอกจากนั้นยังพบว่ามีปัญหาเรื่องการโกงน้ำหนัก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อถนนและสะพาน ดังนั้นจึงน่าจะเป็นการดีที่จะนำระบบ WIM เข้ามาใช้ในการเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกในประเทศไทย เพื่อที่จะได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบการรับน้ำหนักบรรทุกจร (live load) ของถนนและสะพาน ในอีกด้านหนึ่งเรายังสามารถนำข้อมูลนี้มาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการออกกฎหมายเพื่อควบคุมการบรรทุกน้ำหนักเกินของรถบรรทุกไว้ด้วย

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในปี ค.ศ. 1970 องค์กรวิจัยต่างๆ ทั่วโลก ได้เข้ามามีส่วนในการพัฒนาการหาน้ำหนักโดยใช้เซลล์วัดติดบนผิวจราจรที่มีรถวิ่งผ่าน ซึ่งปฏิกิริยาตอบสนองของผิวทางสามารถถูกตรวจสอบและปรับแก้เพื่อความถูกต้องด้วยน้ำหนักเพลาทางสถิติได้

Moses และคณะ (1979) พิจารณาถึงวิธีการดังกล่าวและสรุปว่าผลกระทบทางพลศาสตร์เป็นปัญหาหลักในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง เนื่องมาจากความขรุขระของผิวทางและการกระแทกที่เกิดขึ้นโดยน้ำหนักของตัวรถเอง เป็นผลให้แรงทางพลศาสตร์มีค่าเป็น 30-40% ของค่าทางสถิตซึ่งนำไปสู่การทำนายที่ผิดพลาดได้

ด้วยอุปสรรคดังกล่าวกับการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง Moses และคณะได้เพิ่มการวัดความเค้นของสะพานเพื่อที่จะบรรลุผลในการคำนวณน้ำหนักของรถ Moses และคณะได้อธิบายว่าวิธีการวัดน้ำหนักจากคาน (girder) ของสะพานดีกว่าการวัดน้ำหนักรถจากผิวทาง แรงพลศาสตร์ที่ผิวสัมผัสของยางจะถูกกรองออกและลดลงโดยความเฉื่อยเนื่องจากมวล (mass inertia) ของสะพาน และอาจจะถูกกำจัดได้หมดด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด

ด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการทำนายบนพื้นฐานของความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลาจะสามารถหาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุกได้ ซึ่งเครื่องมือหรืออุปกรณ์พื้นฐานและวิธีการที่ใช้ดำเนินการในภาคสนาม รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบได้ถูกเสนอขึ้นอย่างเป็นระบบในปี 1979

Lamann และ Novak (1996) นักวิจัยจากสหรัฐฯ นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคานเหล็ก 5 ตัว เพื่อพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความล้า ความเครียดจะถูกวัดภายใต้การจราจรปกติ โดยวิธีการเรนโฟล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมและบันทึกโดยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (Stress Measuring System : SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีต ภายใต้การจราจรปกติและทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโฟล และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Weighing System : TWS) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลาจากความเครียดในอดีต โดยการใช้เส้นอิทธิพลของสะพาน องค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกสามารถหาได้โดยการใช้ตัวจับสัญญาณ 2 ตัวติดขนานกันไว้กับผิวทาง

Anon Chamchuenwong (1998) ใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของเส้นอิทธิพลความเครียดของสะพานจากการทดสอบทางสถิต แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ของรถและความเครียดสูงสุด (peak strain) โดยน้ำหนักรถสามารถหาได้เมื่อทราบค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถคันดังกล่าว ซึ่งความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถไม่ได้ถูกตรวจสอบ

Cao และคณะ (1998) พัฒนาวิธีการหาน้ำหนักที่กระทำบนปีกเครื่องบินโดยการใช้เครือข่ายระบบประสาทจำลอง (artificial neural network) เพื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในการวิเคราะห์โครงสร้าง การศึกษาได้หาน้ำหนักแผ่ (distributed loads) ที่กระทำบนคานยื่น (cantilevered beam) โดยน้ำหนักแผ่จะถูกแทนด้วยกลุ่มของน้ำหนักที่กระทำเป็นจุด (concentrated loads) ซึ่งความถูกต้องของการหาน้ำหนักมีค่าอยู่ในช่วง 8 %

Chan และคณะ (1999) ทำการหาน้ำหนักโดยการใช้ปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน รูปแบบของผลเฉลยที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหาน้ำหนักคงที่ที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้หาน้ำหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยาตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพลา

Zhu และ Law (1999) ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วยคาน ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์โดยหลักการของ Hamiltion โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการของซุปเปอร์โพซิชันเชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิคที่ทำให้ได้ผลเหมาะสมที่สุด (optimisation) ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา (time domain)

Law และคณะ (1999) ทำการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยการใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียว โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถจะถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลา และ 2 เพลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาไว้คงที่) เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วงแบบหนืด (viscous damping) สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถหาได้โดยผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับการแปลงเชิงฟูริเอร์ (Fourier transforms) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้ ด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้อย่างคร่าวๆ โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ

Chan และคณะ (2000) ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการใช้สะพานคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) รถบรรทุก 2 เพลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการแปลงเชิงฟูริเอร์

Zhu และ Law (2000) ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นออร์โธทรอปิกสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ จะถูกวิเคราะห์โดยการใช้ทฤษฎีแผ่นออร์โธทรอปิกสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate theory) และหลักการของซุปเปอร์โพซิชันเชิงโหมด ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา โดยความถูกต้องในการหาน้ำหนักจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นอีก 2-3 % เมื่อสะพานมีการบิดตัว

WAVE (2001) ทำการหาน้ำหนักรถโดยใช้วิธียกกำลังสองน้อยที่สุดของเส้นอิทธิพลความเครียดของสะพาน โดยการทดสอบบนสะพานต่างๆ หลายสะพาน และใช้ตัวจับสัญญาณหลายๆ ตัว ซึ่งมีการทดสอบทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาว น้ำหนักที่หาได้จะมีทั้งน้ำหนักของแต่ละเพลาและน้ำหนักรวมของรถ โดยความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10 %

Law และคณะ (2001) พบว่าการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา สภาวะดังกล่าวนี้เรียกว่า สภาวะที่บกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น Law และคณะ จึงได้เพิ่มวิธีการที่เรียกว่าการทำให้สม่ำเสมอ (Regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ λ (ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก) ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ λ ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะที่สุด

Law และ Fang (2001) ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่โดยการใช้เทคนิคไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของปริภูมิหลัก (state-space formulation) ของระบบพลศาสตร์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้สูตรทำซ้ำ (recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้ตัวจับสัญญาณหลายๆ ตัวในการวัดปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถยังมีความคลาดเคลื่อนสูง และความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถในแต่ละวิธีไม่มีการนำมาเปรียบเทียบกันอย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพัฒนาวิธีการหาน้ำหนักรถให้มีความถูกต้องมากที่สุด และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถของแต่ละวิธีอย่างเด่นชัด โดยจะพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถ อาทิเช่น ความเร็วรถ ความขรุขระของผิวทาง การบิดของสะพาน เป็นต้น

1.3 <u>วัตถุประสงค์</u>

1.3.1 เพื่อศึกษาวิธีการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่แบบต่างๆ

1.3.2 เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการหาน้ำหนักรถโดยการจำลองในคอมพิวเตอร์

1.3.3 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถ

1.3.4 พัฒนาวิธีการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่ในกรณีที่พิจารณาการบิดตัวของสะพาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 การวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับเป็นแบบธรรมดา

1.4.2 พิจารณาโครงสร้างสะพานเหล็กมีพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น (linear elastic) โดยมีการกระจายมวลและสติฟเนสที่สม่ำเสมอ

1.4.3 พิจารณาวิธีการหาน้ำหนัก 2 แบบ ได้แก่ วิธีการหาน้ำหนักโดยการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ของความเครียดจากเส้นอิทธิพล (influence lines) และวิธีการหาน้ำหนักโดยเทคนิคไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming)

1.4.4 พิจารณาผลของความเร็วรถ ความขรุขระของผิวทาง อัตราส่วนของน้ำหนักเพลาหน้าต่อน้ำหนักรวมของรถ สภาวะเริ่มต้นของรถก่อนเข้าสะพาน ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างเพลา และการบิดของสะพาน

1.5 วิธีการดำเนินการศึกษา

1.5.1 สร้างแบบจำลองปฏิกิริยาตอบสนองระหว่างสะพานกับรถ เพื่อใช้ในการจำลองรูปแบบความเครียด ด้วยการใช้สมการของลากรานจ์ (Lagrange's equation) โดยรวมผลของความขรุขระบนผิวสะพานเข้าไปในแบบจำลอง

1.5.2 ตรวจสอบแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองรูปแบบความเครียด

1.5.3 หาน้ำหนักรถโดยไม่คำนึงถึงผลการบิด (torsion) ของสะพานด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งกำหนดให้รถที่เคลื่อนที่มีน้ำหนักกระทำเป็น 1 จุด (one-point load) โดยจะพิจารณาถึงผลของความเร็วรถและผลของพลศาสตร์ผ่านค่า DAF แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องของแต่ละวิธีกับน้ำหนักรถจริงทั้งทางสถิตและทางพลศาสตร์

1.5.4 หาน้ำหนักรถโดยไม่คำนึงถึงผลการบิดของสะพานด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง และวิธียกกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งกำหนดให้รถที่เคลื่อนที่มีน้ำหนักกระทำเป็น 2 จุด (two-points load) โดยจะพิจารณาถึงผลของความเร็วรถ ความขรุขระของผิวทาง อัตราส่วนของน้ำหนักเพลาหน้าต่อน้ำหนักรวมของรถ สภาวะเริ่มต้นของรถก่อนเข้าสะพาน และความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างเพลา แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องของแต่ละวิธีกับน้ำหนักรถจริงทั้งทางสถิตและทางพลศาสตร์

1.5.5 หาน้ำหนักรถโดยคำนึงถึงผลการบิดของสะพานด้วยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิง ซึ่งกำหนดให้รถที่เคลื่อนที่มีน้ำหนักกระทำเป็น 2 จุด โดยจะพิจารณาถึงผลของความเร็วรถ ความขรุขระของผิวทาง และการบิดของสะพาน แล้วเปรียบเทียบความถูกต้องกับน้ำหนักรถจริงทางสถิต

1.5.6 หาน้ำหนักรถโดยวิธีไดนามิคโปรแกรมมิงจากการสุ่มตัวอย่างรถ 100 คันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยคำนึงถึงผลการบิดของสะพานและไม่คำนึงถึงผลการบิดของสะพาน

1.5.7 อภิปรายผลที่ได้และสรุป

1.5.8 ทำรายงานการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ของรถที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน

1.6.2 ทำให้ทราบถึงความถูกต้องในหาน้ำหนักรถของทั้ง 2 วิธี

1.6.3 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบน้ำหนักบรรทุกจร (live load) ของสะพาน

1.6.4 ทำให้ทราบถึงผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการหาน้ำหนักรถ

1.6.5 ทำให้ทราบถึงความถูกต้องในการหาน้ำหนักรถ เมื่อพิจารณาและไม่พิจารณาผลการบิดของสะพาน

1.6.6 ทำให้ไม่ต้องมีการหยุดรถเพื่อขึ้นชั่งน้ำหนักซึ่งเป็นการประหยัดเวลาของผู้ขับขี่

1.6.7 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาการออกกฎหมายควบคุมรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกินและการกำหนดนโยบายของรัฐที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก

1.6.8 ช่วยลดปัญหาการคอรัปชันในการให้ข้อมูลของน้ำหนักรถที่ไม่ตรงกับความเป็นจริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย