บทที่ 1

บทนำ

1.1 <u>ความเป็นมา</u>

น้ำหนักรถบรรทุกและการกระจายตัวของน้ำหนักเป็นข้อมูลที่สำคัญ ที่แสดงให้เห็นถึงขนาดของน้ำหนักบรรทุกและความถี่ที่ปรากฏขึ้นบนเส้นทางคมนาคม (ถนนและสะพาน) ข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตลอดจนการบำรุงรักษาถนนและสะพาน รวมทั้งการบังคับใช้กฎหมายเกี่ยวกับน้ำหนักรถบรรทุก เพื่อที่จะได้มาถึงข้อมูลดังกล่าวอย่างถูกต้อง และครบถ้วนนั้น ระบบเวอินโมชั่น (weigh-in-motion : WIM) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น

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

ในต่างประเทศ เช่น แคนาดา อเมริกา ฮ่องกง ไต้หวัน และออสเตรเลีย ได้มีการนำระบบ WIM มาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบ WIM สามารถใช้ได้ทั้งกับผิวทาง (ถนน) หรือ สะพาน ในกรณีที่ใช้กับผิวทาง อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คอนกรีตหน้าตัดรูปกล่องสี่เหลี่ยม (culvert) ซึ่งจะวางอยู่ใต้ถนนโดยที่ภายใน culvert นี้จะมีเสตรนเกจ (strain gauge) ติดตั้งอยู่ การใช้แผ่นโลหะติดตั้งอยู่บนผิวถนนโดยที่แผ่นโลหะดังกล่าวจะถูกรองรับด้วยตัวเซลล์วัดน้ำหนัก (load cell) การใช้เสตรนเกจแนวตั้ง (vertical strain transducer) ฝังไว้ใต้ผิวทาง หรือการใช้พิโซอิเลคตริค (piezoelectric) ฝังไว้ที่ผิวทาง แต่เนื่องจากระบบนี้ มีข้อเสียคือ เมื่อต้องการที่จะซ่อมบำรุงจะต้องทำการลอกผิวทางออก อีกทั้งอาจต้องทำการปิดเส้นทางการจราจรระหว่างดำเนินการติดตั้ง และบำรุงรักษาระบบ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเป็นระบบที่ใช้กับสะพาน ซึ่งจะเป็นการนำตัวเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น เสตรนเกจ เครื่องตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ไปติดไว้ที่คาน (girder) ใต้สะพาน ข้อมูลที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ดังกล่าวสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาน้ำหนักของรถที่วิ่งผ่านบนถนนหรือสะพานได้ โดยที่ไม่ต้องปิดเส้นทางการจราจรระหว่างดำเนินการติดตั้ง และบำรุงรักษาระบบ

สำหรับประเทศไทย การศึกษาในเรื่อง WIM ในอดีตที่ผ่านมามีค่อนข้างน้อย การเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกจะเก็บจากการที่ให้รถขึ้นชั่งน้ำหนักบนตราชั่ง ซึ่งทำให้เสียเวลามากและก่อให้เกิดปัญหาทางการจราจร นอกจากนั้นยังพบว่ามีปัญหาเรื่องการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อถนนและสะพาน ดังนั้นจึงน่าจะเป็นวิธีที่ดีที่จะนำระบบ WIM เข้ามาใช้ในการเก็บข้อมูลของน้ำหนักรถบรรทุกในประเทศไทย เพื่อที่จะได้เป็นประโยชน์ในการออกแบบการรับน้ำหนักจร (live load) และการวางแผนบำรุงรักษาถนนและสะพาน อีกด้านหนึ่งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมการบรรทุกน้ำหนักเกินของรถบรรทุกได้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 <u>งานวิจัยที่ผ่านมา</u>

ในปี ค.ศ. 1970 องค์กรวิจัยต่างๆมากมายทั่วโลก ได้เข้ามามีส่วนในการพัฒนาวิธีการชั่งน้ำหนักเล็กๆ หรือติดตั้งแผ่นโลหะเข้ากับผิวทางที่มีรถวิ่งผ่าน ซึ่งปฏิกิริยาตอบสนองของผิวทางสามารถถูกตรวจสอบและทำการปรับแก้เพื่อความถูกต้องด้วยน้ำหนักเพลาทางสถิต

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

Ghosn และ Xu (1988) พบว่าเนื่องจากผลกระทบทางพลศาสตร์เป็นปัญหาหลักในการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง จึงพิจารณาผลของแรงทางพลศาสตร์ โดยการเพิ่มพจน์ของโคไซน์และไซน์เข้าไปในสมการการเคลื่อนที่และทำการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ (Fourier analysis) ซึ่งวิธีนี้จะทำให้หาแรงเนื่องจากผลทางพลศาสตร์ได้ แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายถึง 50%

ด้วยอุปสรรคดังกล่าวกับการชั่งน้ำหนักบนผิวทาง Moses และคณะ (1979) ได้เสนอการวัดความเค้นของสะพานเพื่อที่การคำนวณน้ำหนักของรถ และได้อธิบายว่าวิธีการวัดน้ำหนักจากคาน (girder) ของสะพานดีกว่าการวัดน้ำหนักรถจากผิวทางเนื่องจากแรงพลศาสตร์ที่ผิวสัมผัสของยางจะถูกกรองออกและลดลงโดยความเฉื่อยเนื่องจากมวล (massive inertia) ของสะพาน และอาจจะถูกกำจัดได้ด้วยวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square)

ด้วยวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (strain) กับการทำนายบนพื้นฐานของความเร็ว และระยะห่างระหว่างเพลาจะสามารถหาน้ำหนักเพลาของรถบรรทุกได้ ซึ่งเครื่องมือหรืออุปกรณ์พื้นฐานและวิธีการที่ใช้ดำเนินการในภาคสนาม รวมทั้งผลที่ได้จากการทดสอบได้ถูกเสนอขึ้นอย่างเป็นระบบในปี 1979

Lamann และ Novak (1996) จากประเทศอเมริกา ได้นำระบบ WIM มาทำการวัดกับสะพานที่ประกอบด้วยคาน (girder) เหล็ก 5 อัน เพื่อทำการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความล้า ความเครียดจะถูกวัดภายใต้การจราจรปกติ โดยวิธีการของเรนโฟล (rainflow) ข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บรวบรวมและถูกบันทึกด้วยการใช้เครื่องมือ 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ระบบการวัดความเค้น (Stress Measuring System : SMS) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมความเครียดในอดีตที่ผ่านมา ภายใต้การจราจรปกติและทำการรวบรวมเข้ากับแผนภูมิแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนรอบ โดยการนับจำนวนรอบของวิธีเรนโฟล และโดยวิธีอื่นๆ ชุดที่ 2 คือ ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุก (Truck Weighing System : TWS) ทำการคำนวณน้ำหนักรวมของรถบรรทุกและน้ำหนักเพลาจากความเครียดในอดีต โดยการใช้เส้นอินฟลูเอนซ์ลายน์ (Influence line) ของสะพาน โดยที่องค์ประกอบต่างๆของรถบรรทุกเช่น ระยะห่างระหว่างเพลา สามารถหาได้โดยการใช้

ตัวเซนเซอร์ 2 ตัวติดขนานกันไว้กับผิวทาง แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับทำการศึกษาของ Lamann และ Novak สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องถึง 3 สัปดาห์

Chamchuenwong, A. (1998) ได้ใช้หลักการจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรถและความเครียดในอดีต (strain history) นั่นคือ จะทำการพล็อตกราฟระหว่างความเครียดสูงสุด (peak strain) กับน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ของรถจากข้อมูลที่เก็บมาซึ่งน้ำหนักรถสามารถหาได้เมื่อทราบค่าความเครียดสูงสุด (peak strain) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากรถคันดังกล่าว โดยการวิเคราะห์มีวิธีการดังนี้ คือ ทำการสร้างเส้นอินฟลูเอนซ์ลายน์ความเครียดของสะพาน ณ ตำแหน่งที่เลือกไว้จากการทดสอบทางสถิต จากนั้น วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักรถรวมกับความเครียดสูงสุดทางสถิต (peak static strain) ที่ได้จากการคำนวณ ณ จุดที่เลือกไว้ และทำการจัดการกับข้อมูลความเครียดที่วัดมาได้จากสนาม ซึ่งได้แก่การคัดแยกข้อมูลออกมาจากข้อมูลที่บันทึกอย่างต่อเนื่อง กำจัดผลของพลศาสตร์และทำการวิเคราะห์ข้อมูล

Chan และ คณะ (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักโดยการใช้ปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน รูปแบบของคำตอบที่แน่นอน (closed-form solution) สามารถหาได้เพื่อใช้ในการหา น้ำหนักคงที่ที่เคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) จะถูกนำมาใช้หาน้ำหนักที่เคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยสมการที่ใช้จะอยู่บนพื้นฐานของสมการของออยเลอร์ (Euler's equation) ของคาน และแบบจำลองของรถที่ใช้ในการสร้างปฏิกิริยาตอบสนองจะพิจารณาเป็น 2 เพลา

Zhu และ Law (1999) ได้ทำการจำลองรูปแบบสะพานเป็นคานต่อเนื่องหลายช่วงคาน ที่มีหน้าตัดไม่คงที่ พฤติกรรมการสั่นไหวของคานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่จะถูกวิเคราะห์โดยหลักการของฮามินตัน (Hamilton) โดยจุดรองรับภายในจะถูกแทนด้วยสปริงที่มีความแข็งมาก วิธีการหาน้ำหนักจะใช้หลักการของซุปเปอร์โพซิชันท์เชิงโหมด (modal superposition) และเทคนิคออฟติไมเซชั่น (optimization) ซึ่งน้ำหนักที่หาได้จะอยู่ในโดเมนของเวลา

Law และ คณะ (1999) ได้ทำการหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ ด้วยการใช้ข้อมูลของปฏิกิริยาตอบสนองของการสั่นไหวของสะพานเพียงอย่างเดียว โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ ซึ่งรถจะถูกจำลองให้มีรูปแบบเป็น 1 เพลา และ 2 เพลา (กำหนดระยะห่างระหว่างเพลาไว้คงที่) เคลื่อนที่อยู่บนคานที่มีจุดรองรับแบบธรรมดาและมีค่าความหน่วง (viscous damping) สมการการเคลื่อนที่ของคานสามารถหาได้โดยผ่านการแปลงพิกัดเชิงโหมด (modal coordinate) ผลลัพธ์ของสมการจะเชื่อมโยงกับฟูเรียร์ทรานส์-ฟอร์ม (Fourier transform) และน้ำหนักของรถจะถูกแปลงกลับไปสู่โดเมนของเวลา (time domain) ความถูกต้องของน้ำหนักที่หาได้จะถูกตรวจสอบด้วยการเปรียบเทียบกันระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้ ด้วยวิธีการดังที่กล่าวมาจะสามารถทำนายน้ำหนักของรถที่เคลื่อนที่ผ่านสะพานได้โดยปราศจากข้อมูลของลักษณะรถ

Chan และ คณะ (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการใช้สะพานที่เป็นคอนกรีตอัดแรง (prestressed concrete bridge) รถบรรทุก 2 เพลาได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลที่วัดได้จากภาคสนาม น้ำหนักที่เพลาทางพลศาสตร์สามารถหาได้โดยวิธีการโดเมนของเวลา (time domain) ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถสามารถหาได้จากผลรวมของน้ำหนักแต่ละเพลา และทำการหาความถี่พื้นฐาน (fundamental frequency) ของรถโดยการแปลงน้ำหนักแต่ละเพลาที่หาได้ในโดเมนของเวลาไปสู่โดเมนของความถี่ (frequency domain) โดยการใช้ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform)

Zhu และ Law (2000) ได้ทำการหาน้ำหนักที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) พฤติกรรมการสั่นไหวของสะพานภายใต้น้ำหนักที่เคลื่อนที่ จะถูกวิเคราะห์โดยการใช้ทฤษฎีของแผ่นบาง (orthotropic rectangular theory) และหลักการของซุปเปอร์โพซิชันเชิงโหมด (modal superposition principle) ซึ่งสามารถหาน้ำหนักได้ในโดเมนของเวลา (time domain) โดยน้ำหนักที่หาได้จากวิธีการจำลองรูปแบบเป็นคานกับวิธีการจำลองรูปแบบเป็นแผ่นบางจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน

Law และ คณะ (2001) ได้พบว่า การหาน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ที่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแกนเวลา ซึ่งเรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่า สภาวะที่ บกพร่อง (ill-conditioned) ดังนั้น จึงได้เพิ่มวิธีการเรกูลาร์ไรเซชัน (regularization) เข้าไปในขั้นตอนการคำนวณ โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ λ ที่เหมาะสม ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างน้ำหนักที่หาได้กับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ λ ที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเปรียบเสมือนตัวถ่วงน้ำหนัก นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด

Law และ Fang (2001) ได้ทำการหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่โดยการใช้เทคนิคของ ไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) ซึ่งเป็นการทำให้ความคลาดเคลื่อนระหว่างปฏิกิริยาตอบสนองที่วัดได้กับปฏิกิริยาตอบสนองที่สร้างขึ้นจากน้ำหนักที่หาได้มีค่าน้อยที่สุด น้ำหนักในรูปแบบของเสตทเสปซ (state-space formulation) ของระบบพลศาสต์จะถูกหาในโดเมนของเวลา โดยการใช้รีเคอร์สีฟฟอร์มูลา (recursive formula) บนพื้นฐานของการใช้ตัวเซนเซอร์หลายๆตัวในการวัดปฏิกิริยาตอบสนองของสะพาน

Phanapavudhikun, P. (2002) ได้ทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถบนสะพาน เพื่อหาน้ำหนักรถที่กำลังเคลื่อนที่บนสะพานด้วยเทคนิคของไดนามิคโปรแกรมมิง (dynamic programming) และทำการเปรียบเทียบกับวิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด (least square) ซึ่งได้พิจารณาผลของการบิดโดยการจำลองรูปแบบสะพานเป็นแผ่นบางสี่เหลี่ยมผืนผ้า (orthotropic rectangular plate) และได้ทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆที่กระทบต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก ซึ่งพบว่าความเร็วและความขรุขระของผิวทางมีผลต่อการทายน้ำหนักมากกว่าปัจจัยอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าโดยทั่วไปแล้วผลการทายน้ำหนักด้วยเทคนิคไดนามิคโปรแกรมมิง ให้ค่าที่ใกล้เคียงจริงมากกว่า วิธีการยกกำลังสองน้อยที่สุด อย่างไรก็ดีค่าความถูกต้องที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณให้ได้ค่าน้ำหนักรถที่ถูกต้องมากขึ้น โดยใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ นอกจากนั้นจะได้ทำการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่อาจมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการหาน้ำหนัก หากจะนำไปประยุกต์ใช้จริง

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วของรถบรรทุกและระดับความขรุขระของผิวทางที่มีต่อการหาน้ำหนักรถ

1.3.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาน้ำหนักรถให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยเทคนิคการคำนวณซ้ำ

1.3.3 เพื่อยืนยันผลของการปรับปรุงวิธีการหาน้ำหนักรถ ด้วยการทดสอบด้วยแบบจำลองย่อส่วน

1.3.4 เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพ และความถูกต้องของวิธีการหาน้ำหนักรถที่นำเสนอ ด้วยการทดสอบจากแบบจำลองย่อส่วน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะสะพานช่วงเดียวที่มีจุดรองรับเป็นแบบธรรมดา (simply support)

1.4.2 พิจารณาโครงสร้างสะพานมีพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบอิลาสติกเชิงเส้น (linear elastic)

1.4.3 พิจารณาการวิ่งของรถเฉพาะในทิศทางเดียว และพิจารณาน้ำหนักเป็นแบบจุดโดยพิจารณาเป็น 2 เพลา

1.4.4 การทดสอบแบบจำลองย่อส่วนไม่พิจารณาผลกระทบของสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 <u>ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ</u>

1.5.1 ทำให้ทราบถึงค่าน้ำหนักรวมทางสถิต (static gross weight) ของรถบรรทุกที่กำลังเคลื่อนที่อยู่บนสะพาน

1.5.2 เพิ่มความถูกต้องในการหาค่าน้ำหนักรถบรรทุกมากขึ้น

1.5.3 ทำให้ไม่ต้องมีการหยุดรถเพื่อขึ้นชั่งน้ำหนักซึ่งเป็นการประหยัดเวลาของผู้ขับขี่

1.5.4 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบและกำหนดมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกจร (live load)

1.5.5 สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ ไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาการออกกฎหมายควบคุมรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกิน

1.5.6 ช่วยลดปัญหาการปฏิบัติหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

1.6 <u>การดำเนินงานวิจัย</u>

1.6.1 ทำการหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำ (Iteration technique) โดยการจำลองให้รถบรรทุกวิ่งผ่านสะพานโดยใช้คอมพิวเตอร์

1.6.2 ศึกษาถึงผลกระทบจากตัวแปรต่างๆที่มีต่อการหาน้ำหนักรถบรรทุก

1.6.3 ติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนของสะพาน และแบบจำลองย่อส่วนของรถบรรทุก

1.6.4 ติดตั้งเสตรนเกจ และเครื่องมือที่ใช้เก็บสัญญาณ (data logger)

1.6.5 ตรวจสอบการทำงานของเสตรนเกจ และเครื่องมือที่ใช้เก็บสัญญาณ

1.6.6 ทำการปรับเทียบ (calibration) แบบจำลองย่อส่วนก่อนที่จะทำการหาน้ำหนักรถบรรทุก

1.6.7 ทำการทดสอบหาน้ำหนักรถบรรทุกด้วยเทคนิคการคำนวณซ้ำโดยแบบจำลองย่อส่วน

1.6.8 ทำการวิเคราะห์ผลข้อมูล อภิปรายผล และจัดทำรายงานการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย