แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบการจราจรของการดำเนินงานระบบเครื่องชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่ง

Simulation Model for Traffic Impact Assessment of Weigh-in-Motion System Implementation

โสรยา ปิยะวราภรณ์*[1] และ นพดล กรประเสริฐ[2]

[1]*หลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
**Corresponding author; E-mail address: soraya.kmm@gmail.com*

[2]*สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
E-mail address: nopkron@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การจำกัดเวลาและเส้นทางการเดินรถบรรทุกส่งผลให้เกิดปัญหาการจราจรของรถบรรทุกที่หนาแน่น เกิดความล่าช้าในการเดินทาง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงขึ้น และสร้างความเสียหายแก่โครงสร้างพื้นฐานทางถนนบนทางสายหลัก เพื่อเป็นการควบคุมมาตรฐานน้ำหนักรถบรรทุกให้เกิดประสิทธิภาพ หน่วยงานทางได้จัดให้มีด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกบนโครงข่ายถนน แต่อย่างไรก็ตาม การดำเนินการตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุกส่งผลกระทบด้านการจราจรต่อการเดินทางของรถบรรทุกและการจราจร ซึ่งในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ระบบการตรวจชั่งน้ำหนักแบบอัตโนมัติด้วยเครื่องมือเทคโนโลยีตรวจชั่งขณะรถวิ่ง (Weigh-in-Motion) หรือ WIM มาช่วยในการตรวจสอบน้ำหนักบรรทุกและคัดแยกรถบรรทุกที่มีน้ำหนักเกิน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านการจราจรของสถานีตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุกแบบอัตโนมัติบนถนนสายหลัก 4 ช่องจราจร โดยอาศัยการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation) ของด่านชั่งน้ำหนักรูปแบบต่าง ๆ และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบด้านการจราจร งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองของด่านชั่งน้ำหนัก 3 รูปแบบเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบ ได้แก่ (1) ด่านชั่งน้ำหนักถาวร (2) ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (WIM) ในการคัดแยกรถบรรทุก และ (3) ด่านชั่งน้ำหนักแบบใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติขณะรถวิ่ง (WIM) ในการตรวจสอบน้ำหนัก แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นประเมินผลกระทบด้านการจราจรด้วยดัชนีชี้วัดความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง ความล่าช้าในการให้บริการ และความยาวแถวคอย ผลของการวิจัยจะช่วยแนะนำถึงเงื่อนไขการจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักในรูปแบบต่าง ๆ และสภาพการจราจรที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (Weigh-in-Motion)

คำสำคัญ: ผลกระทบด้านการจราจร, ด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุก, เครื่องชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่ง, แบบจำลองการจราจร, เทคโนโลยีการขนส่ง

Abstract

Restricting time and route of heavy vehicles leads to the problem of heavy traffic and travel delays, which resulting in higher cost in transportation and causing damages to road infrastructure. In other to make the truck weight standard system to be in control and more effective, the road agencies have set up weighing truck stations on the road network. However, the truck weigh operation affects the truck traffic and overall traffic along the road network. Recently, the automatic weighing system using Weigh-In-Motion (WIM) has been gaining acceptance in weighing heavy vehicles and pre-screening the overweight vehicles. The objective of this research is to assess the traffic impact of different types of automatic weighing truck system on the 4-lane roads by using microscopic traffic simulation models, and then compare their traffic impacts. This research developed the models for 3 weigh truck systems including (1) weighing stations using static loads (2) weighing stations using WIM for screening overweight trucks and (3) weighing stations using WIM for weighing. The models assessed traffic impact using the average travel speed, service delay and queue length. The results will help suggest the conditions for establishing the weigh stations in various forms and traffic condition that are suitable with the Weight-in-Motion system.

Keywords: Traffic impact assessment, Weighing truck stations, Weigh-in-Motion, Traffic simulation, Transportation technology

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งของประเทศไทยได้รับความสนใจจากนักลงทุนทั่วโลกเป็นอย่าง ส่งผลให้รัฐบาลไทยให้ความสำคัญกับระบบขนส่งมากขึ้น ข้อมูลจากกรมพัฒนาธุรกิจการค้าประจำปีพุทธศักราช 2562 กล่าวว่าประเทศไทยมีธุรกิจให้บริการโลจิสติกส์ ด้านการขนส่งทางบกและระบบท่อลำเลียง คิดเป็นร้อยละ 71.58 สูงเป็นอันดับ 1 ของการขนส่งทั้งหมด [5] การเพิ่มขึ้นของปริมาณรถบรรทุกนั้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อการจราจรและสภาพถนน

ถนนในประเทศไทยมีระยะทางทั้งสิ้น 701,847.12 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.37 ของพื้นที่ทั้งหมด [9] ถนนส่วนมากอยู่ในสภาพปกติ แต่ยังมีบางส่วนที่อยู่ในสภาพที่ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไข เนื่องจากการใช้งานโดยปกติแล้วถนนถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 20 ปี จากสถิติของกรมทางหลวง [4] แต่ละปีจะเสียงบประมาณในการซ่อมบำรุงถนน คิดเป็นสัดส่วน 20 เปอร์เซ็นต์ของงบประมาณทั้งหมด หรือราว ๆปีละ 20,000-30,000 ล้านบาท กรมทางหลวงได้มีการจัดตั้งหน่วยงานเฉพาะที่มีหน้าที่รับผิดชอบดำเนินการตรวจสอบน้ำหนักยานพาหนะบนทางหลวงทั่วประเทศ เพื่อป้องกันไม่ให้ทางหลวงชำรุดเสียหายเนื่องจากยานพาหนะน้ำหนักบรรทุกเกินพิกัดที่กฎหมายกำหนด นั้นก็คือสำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ โดยที่ด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกบนทางหลวงปัจจุบันมีด้วยกันทั้งสิ้น 70 แห่งทั่วประเทศ แต่เนื่องจากประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงพัฒนาด้านอุตสาหกรรม เศรษฐกิจเติบโตขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ธุรกิจด้านการขนส่งเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณรถบรรทุกขึ้น เป็นปัจจัยให้เกิดพฤติกรรมการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดกฎหมายกำหนด

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีตรวจชั่งน้ำหนักแบบอัตโนมัติ (Weigh-In-Motion) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถชั่งน้ำหนักรถในขณะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ตรวจชั่งสามารถคัดกรองรถบรรทุกที่บรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดออกจากรถบรรทุกทั้งหมด เพื่อให้ปริมาณรถบรรทุกที่เข้ารับการตรวจชั่งน้ำหนักบริเวณด่านชั่งถาวรน้อยลง และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถบรรทุกส่งผลกระทบโดยตรงต่อการจราจร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบด้านการจราจรของด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกบนถนนสายหลัก 4 ช่องจราจร ด้วยแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation) ของด่านชั่งน้ำหนักรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางช่วยแนะนำถึงเงื่อนไขการจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักในรูปแบบต่าง ๆ และสภาพการจราจรที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (Weigh-in-Motion)

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ด่านชั่งน้ำหนัก (Weigh Station)

ด่านชั่งน้ำหนักที่ติดตั้งบนทางหลวงเพื่อควบคุมและตรวจสอบน้ำหนักรถบรรทุกให้อยู่ในข้อกฎหมายที่กำหนดไว้ ด่านชั่งน้ำหนักเปิดดำเนินการตลอด 24 ชั่วโมง และระบบของการตรวจวัดน้ำหนักรถบรรทุกเป็นเครื่องชั่งแบบบ่อที่จะสามารถชั่งน้ำหนักขณะที่รถหยุดนิ่ง (Static Scale) อีกทั้งยังสามารถชั่งน้ำหนักรถบรรทุกได้ทั้งคัน [11]

ด่านชั่งน้ำหนักตามมาตรฐานของกรมทางหลวง สามารถแบ่งประเภทออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

1. ด่านชั่งน้ำหนักขนาดเล็ก คือ การก่อสร้างเป็นตู้คอนเทนเนอร์และมีเครื่องชั่งน้ำหนัก เนื่องจากบริเวณที่จัดสร้างนั้นไม่มีพื้นที่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 1
2. ด่านชั่งน้ำหนักขนาดกลาง คือ การก่อสร้างเป็นโครงสร้างถาวรและมีเครื่องชั่งน้ำหนัก บริเวณที่จัดสร้างมีพื้นที่เพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2
3. ด่านชั่งน้ำหนักขนาดใหญ่ คือ ด่านชั่งน้ำหนักที่สร้างในพื้นที่ดินสงวนของกรมทางหลวง เช่น สถานีจุดพักรถบรรทุก (Truck Rest Area) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3

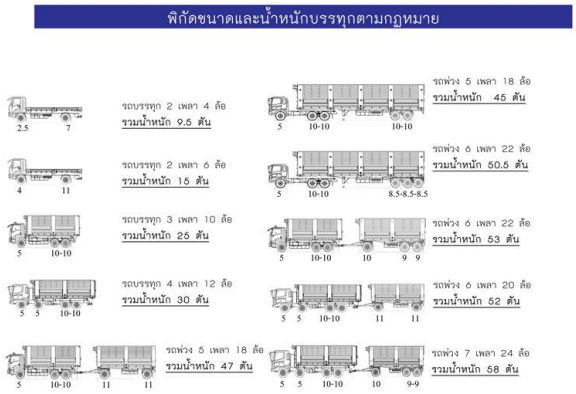
รูปที่ 1 ด่านชั่งน้ำหนักขนาดเล็ก
ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง (2557)

รูปที่ 2 ด่านชั่งน้ำหนักขนาดกลาง
ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง (2557)

รูปที่ 3 ด่านชั่งน้ำหนักขนาดใหญ่
ที่มา : สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง (2557)

2.2 รถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด

การจราจรเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของถนน โดยที่ถนนส่วนใหญ่จะกำหนดค่าโหลดเพลาของยานพาหนะไว้จำกัดเพื่อการขนส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่กำหนดค่าน้ำหนักลงเพลาแต่ละเพลาต้องไม่เกิน 9.1 ตัน สำหรับเพลาเดี่ยว และไม่เกิน 8.2 ตัน สำหรับเพลาคู่ที่ชิดกัน ยกตัวอย่างเช่นรถบรรทุกสิบล้อ ถนนออกแบบรับน้ำหนักลงเพลา 21 ตัน คือ เพลาหน้า 4.6 ตันสำหรับเพลาเดี่ยว เพลาท้าย 8.2 ตันสำหรับเพลาคู่ที่ชิดกัน อายุการใช้งานของถนน 15 ปี [6] ความเสียหายของถนนเนื่องจากรถบรรทุกหนัก เป็นความเสียหายที่สะสมอยู่ภายใต้ผิวทางและโครงสร้าง เมื่อเวลาผ่านไป ถนนก็จะค่อยๆเสื่อมสภาพลง จากการศึกษาทางวิศวกรรมพบว่าความเสียหายของถนนมีค่าเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักลงเพลายกกำลังสี่ กล่าวคือ ถ้าน้ำหนักลงเพลาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัว เพลานั้นจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อถนนเพิ่มขึ้นเป็น 16 เท่าตัว



รูปที่ 4 พิกัดขนาดและน้ำหนักรถบรรทุกตามกฎหมายกำหนด
ที่มา : sites.google.com (2563)

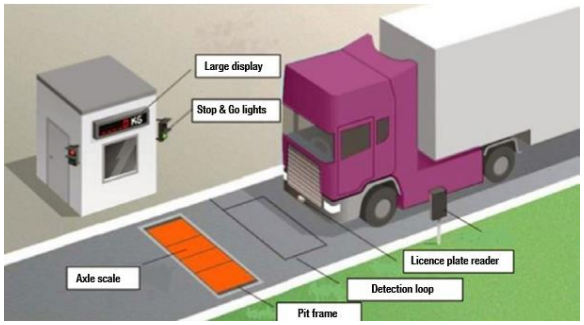
2.3 Weigh-In-Motion (WIM)

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจสอบน้ำหนักยานพาหนะ [1] โดยทำการติดตั้งบนถนนหรือรางรถไฟ อีกทั้งยังสามารถติดตั้งที่ยานพาหนะเพื่อใช้ในการวัดจัดเก็บและให้ข้อมูลเกี่ยวกับการไหลของการจราจร ในขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่อยู่บนถนนหรือรางรถไฟ แต่การติดตั้งบนถนนนั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากต้องทำการติดตั้งให้ลึกเพียงพอเพื่อป้องกันการเสียหายที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของรถบนท้องถนน และการซ่อมบำรุงจะต้องทำการปิดการจราจร ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ปัจจุบันจึงมีไม่มาก ระบบตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion) สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท

2.2.1 ระบบตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ (Low Speed Weigh-In-Motion; LS-WIM) เป็นระบบที่ติดตั้งบริเวณนอกช่องจราจรสายหลัก เพื่อควบคุมความเร็ว พื้นที่สำหรับติดตั้งควรเป็นแพลตฟอร์มคอนกรีตเรียบ ความยาว 30 เมตรขึ้นไป ค่าน้ำหนักที่วัดได้โดยทั่วไปมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับช่วงความเร็วของรถ ความแม่นยำในการวัดค่าน้ำหนักขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆเช่น คุณภาพในการติดตั้ง กายภาพของถนน ความราบเรียบของแพลตฟอร์มคอนกรีต เป็นต้น และประสิทธิภาพของการวัดค่าขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการวัด อัลกอรีทึมในการวิเคราะห์ข้อมูล และวิธีการจัดการกับสิ่งรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของยานพาหนะ โดยระบบ LS-WIM สามารถแบ่งประเภทออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) Strip and Bar Sensors เป็นเทคโนโลยีที่สามารถวัดความดันที่กระทำกับตัวเซ็นเซอร์เพื่อประมวลผลปริมาณทางกายภาพ มีราคาถูก ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย แต่ผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกที่รบกวน เช่นสภาพอากาศ พฤติกรรมการขับขี่ โดยจะติดตั้งบนชั้นผิวจราจร

2) Scale and Plates เป็นเทคโนโลยีที่ประมวลผลน้ำหนักของรถที่กำลังเคลื่อนที่ โดยที่จะติดตั้งภายใต้โครงสร้างผิวถนน



รูปที่ 5 การออกแบบระบบตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ
ที่มา : ISWIM, International Society for Weigh-in-Motion (2019)

2.2.2 ระบบตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุกขณะเคลื่อนที่ความเร็วสูง (High Speed Weigh-In-Motion; HS-WIM) เป็นระบบที่ติดตั้งบริเวณช่องจราจรสายหลัก ที่ใช้ความเร็วปกติ (30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงหรือมากกว่า) ผลกระทบที่รบกวนประสิทธิภาพการทำงานของระบบนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของเซ็นเซอร์ โดยปกติระบบ HS-WIM จะมีความคลาดเคลื่อนในการวัดค่า GVW อยู่ที่ระหว่าง ±5% ถึง ±10% และการวัดค่าน้ำหนักของระบบนี้จะได้รับผลกระทบจากพลศาสตร์ยานพาหนะโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ

- ลักษณะทางกายภาพของผิวทางก่อนถึงจุดติดตั้งระบบWIM
- พฤติกรรมการขับขี่
- องค์ประกอบช่วงล่างของรถบรรทุก

ระบบ HS-WIM สามารถแบ่งประเภทออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

1) In-Road WIM เทคโนโลยีลักษณะนี้จะคล้ายกับระบบ LS-WIM สามารถแบ่งได้เป็น Strip or Bar Sensors และ Scale and Plates

2) Bridge WIM เป็นระบบที่ติดตั้งเซ็นเซอร์บริเวณสะพาน จะใช้วัดความเครียดและพฤติกรรมการโก่งตัวของสะพานเมื่อรถบรรทุกเคลื่อนผ่านแล้วประมวลผลออกมาเป็นน้ำหนักและแรงในแนวแกน

3) Dynamic On-Board Weighing-In-Motion เป็นระบบที่วัดน้ำหนักรถบรรทุกที่ติดตั้งบนยานพาหนะ

ข้อมูลจากสำนักนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร [4] พบว่างบประมาณในปีพุทธศักราช 2548 ประเทศไทยมีการก่อสร้างด่านชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่ง (Weigh-In-Motion) จำนวน 10 แห่ง ในงบประมาณปีพุทธศักราช 2548 โดยการติดตั้งแบบ High Speed WIM ที่สามารถตรวจวัดน้ำหนักขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 16-36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะทำการติดตั้งก่อนถึงด่านชั่งน้ำหนักถาวรประมาณ 1 กิโลเมตร

ตารางที่ 1 ตำแหน่งที่ตั้งด่านชั่งน้ำหนักขณะเคลื่อนที่ (Weigh-In-Motion; WIM)

ลำดับ	ทางหลวงหมายเลข	ตำแหน่งที่ตั้ง	กม.+ม.
1	1	กม.80+000 (ต่อเขตแขวงฯ อยุธยา) - สระบุรี	97+855
2	32	ทางแยกต่างระดับบางปะอิน-กม.68+000	55+659
3	2	กม.166+000 (ต่อเขตแขวงฯสระบุรี)-ทางแยกไปชัยภูมิ (ขาเข้าและขาออก)	201+993
4	35	ธนบุรี-ปากท่อ (ขาเข้าและขาออก)	53+432
5	4	กม.41+067 - จุดเริ่มทางเลี่ยงเมืองนครปฐม	41+538
6	3	แยกทางหลวงหมายเลข 34-ชลบุรี	84+620
7	340	บางบัวทอง-สุพรรณบุรี	52+200
8	9	บางบัวทอง-ต่อเขตแขวงฯธนบุรี-ลาดหลุมแก้ว	38+896
9	4	จุดสุดทางเลี่ยงเมืองอีจาง-จุดเริ่มทางเลี่ยงเมืองอีจาง	89+275
10	304	มีนบุรี-ฉะเชิงเทรา	50+400

**อ้างอิงจากรายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร*

2.4 หลักการของแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

แบบจำลองการจราจรเป็นการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแต่ละประเภทบนโครงข่ายถนน (VISSIM) ซึ่งเงื่อนไขการจราจรมีด้วยกันอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบพลวัต (dynamic) และแบบสุ่ม (stochastic) การจำลองพฤติกรรมจะถูกพิจารณาทุก ๆ ช่วงเวลาย่อย (time step) โดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการเคลื่อนที่ และพฤติกรรมการขับขี่ ผลที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปประเมินประสิทธิภาพของโครงข่ายถนน ตัวอย่างเช่น ระดับการให้บริการ (LOS) ความล่าช้าในการเดินทาง (Delay) ความยาวแถวคอย (Queue Length) เป็นต้น [7]

ความเร็วในการเดินทางเฉลี่ย (Average Travel Time) [12] เป็นค่าเฉลี่ยความเร็วในรูปแบบของ Space Mean Speed โดยสามารถหาได้จาก ระยะทางหารด้วยค่าเฉลี่ยของเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในระยะทางนั้น โดยที่เวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่นั้นจะพิจารณาถึงความล่าช้าเนื่องจากการหยุดรถ (Stopped delays) ร่วมด้วย

ความล่าช้าในการเดินทาง (Travel Time Delay) ความล่าช้าที่เกิดจากการชะลอรถและการออกรถ ความล่าช้าเป็นดัชนีที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการรองรับปริมาณจราจรและระดับการให้บริการ โดยเทคนิคที่ใช้ในการสำรวจความล่าช้าในการเดินทางเรียกว่า Float Car เป็นวิธีที่ต้องพยายามขับรถด้วยความเร็วที่รถทั่วไปใช้ บริเวณช่วงถนนที่ทำการสำรวจ เพื่อรักษาความเร็ว

ความยาวแถวคอย (Queue Length) [13] สามารถวัดได้จาก upstream ของช่วงถนนที่สำรวจถึงรถคันสุดท้ายที่เข้ามาในแถวคอย เมื่อทราบถึงความยาวแถวคอยและเวลาที่เกิดแถวคอยแล้ว สามารถนำมาพิจารณาสภาพการจราจรได้ว่าเป็นแบบไม่อิ่มตัว (Under saturation) หรืออิ่มตัว (Over saturation)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย [8] ทำการศึกษาสถิติการกระจายตัวของค่าน้ำหนักรถบรรทุกและผลกระทบที่มีต่อสภาพถนน โดยวิธี Weigh-In-Motion (WIM) ซึ่งเป็นวิธีการนำอุปกรณ์ไปติดตั้งบนสะพานที่มีดัดแปลงให้เป็นเครื่องวัดน้ำหนักรถบรรทุก ซึ่งจะสามารถวัดน้ำหนักรถบรรทุกทุกคันที่วิ่งผ่านสะพาน ผลที่ได้พบว่า

1. รถบรรทุกสิบล้อน้ำหนักเกิน 21 ตัน คิดเป็นร้อยละ33 ก่อให้เกิดความเสียหายต่อถนนคิดเป็นร้อยละ 81 ของความเสียหายทั้งหมด
2. รถบรรทุกสิบล้อน้ำหนักเกิน 30 ตัน คิดเป็นร้อยละ5 ก่อให้เกิดความเสียหายต่อถนนคิดเป็นร้อยละ 41 ของความเสียหายทั้งหมด
3. รถบรรทุกสิบล้อน้ำหนักต่ำกว่า 21 ตัน คิดเป็นร้อยละ 61 ก่อให้เกิดความเสียหายต่อถนนคิดเป็นร้อยละ 19 ของความเสียหายทั้งหมด
4. รถบรรทุกสิบล้อน้ำหนักเกิน 40 ตัน คิดเป็นร้อยละ 1 และน้ำหนักสูงสุดของรถบรรทุกสิบล้อที่ตรวจพบคือ 41 ตัน

Bosso, Vasconcelos, Ho and Bernucci (2019) [2] ศึกษาการพัฒนาวิธีการใช้ Weigh-In-Motion เพื่อระบุน้ำหนักของรถบรรทุกที่บรรทุกเกินพิกัดและรูปแบบการเดินทางของรถบรรทุก ทำการสร้างแบบจำลองการทำนายชุดข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่สำคัญสำหรับการจำแนก โดยพบว่าตัวแปรประเภทของรถบรรทุกและตัวแปรช่วงเวลาในการเดินทางเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด จากผลที่ได้สามารถนำไปวางแผนการบังคับใช้รถบรรทุกตามสถานการณ์ต่างๆอีกทั้งเพิ่มความรู้เกี่ยวกับลักษณะของรถบรรทุก ซึ่งสามารถนำไปสู่การจัดการกับผิวทางให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและออกแบบโครงสร้างผิวทางให้มีความเหมาะสม

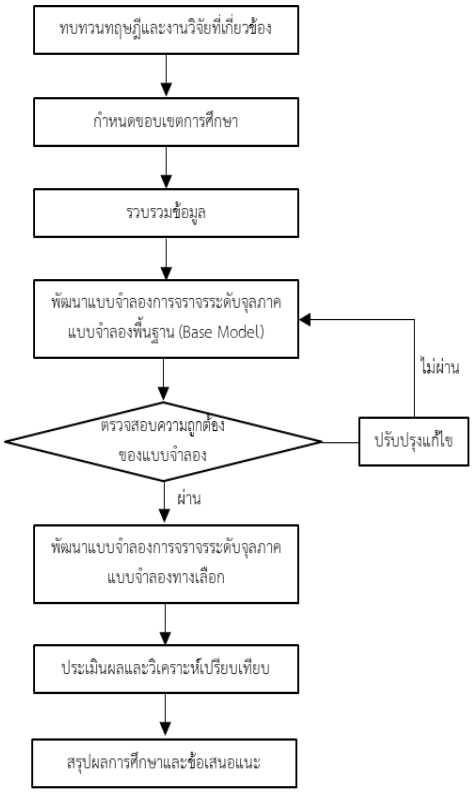
Karim, Ibrahim, Saifizul and Yamanaka (2013) [3] ศึกษาผลกระทบของความสามารถในการใช้ Vehicle by-pass และสถานีตรวจชั่งน้ำหนักถาวรในประเทศที่กำลังพัฒนา ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ระบบ Weigh-In-Motion จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบังคับใช้น้ำหนักรถบรรทุกอย่างมีนัยสำคัญ ช่วยลดงบประมาณในการบำรุงรักษาถนน ถ้าหากรถบรรทุกที่บรรทุกเกินพิกัดลดลง จะส่งผลให้ถนนมีอายุการใช้งานมากขึ้น อีกทั้งความเสี่ยงของอุบัติเหตุก็น้อยลง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยลงอีกด้วย

3. วิธีการศึกษา

ส่วนนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและแนวทางวิธีการศึกษา โดยประกอบไปด้วย 8 ขั้นตอนหลัก อันได้แก่ ทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กำหนดพื้นที่ศึกษา รวบรวมข้อมูล พัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคแบบจำลองพื้นฐาน ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคแบบจำลองทางเลือก ประเมินผลประสิทธิภาพและวิเคราะห์เปรียบเทียบ และสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ ดังรูปที่ 6 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3.1 กำหนดขอบเขตพื้นที่การศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ทำการจำลองสถานการณ์ (Scenarios) ทั้งหมด 3 ทางเลือก คือ (1) ด่านชั่งน้ำหนักถาวร (2) ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (WIM) ในการคัดแยกรถบรรทุก และ (3) ด่านชั่งน้ำหนักแบบใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติขณะรถวิ่ง (WIM) ในการตรวจสอบน้ำหนัก บนถนนสายหลัก 4 ช่องจราจร และประเมินผลกระทบด้านการจราจรด้วยดัชนีชี้วัดความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง ความล่าช้าในการให้บริการ และความยาวแถวคอย จากข้อมูลปริมาณรถบรรทุกที่ได้จากฐานข้อมูลของระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง Central Road Database หรือ roadnet2.doh.go.th ประจำปี 2562 บนทางหลวงหมายเลข 118 เชียงใหม่-ดอยนางแก้ว



รูปที่ 6 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.2 รวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ อันได้แก่ ข้อมูลปริมาณรถบรรทุก ลักษณะทางกายภาพของด่านชั่ง ข้อมูลทางกายภาพของสายทาง

3.2.1 ข้อมูลปริมาณรถบรรทุก

ข้อมูลปริมาณรถบรรทุกแต่ละประเภท ได้มาจากข้อมูลสถิติของสำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ กรมทางหลวง ของด่านชั่งน้ำหนักดอยสะก็ดขาเข้า ทางหลวงหมายเลข 118 เชียงใหม่-ดอยสะเก็ด ช่วงวันที่ 1 พฤษภาคม 2562 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2562 มาเฉลี่ยกัน ปริมาณรถที่เข้ารับการตรวจชั่งเฉลี่ยอยู่ที่ 6,497 คันต่อเดือน และปริมาณรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 0.02% ของปริมาณรถบรรทุกทั้งหมดที่เข้าตรวจชั่ง

ตารางที่ 2 สถิติปริมาณรถบรรทุกที่เข้ารับการตรวจชั่งที่ด่านดอยสะเก็ดขาเข้า

ช่วงการเก็บข้อมูล	ปริมาณรถบรรทุกทั้งหมด	ปริมาณรถบรรทุกน้ำหนักเกินมาตรฐาน
พฤษภาคม 2563	7,764 คัน/เดือน	2 คัน/เดือน
มิถุนายน 2563	5,230 คัน/เดือน	1 คัน/เดือน

**อ้างอิงจากกรมทางหลวง*

3.2.2 ลักษณะทางกายภาพของด่านชั่ง

การจัดตั้งด่านชั่งน้ำหนักถาวรบนทางหลวง [10] ต้องมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมในการจัดตั้ง โดยพิจารณาจากลำดับความสำคัญของถนนผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และลักษณะทางเรขาคณิตของทางหลวง

บริเวณด่านชั่งน้ำหนักจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้เพื่อดำเนินการตรวจสอบยานพาหนะ อันได้แก่ เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบบ่อ ระบบอ่านป้ายทะเบียนอัตโนมัติ ระบบคัดแยกประเภทรถ ระบบชั่งน้ำหนักอัตโนมัติ เครื่องแสดงผลน้ำหนัก ระบบกล้องวงจรปิด (CCTV)

3.2.3 ข้อมูลทางกายภาพของสายทาง

ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของสายทาง พื้นที่ศึกษาบริเวณทางหลวงหมายเลข 118 เชียงใหม่-ดอยนางแก้ว ซึ่งเป็นถนนที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวง 4 ช่องจราจร ความกว้างช่องจราจร 3.5 เมตร อ้างอิงข้อมูลจากระบบสารสนเทศโครงข่ายทางหลวง Central Road Database หรือ roadnet2.doh.go.th

3.3 พัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านการจราจร ด้วยดัชนีความเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง ความล่าช้าในการให้บริการ และความยาวแถวคอย ของแบบจำลองทางเลือกต่าง ๆ โดยทำการสร้างแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคจากปริมาณจราจร ลักษณะทางกายภาพของด่านชั่งและสายทาง ผู้จัดทำได้ทำการกำหนดแบบจำลองทางเลือกไว้ 3 ทางเลือก โดยแตกต่างกันที่ลักษณะของด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุก คือ ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบไม่มีระบบ WIM และด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบมีระบบ WIM ซึ่งแบบที่มีระบบ WIM จะแบ่งออกได้เป็น Low Speed WIM และ High Speed WIM การพัฒนาแบบจำลองการจราจรสามารถแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้

3.3.1 พัฒนาพฤติกรรมในการเดินทาง

ลักษณะการเดินทางสามารถสร้างโดยการกำหนดพฤติกรรมรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองได้แก่

- เวลาในการให้บริการด่านชั่งน้ำหนัก (Service time) เป็นเวลาที่รถบรรทุกหยุดรอเพื่อใช้บริการด่านชั่งน้ำหนัก โดยทำการกำหนดไว้ที่ 30 วินาที
- ลักษณะการรอคิว (Queuing) กำหนดพื้นที่ในการรอคิวเพื่อใช้บริการด่านชั่งน้ำหนักถาวร
- สัดส่วนการเดินทาง (Vehicle routes) เพื่อจำลองเส้นทางการเดินทางของรถบรรทุก โดยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการบรรทุกน้ำหนักของรถบรรทุก
- ความเร็วที่ใช้ในการเดินทาง (Vehicle Speed) เป็นระยะทางที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ในหนึ่งชั่วโมง จากกฎหมายกำหนดไว้ว่าถนนนอกเมือง รถยนต์ความเร็วไม่เกิน 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรถบรรทุกความเร็วไม่เกิน 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- สัดส่วนปริมาณรถบรรทุกและรถยนต์ (Vehicle Input) จำนวนรถบนโครงข่ายถนนที่พิจารณา กำหนดในหน่วยคันต่อชั่วโมง

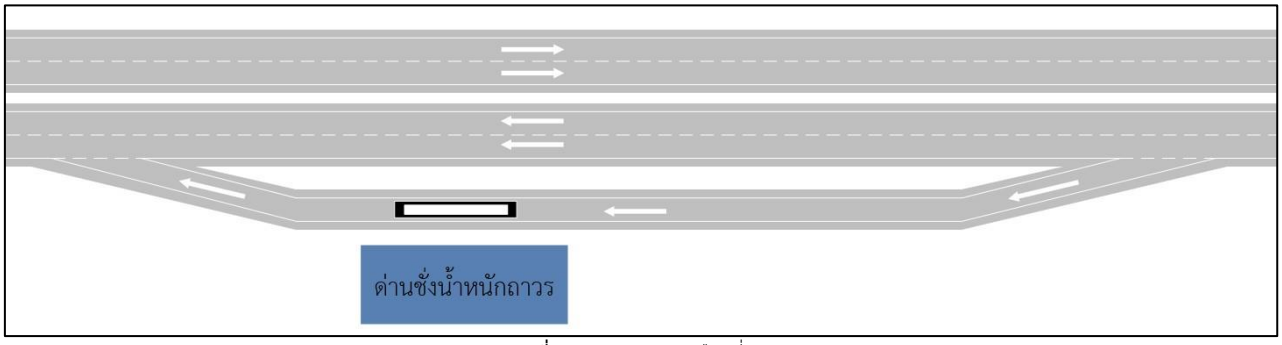
3.3.2 พัฒนาแบบจำลองทางเลือกต่าง ๆ

งานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลกระทบด้านการจราจรของแบบจำลองแต่ละทางเลือก ทั้ง 3 ทางเลือกดังนี้

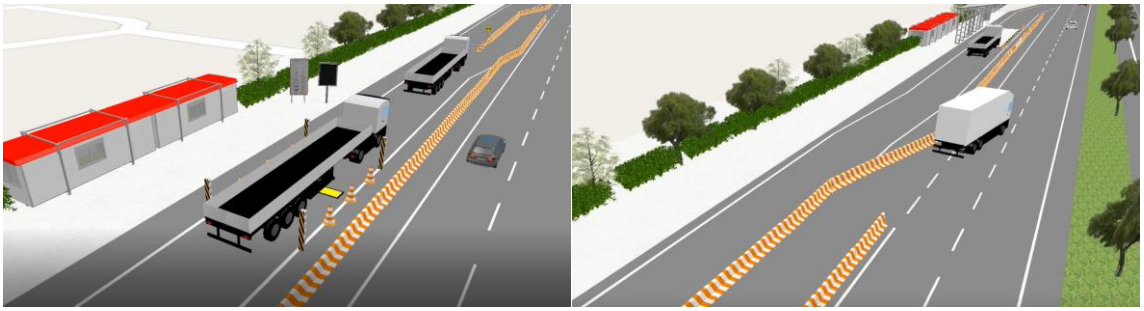
1) ด่านชั่งน้ำหนักถาวร : เป็นแบบจำลองพื้นฐาน ซึ่งรถบรรทุกทุกคันต้องเข้ารับการตรวจชั่งน้ำหนักที่ด่านชั่งน้ำหนักถาวร แสดงดังรูปที่ 7

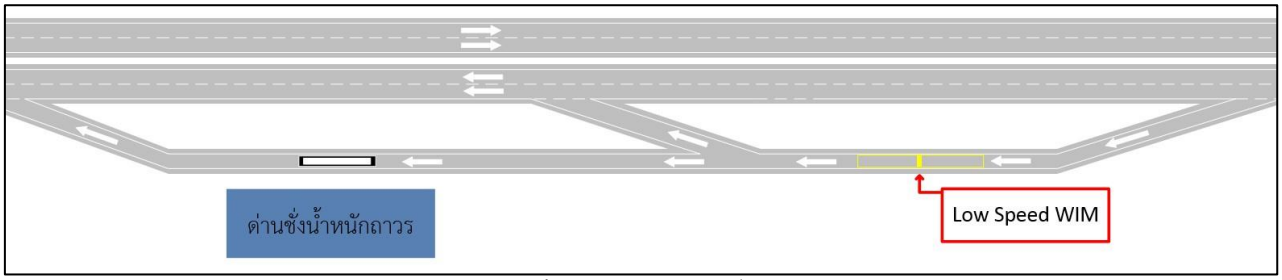
2) ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (WIM) ในการคัดแยกรถบรรทุก : เป็นแบบจำลองที่ใช้ระบบ Low Speed WIM เพื่อคัดกรองรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด โดยจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์บริเวณพื้นที่นอกเส้นจราจรหลัก เพื่อควบคุมความเร็วรถบรรทุกให้ไม่เกิน 12 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สัดส่วนการเดินทางของรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดจะอยู่ที่ร้อยละ 0.02 ของปริมาณรถบรรทุกทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 8

3) ด่านชั่งน้ำหนักแบบใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติขณะรถวิ่ง (WIM) ในการตรวจสอบน้ำหนัก : เป็นแบบจำลองที่ใช้ระบบ High Speed WIM เพื่อตรวจชั่งน้ำหนักรถบรรทุก โดยจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์บริเวณช่องจราจรสายหลักช่องความเร็วต่ำ (ช่องจราจรซ้ายสุด) ก่อนถึงทางเข้าด่านชั่งถาวร 1 กิโลเมตร สัดส่วนการเดินทางของรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดจะอยู่ที่ร้อยละ 0.02 ของปริมาณรถบรรทุกทั้งหมด โดยที่ระบบ High Speed WIM สัดส่วนการเดินทางของรถบรรทุกที่ไม่ได้บรรทุกเกินพิกัดกฎหมายกำหนด ไม่ต้องเข้าด่านชั่งถาวร แสดงดังรูปที่ 9

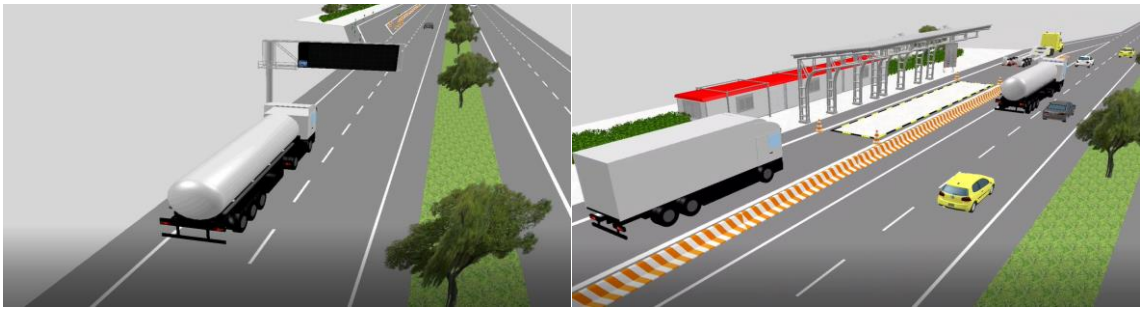


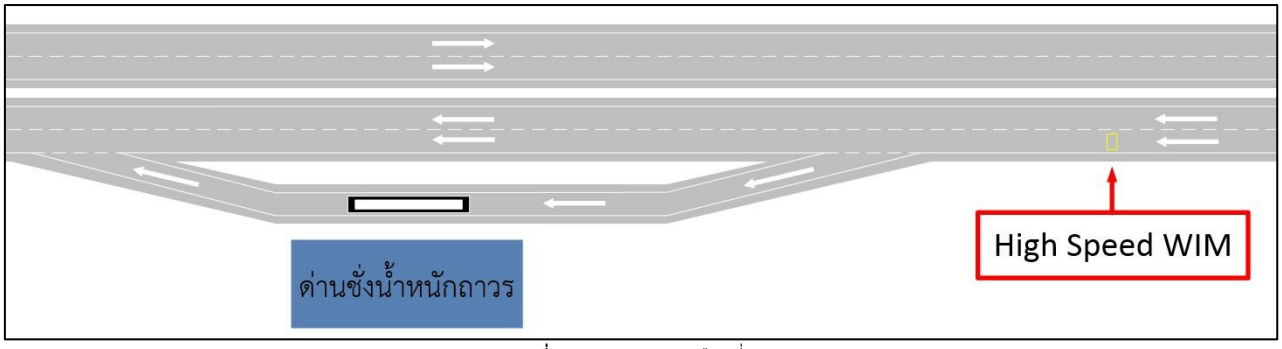
รูปที่ 7 แบบจำลองทางเลือกที่ 1





รูปที่ 8 แบบจำลองทางเลือกที่ 2





รูปที่ 9 แบบจำลองทางเลือกที่ 3

4. ผลการศึกษา

ผลจากการจำลองสภาพการจราจรของด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกแต่ละประเภท บริเวณดอยสะเก็ดขาเข้า บนถนนทางหลวงหมายเลข 118 เชียงใหม่-ดอยนางแก้ว ทำการประเมินเพื่อวิเคราะห์ผล เปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 3 ทางเลือก โดยผลที่ได้จากแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากตารางแสดงผลการจำลองการจราจรแต่ละทางเลือก ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางหาได้จากผลหารของเวลาการเดินทาง (Vehicle Travel Time) กับระยะทางที่เดินทางไปได้ ของทั้งโครงข่ายถนนเฉลี่ยกัน ของแบบจำลองแต่ละทางเลือกมีผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จากผลที่ได้พบว่าแบบจำลองทางเลือกที่ 2 และแบบจำลองทางเลือกที่ 3 กรณีที่ติดตั้งระบบ WIM ความเร็วเฉลี่ยในการเดินทางเพิ่มขึ้นร้อยละ13-19 กรณีแบบจำลองทางเลือกที่ 2 เพิ่มขึ้นร้อยละ 13 และแบบจำลองทางเลือกที่ 3 เพิ่มขึ้นร้อยละ 19

ความล่าช้าในการให้บริการ (Delay) พบว่า เทคโนโลยี WIM สามารถช่วยลดความล่าช้าของการให้บริการได้เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางเลือกที่ 1 กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งเทคโนโลยี WIM คิดเป็นร้อยละ 88-92 (แบบจำลองทางเลือกที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 88 และ แบบจำลองทางเลือกที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 92)

ความยาวแถวคอย (Queue Length) การศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาหาผลกระทบของการจราจร เนื่องจากด่านชั่งน้ำหนัก ดังนั้นจึงทำการพิจารณาความยาวแถวคอยของรถบรรทุกที่บดบังการจราจรสายหลัก จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าเทคโนโลยี WIM สามารถช่วยลดปัญหาด้านความยาวแถวคอยได้ โดยความยาวแถวคอยลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางเลือกที่ 1 กล่าวคือความยาวแถวคอยของทางเลือกที่ 2 และทางเลือกที่ 3 จะไม่เกิดขึ้นเลย

ตารางที่ 3 สรุปผลการจำลองสภาพการจราจรของทั้ง 3 ทางเลือก

แบบจำลองทางเลือก	ผลกระทบด้านการจราจร		
	Travel Speed (เมตรต่อวินาที)	Service Delay (วินาที)	Queue Length (เมตร)
ด่านชั่งน้ำหนักถาวร	19.80	11.39	1.32
ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (WIM) ในการคัดแยกรถบรรทุก	22.40	1.33	-
ด่านชั่งน้ำหนักแบบใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติขณะรถวิ่ง (WIM) ในการตรวจสอบน้ำหนัก	23.47	0.94	-

**ผลจากแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค*

จากผลการศึกษาข้างต้นสรุปได้ว่า เทคโนโลยี Weigh-In-Motion (WIM) เป็นเครื่องมือที่ช่วยทำให้ผลกระทบด้านการจราจรของด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกดีขึ้น

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการนำเสนอการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบด้านการจราจรของด่านชั่งน้ำหนัก 3 รูปแบบ อันได้แก่ (1) ด่านชั่งน้ำหนักถาวร (2) ด่านชั่งน้ำหนักถาวรแบบใช้เครื่องชั่งขณะรถวิ่ง (WIM) ในการคัดแยกรถบรรทุก และ (3) ด่านชั่งน้ำหนักแบบใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติขณะรถวิ่ง (WIM) ในการตรวจสอบน้ำหนัก โดยพื้นที่ศึกษาคือ ด่านชั่งน้ำหนักดอยสะเก็ดขาเข้า ทางหลวงหมายเลข 118 จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นถนนที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวง ทำการพัฒนาแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค (PTV VISSIM) เพื่อจำลองสภาพจราจรของด่านชั่งน้ำหนักแต่ละรูปแบบ และผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่า แบบจำลองทางเลือกที่ 2 และแบบจำลองทางเลือกที่ 3 กรณีที่ติดตั้งระบบ Weigh-In-Motion ช่วยลดปัญหาผลกระทบด้านการจราจรของด่านชั่งน้ำหนักรถบรรทุกได้ จากการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดเช่น ความเร็วในการเดินทางเฉลี่ย ความล่าช้าในการให้บริการ ความยาวแถวคอย เทคโนโลยี Weigh-In-Motion เป็นระบบที่ช่วยในการคัดกรองรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด เพื่อให้ปริมาณรถบรรทุกที่เข้ารับการตรวจชั่งบริเวณด่านชั่งน้ำหนักถาวรน้อยลง รถบรรทุกที่รอรับการตรวจชั่งใช้เวลารอน้อยลง ส่งผลให้การติดขัดบริเวณทางออกด่านชั่งน้ำหนักเข้าสู่ถนนสายหลักน้อยลงและไม่กระทบต่อกระแสจราจรของถนนสายหลัก

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3 ผลที่ได้จากดัชนีชี้วัดมีค่าไม่ต่างกันมาก ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นเพื่อร่วมพิจารณา เช่น ปัจจัยด้านพื้นที่ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ เป็นต้น ทำการศึกษาความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการติดตั้งของระบบ Weigh-In-Motion แต่ละประเภทให้เข้ากับลักษณะทางกายภาพของด่านชั่งน้ำหนัก เพื่อประกอบการตัดสินใจ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางวิศวกรรมขนส่งและเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐาน (Excellence Center in Infrastructure Technology and Transportation Engineering – ExCITE) ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลือในด้านวิชาการ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ช่วยเหลือด้านการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Hans van Loo and Aleš Žnidarič. (2019). *Guide for Users of Weigh-In-Motion An Introduction to Weigh-In-Motion*. ISWIM, International Society for Weigh-in-motion.

[2] Mariana Bosso, Kamilla L. Vasconcelos, Linda Lee Ho and Liedi L. B. Bernucci. (2019). Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. *Traffic and Transportation Engineering*.

[3] Mohamed Rehan Karim, Nik Ibtishamiah Ibrahim, Ahmad Abdullah Saifizul and Hideo Yamanaka. (2014). Effectiveness of vehicle weight enforcement in a developing country using weigh-in-motion sorting system considering vehicle by-pass and enforcement capability. *Traffic and Safety Sciences*.

[4] กรมทางหลวง. (ม.ป.ป.). ด่านชั่งน้ำหนักขณะรถวิ่ง. รายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร.

[5] กรมพัฒนาธุรกิจการค้า. (2563). การจดทะเบียนธุรกิจ ไตรมาส 1/2563(ม.ค.-มี.ค.).

[6] กฤษณ์ หยั่งวิไล. (2548). *ส่วยกับรถบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดกฎหมายกำหนด*. รป.ม., มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี.

[7] ชัยวัฒน์ ใหญ่บก และ ปรเมศวร์ เหลือเทพ. (2558). การวิเคราะห์การจัดการจราจรของชุดทางแยกต่อเนื่อง กรณีศึกษาเทศบาลนครหาดใหญ่. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 8*. หน้า 104.

[8] เป็นหนึ่ง วานิชชัย. (2015). ปัญหารถบรรทุกสิบล้อน้ำหนักเกินพิกัดตามกฎหมาย. *ไทยเอ็นจิเนียริ่ง*.

[9] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศการขนส่งและจราจร. (2562). รายงานโครงสร้างพื้นฐานคมนาคม พ.ศ.2561. *สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งจราจร*. มิถุนายน 2562.

[10] สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ. (2557). คู่มือการจับกุมรถบรรทุกน้ำหนักเกินกว่ากฎหมายกำหนด ณ สถานีตรวจสอบน้ำหนัก. *กรมทางหลวง*.

[11] สำนักงานควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ. (2557). แนวทางการปฏิบัติงานของเจ้าพนักงานทางหลวงในการควบคุมน้ำหนักยานพาหนะ. *กรมทางหลวง*.

[12] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. (2557). การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลด้านจราจร. *โครงการจัดทำแผนพัฒนามาตรฐานด้านการจัดระบบการจราจรในเมืองภูมิภาค*. บทที่5. หน้า16.

[13] สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์. (ม.ป.ป.). *บทที่ 4 วิศวกรรมจราจร Traffic Engineering*. มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี. หน้า 129-130.