

การพัฒนาโมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของปัจจัยเสี่ยงเชิงพฤติกรรม

ในการขนส่งวัตถุอันตรายโดยใช้ข้อมูลจากระบบ ADAS และ DMS

DEVELOPMENT OF A CAUSAL RELATIONSHIP MODEL OF BEHAVIORAL RISK
FACTORS IN DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION USING ADAS AND DMS DATAณัฐวุฒิ พุ่มพุกศรี^{1*} และ มณิสรา บารมีชัย²Nattawut Pumpugsri¹ and Manisra Baramichai²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย^{1,2}School of Engineering, University of the Thai Chamber of Commerce^{1,2}Author: email : nattawut_pum@utcc.ac.th^{1*}, j.manibara@gmail.com²

Received: April 1, 2026

Revised: June 5, 2026

Accepted: June 12, 2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Driver State Warning (DSW) และ Headway Monitoring Warning (HMMW) 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Headway Monitoring Warning (HMMW) และ Forward Collision Warning (FCW) 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Forward Collision Warning (FCW) และ Pedestrian Collision Warning (PCW) และ 4) พัฒนาโมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของปัจจัยเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในการขนส่งวัตถุอันตราย โดยใช้ข้อมูลจากระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ Driver Monitoring System (DMS) และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง Advanced Driver Assistance System (ADAS) ที่ได้จากการทดลองภาคสนามบนรถบรรทุกขนาดใหญ่จำนวน 10 คัน ภายใต้สภาพการใช้งานจริง โดยกำหนดระยะทางการเก็บข้อมูลคันละ 1,000 กิโลเมตร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Driver State Warning (DSW), Headway Monitoring Warning (HMMW), Forward Collision Warning (FCW) และ Pedestrian Collision Warning (PCW) ซึ่งถูกกำหนดตามกรอบแนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยงจากสภาพของผู้ขับขี่ไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่สูงขึ้น การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบลำดับขั้นเพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและพัฒนาโมเดลที่เสนอ ผลการศึกษาพบว่าข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบไม่ปกติ โดยมีค่าความเบ้และค่าความโด่งในระดับสูง สะท้อนลักษณะของเหตุการณ์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอภายใต้สภาพการขับขี่จริง ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์พบความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง HMMW และ FCW ($p = 0.656$, $p = 0.039$) และระหว่าง FCW และ PCW ($p = 0.636$, $p = 0.048$) ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นว่า DSW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ HMMW ($\beta = 0.967$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.935$) HMMW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ FCW ($\beta = 0.971$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.942$) และ FCW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ PCW ($\beta = 0.972$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.946$) ผลลัพธ์ดังกล่าวสนับสนุนโมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่เสนอ ซึ่งอธิบายการถ่ายทอดความเสี่ยงจากสภาพของผู้ขับขี่ไปสู่พฤติกรรมที่เสี่ยงและไม่ปลอดภัย และพัฒนาไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่สูงขึ้นตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของข้อมูลจากระบบ DMS และ ADAS ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยเสี่ยงเชิงพฤติกรรม และสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองความปลอดภัย การประเมินความเสี่ยงเชิงรุก และมาตรการป้องกันอุบัติเหตุในการขนส่งวัตถุอันตรายในอนาคต

คำสำคัญ: การขนส่งวัตถุอันตราย, ระบบติดตามผู้ขับขี่ (DMS), ระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (ADAS), เทเลเมติกส์, การวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงพฤติกรรม

Abstract

This study aimed to 1) examine the relationship between Driver State Warning (DSW) and Headway Monitoring Warning (HMW), 2) investigate the relationship between Headway Monitoring Warning (HMW) and Forward Collision Warning (FCW), 3) examine the relationship between Forward Collision Warning (FCW) and Pedestrian Collision Warning (PCW), and 4) develop a causal relationship model of behavioral risk factors in dangerous goods transportation using data obtained from a Driver Monitoring System (DMS) and an Advanced Driver Assistance System (ADAS). The study was conducted through a field experiment involving 10 heavy-duty vehicles operating under real-world conditions, with each vehicle monitored over a distance of 1,000 kilometers. The variables investigated included Driver State Warning (DSW), Headway Monitoring Warning (HMW), Forward Collision Warning (FCW), and Pedestrian Collision Warning (PCW), which were structured within a conceptual framework describing the progression of risk from driver conditions to higher levels of collision risk. Data were analyzed using descriptive statistics, Spearman's rank correlation, and sequential linear regression to evaluate the relationships among variables and develop the proposed causal model.

The results indicated that all variables exhibited non-normal distributions characterized by high levels of skewness and kurtosis, reflecting the irregular occurrence of risk-related events under real-world driving conditions. Correlation analysis revealed significant positive relationships between HMW and FCW ($\rho = 0.656$, $p = 0.039$) and between FCW and PCW ($\rho = 0.636$, $p = 0.048$). Regression analysis demonstrated that DSW had a significant positive effect on HMW ($\beta = 0.967$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.935$), HMW had a significant positive effect on FCW ($\beta = 0.971$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.942$), and FCW had a significant positive effect on PCW ($\beta = 0.972$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.946$). These findings support the proposed causal relationship model, indicating that risk propagates from driver conditions to unsafe driving behaviors and subsequently to higher levels of collision risk. The study highlights the potential of DMS and ADAS data in explaining behavioral risk mechanisms and provides a foundation for the development of safety models, proactive risk assessment frameworks, and accident prevention strategies in dangerous goods transportation.

Keywords: Dangerous Goods Transportation, Driver Monitoring Systems (DMS), Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Telematics, Behavioral Risk Analysis

บทนำ

การขนส่งวัตถุอันตรายมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในระบบโลจิสติกส์สมัยใหม่ เนื่องจากเป็นกลไกสนับสนุนการผลิตภาคอุตสาหกรรม การจัดหาพลังงาน และการพัฒนาเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม ลักษณะเฉพาะของวัตถุอันตรายทำให้การขนส่งมีความเสี่ยงในระดับสูง โดยอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยของมนุษย์ และความเสียหายทางเศรษฐกิจ ดังนั้น การยกระดับความปลอดภัยในการขนส่งวัตถุอันตรายจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับ ความสนใจอย่างต่อเนื่องจากทั้งภาครัฐและภาคอุตสาหกรรม ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีเทเลเมติกส์ ระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ (Driver Monitoring Systems: DMS) และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (Advanced Driver Assistance Systems: ADAS) ได้เปิดโอกาสให้สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลการขับขี่แบบเรียลไทม์ และวิเคราะห์เหตุการณ์เฉียดอุบัติเหตุ (near-miss events) ได้อย่างเป็นระบบ เช่น การเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (Headway Monitoring Warning: HMW) การเตือนก่อนการชน (Forward Collision Warning: FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (Pedestrian Collision Warning: PCW) ซึ่งสะท้อนถึงระดับความเสี่ยงในการขับขี่ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง [1-3] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มการวิเคราะห์ตัวชี้วัดด้านความปลอดภัยในลักษณะรายตัว หรือใช้ข้อมูลอุบัติเหตุในภาพรวม โดยยังขาดการอธิบายความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างระหว่างปัจจัยความเสี่ยงเชิงพฤติกรรม โดยเฉพาะกลไกที่สภาพของผู้ขับขี่ส่งผลต่อพฤติกรรมการขับขี่ และพฤติกรรมดังกล่าวพัฒนาไปสู่ระดับความเสี่ยงที่สูงขึ้น อย่างเป็นลำดับ ช่องว่างทางองค์ความรู้ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในบริบทของการขนส่งวัตถุอันตราย ซึ่งความรุนแรงของอุบัติเหตุมีผลกระทบในวงกว้าง ในเชิงทฤษฎี แนวคิดปัจจัยมนุษย์ (Human Factors Theory) อธิบายว่าพฤติกรรมและสภาวะของผู้ขับขี่ เช่น ความเหนื่อยล้า ความเครียด และความสนใจ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความปลอดภัยในการขับขี่ โดยความผิดพลาดของมนุษย์ถือเป็นสาเหตุหลักของอุบัติเหตุบนท้องถนน [4-6] ขณะเดียวกัน แนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยง (Risk Propagation Concept) อธิบายว่าความเสี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นแบบฉับพลัน แต่เป็นกระบวนการเชิงพลวัตที่เกิดจากการสะสมและการส่งผ่านระหว่างปัจจัยต่าง ๆ จากระดับต้นน้ำไปสู่ผลลัพธ์ปลายน้ำอย่างเป็นลำดับ [7, 8] เมื่อพิจารณาร่วมกับบริบทของเทคโนโลยีสมัยใหม่ ระบบ ADAS และ DMS สามารถทำหน้าที่เป็นกลไกในการตรวจจับและสะท้อนระดับความเสี่ยงแบบเรียลไทม์ โดยสัญญาณเตือน เช่น HMW, FCW และ PCW สามารถตีความได้ว่าเป็นตัวแทนของระดับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ขับขี่เชิงข้อมูล (data-driven risk modeling) ที่ชี้ให้เห็นว่า ความเสี่ยงเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของหลายปัจจัยในลักษณะเชิงระบบ [9, 10] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (ADAS) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสามารถของเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ขับขี่กับระบบ (human-machine interaction) ซึ่งมีผลต่อการตอบสนองต่อสัญญาณเตือน งานวิจัยพบว่า การพึ่งพาระบบมากเกินไป (over-reliance) หรือการใช้งานที่ไม่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงในรูปแบบใหม่ได้ [11] ในบริบทนี้ ADAS จึงไม่ได้ถูกพิจารณาเพียงในฐานะเครื่องมือช่วยลดอุบัติเหตุ แต่สามารถตีความเป็น “ระบบตรวจจับและสะท้อนระดับความเสี่ยงเชิงพลวัต” (dynamic risk sensing system) ซึ่งสะท้อนระดับความเสี่ยงผ่านลำดับของสัญญาณเตือน ได้แก่ การเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) การเตือนก่อนการชน (FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW) ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มระดับของความเสี่ยงอย่างเป็นลำดับ

ในขณะเดียวกัน ระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ (Driver Monitoring Systems: DMS) มีบทบาทสำคัญในการประเมิน “สภาวะของผู้ขับขี่” (driver state) ผ่านข้อมูลเชิงพฤติกรรมและสรีรวิทยาแบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ เช่น กล้องอินฟราเรด เรดาร์ และเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความเหนื่อยล้า การละสายตา และการเสียสมาธิ [12] งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบ DMS สามารถตรวจจับตัวชี้วัดที่สะท้อนระดับความตื่นตัวและความสนใจของผู้ขับขี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีบทบาทสำคัญในการลดความเสี่ยงจาก human error ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของอุบัติเหตุ

บนท้องถนน [3] นอกจากนี้ ทฤษฎีพฤติกรรมผู้ขับขี่และการตรวจจับพฤติกรรมเสี่ยง (Risky Driving Behavior Theory) อธิบายว่าพฤติกรรมที่ขับขี่ที่ไม่ปลอดภัยเกิดจากปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยด้านมนุษย์ สภาพแวดล้อม และบริบทของการขับขี่ โดยปัจจัยด้านมนุษย์ เช่น ความเหนื่อยล้า ความเครียด และภาระทางปัญญา มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความน่าจะเป็นของพฤติกรรมเสี่ยง เช่น การขับรถใกล้คันหน้าเกินไป และการตอบสนองต่อเหตุการณ์ล่าช้า [13] แนวคิดดังกล่าวได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยที่ใช้ข้อมูลจากระบบ ADAS และ DMS ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำข้อมูลเหตุการณ์มาใช้ในการตรวจจับพฤติกรรมเสี่ยงและพัฒนาแบบจำลองการคาดการณ์ความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] เมื่อบูรณาการแนวคิดดังกล่าวเข้าด้วยกัน ความเสี่ยงในการขับขี่สามารถอธิบายในลักษณะของกระบวนการเชิงลำดับ (risk escalation process) ซึ่งเริ่มต้นจากสภาพของผู้ขับขี่ และพัฒนาไปสู่พฤติกรรมที่ขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย ก่อนจะสะท้อนผ่านสัญญาณเตือนจากระบบ ADAS ในระดับที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โครงสร้างดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ (sequential risk propagation) และเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองเชิงโครงสร้างของการศึกษานี้เพื่อให้ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาสะท้อนบริบทการขนส่งวัตถุอันตรายจริง งานวิจัยนี้เลือกใช้รถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้ในการขนส่งวัตถุอันตรายจำนวน 10 คัน ซึ่งได้รับการติดตั้งระบบ DMS และ ADAS อย่างสมบูรณ์ และมีการปฏิบัติงานขนส่งจริงอย่างต่อเนื่อง การเลือกกลุ่มตัวอย่างดังกล่าวเป็นการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลเหตุการณ์ด้านความปลอดภัยที่เกิดขึ้นจริงจากการปฏิบัติงานภาคสนามได้อย่างต่อเนื่องและมีคุณภาพ โดยกำหนดให้รถทุกคันมีระยะทางการเก็บข้อมูลเท่ากันที่ 1,000 กิโลเมตร เพื่อควบคุมความแตกต่างด้านระยะทางการเดินทางและลดอคติที่อาจเกิดขึ้นจากปริมาณการใช้งานที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ได้ข้อมูลครอบคลุมระยะทางรวม 10,000 กิโลเมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์รูปแบบเหตุการณ์เตือนและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรภายใต้สภาพการใช้งานจริง เส้นทางที่ใช้ในการเก็บข้อมูลครอบคลุมเส้นทางขนส่งวัตถุอันตรายจริง ซึ่งประกอบด้วยทางหลวงสายหลักระหว่างจังหวัด พื้นที่อุตสาหกรรม และเส้นทางเชื่อมต่อคลังสินค้าและศูนย์กระจายสินค้า โดยมีลักษณะทางกายภาพและสภาพการจราจรที่หลากหลาย ทั้งช่วงการเดินทางระยะไกล การจราจรหนาแน่น และพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ การเลือกพื้นที่ศึกษาในลักษณะดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้อมูลที่รวบรวมได้สามารถสะท้อนพฤติกรรมที่ขับขี่และเหตุการณ์ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นภายใต้สภาพการดำเนินงานจริงของการขนส่งวัตถุอันตราย และเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่พัฒนาขึ้นในการอธิบายกลไกการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในบริบทการขนส่งจริง

ภายใต้กรอบแนวคิดดังกล่าว ความเสี่ยงในการขับขี่สามารถอธิบายในลักษณะของโครงสร้างเชิงลำดับ (sequential risk structure) ซึ่งเริ่มต้นจากสภาพของผู้ขับขี่ (Driver State Warning: DSW) และพัฒนาไปสู่พฤติกรรมที่ขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย ซึ่งแสดงผ่านการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (Headway Monitoring Warning: HMW) จากนั้นความเสี่ยงจะเพิ่มระดับไปสู่การเตือนก่อนการชน (Forward Collision Warning: FCW) และสุดท้ายไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับสูง ซึ่งแสดงผ่านการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (Pedestrian Collision Warning: PCW) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้ขับขี่ภายใต้ระบบ ADAS และการประเมินความเสี่ยงเชิงพลวัตในระบบยานยนต์อัจฉริยะ [15] ซึ่งแสดงผ่านการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (Pedestrian Collision Warning: PCW) เพื่อตอบสนองต่อช่องว่างทางองค์ความรู้ดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงลำดับของปัจจัยความเสี่ยงเชิงพฤติกรรม โดยใช้ข้อมูลการขับขี่จริงจากการทดลองภาคสนามบนรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้ในการขนส่งวัตถุอันตราย ซึ่งมีการติดตั้งระบบ DMS และ ADAS โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง DSW, HMW, FCW และ PCW เพื่อพัฒนาแบบจำลองการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ (Sequential Risk Propagation Model) และสนับสนุนการพัฒนาแบบประเมินความเสี่ยงเชิงข้อมูลสำหรับการขนส่งวัตถุอันตรายในบริบทจริง กรอบแนวคิดการวิจัยของการศึกษานี้

แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสะท้อนโครงสร้างความสัมพันธ์เชิงลำดับของตัวแปรภายใต้แนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยง โดยมีสมมติฐานการวิจัยดังนี้

H1: สภาพของผู้ขับขี่ (DSW) มีอิทธิพลเชิงบวกต่อการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW)

H2: การเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) มีอิทธิพลเชิงบวกต่อการเตือนก่อนการชน (FCW)

H3: การเตือนก่อนการชน (FCW) มีอิทธิพลเชิงบวกต่อการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW)



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัยของการศึกษา

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และอิทธิพลของ DSW ต่อ HMW
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และอิทธิพลของ HMW ต่อ FCW
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และอิทธิพลของ FCW ต่อ PCW
4. เพื่อพัฒนาโมเดลความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของปัจจัยเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในการขนส่งวัตถุอันตราย

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้การทดลองภาคสนาม (Field Experiment) ภายใต้สภาพการใช้งานจริง (Naturalistic Driving Conditions) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงลำดับของปัจจัยความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในการขนส่งวัตถุอันตราย ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์ (Event-Based Data) ที่เก็บรวบรวมในช่วงวันที่ 1-31 มีนาคม พ.ศ. 2569 จากระบบรถบรรทุกขนาดใหญ่จำนวน 10 คัน ที่ใช้ในการขนส่งวัตถุอันตรายประเภทน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ภายใต้สภาพการปฏิบัติงานจริง โดยกำหนดระยะทางการเก็บข้อมูลคันละ 1,000 กิโลเมตร รวมระยะทางสะสมทั้งสิ้น 10,000 กิโลเมตร ข้อมูลการขับขี่ถูกเก็บรวบรวมผ่านระบบ Mobile DVR รุ่น Smart Eye Pro ซึ่งเป็นระบบบูรณาการระหว่างระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ (Driver Monitoring System: DMS) และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (Advanced Driver Assistance System: ADAS) โดยระบบ DMS ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับกล้องอินฟราเรดในการตรวจจับสถานะของผู้ขับขี่ เช่น การง่วงนอน (Drowsiness Warning) การหาว (Yawn Warning) และการละสายตาจากเส้นทาง (Distracted Driving Warning: DDW) ซึ่งถูกนำมาประมวลผลเป็นตัวแปร Driver State Warning (DSW) ขณะที่ระบบ ADAS ใช้กล้องวิเคราะห์ภาพด้านหน้ารถเพื่อตรวจจับเหตุการณ์ด้านความปลอดภัย ได้แก่ การเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (Headway Monitoring Warning: HMW) การเตือนก่อนการชน (Forward Collision Warning: FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (Pedestrian Collision Warning: PCW) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

การวิจัยมุ่งเน้นการวิเคราะห์กลไกการถ่ายทอดความเสี่ยงในลักษณะเชิงลำดับ (Sequential Risk Propagation Mechanism) โดยกำหนดกรอบแนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร DSW, HMW, FCW และ PCW ข้อมูลที่เก็บรวบรวมถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS Version 26 โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่ออธิบายลักษณะ

การกระจายของข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) เพื่อประเมินรูปแบบการกระจายของตัวแปร จากนั้นใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's Rank Correlation) เนื่องจากข้อมูลเหตุการณ์จากระบบ DMS และ ADAS มีลักษณะเป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไม่บ่อย (Rare Events) ส่งผลให้ตัวแปรบางตัวมีการกระจายแบบไม่ปกติและมีค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) ในระดับสูง ดังนั้น การศึกษาจึงเลือกใช้การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's Rank Correlation) ซึ่งไม่อาศัยสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผู้วิจัยใช้เพื่อประเมินความสัมพันธ์เชิงทิศทางระหว่างตัวแปรตามกรอบแนวคิดการวิจัย และได้ตรวจสอบความสอดคล้องของผลลัพธ์ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าความมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ ไม่มีการแปลงข้อมูล (Data Transformation) เนื่องจากต้องการคงลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงจากระบบตรวจจับความผิดปกติ และเพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนสภาพการดำเนินงานจริงมากที่สุด และใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงทิศทางระหว่างตัวแปรในแบบจำลอง โดยรายงานค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐาน (β) ค่า p-value และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ซึ่งใช้ในการประเมินสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในแต่ละสมการ

1. กลุ่มตัวอย่างและการเก็บข้อมูล

กลุ่มตัวอย่างของการศึกษานี้ประกอบด้วยรถบรรทุกขนาดใหญ่จำนวน 10 คันที่ใช้ในการขนส่งวัตถุดิบ โดยแต่ละคันดำเนินการขับขี่ภายใต้สภาพการใช้งานจริง (naturalistic driving conditions) โดยเก็บข้อมูลระยะทาง⁽¹⁾มาตรฐาน 1,000 กิโลเมตรต่อคัน การกำหนดระยะทางการวิ่งให้เท่ากันในทุกคัน (equal exposure design) ช่วยให้ข้อมูลมีความสมดุล (balanced dataset) และลดความเอนเอียงจากความแตกต่างของระยะทางระหว่างยานพาหนะ ส่งผลให้สามารถเปรียบเทียบความถี่ของเหตุการณ์เตือนด้านความปลอดภัยระหว่างรถแต่ละคันได้อย่างมีนัยสำคัญเชิงวิเคราะห์ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมเป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์ (event-based data) ซึ่งได้จากระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ (DMS) และระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (ADAS) โดยครอบคลุมเหตุการณ์สำคัญ ได้แก่ การเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) การเตือนก่อนการชน (FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW) รวมถึงข้อมูลสภาพผู้ขับขี่ (DSW) ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงลำดับของความถี่ตามกรอบแบบจำลองการวิจัย โดยกำหนดให้ค่าระยะทางของแต่ละยานพาหนะสามารถนิยามในรูปสมการได้ดังนี้

$$d_i = 1,000 \text{ km}; i = 1, 2, \dots, 10 \quad (1)$$

โดยที่ d_i แทนระยะทางของยานพาหนะคันที่ i

ดังนั้น ระยะทางสะสมรวมของการเก็บข้อมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$D_{total} = \sum_{i=1}^{10} d_i = 10,000 \text{ km} \quad (2)$$

การออกแบบดังกล่าวช่วยให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างยานพาหนะได้อย่างเป็นธรรม และลดความเอนเอียงจากความแตกต่างของระยะทางในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเหตุการณ์

2. ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา (Variables)

การวิจัยนี้กำหนดตัวแปรภายใต้กรอบแนวคิดเชิงลำดับของความเสียหาย (sequential risk propagation framework) โดยจัดโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรตามลำดับเหตุ-ผลอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย ตัวแปรอิสระ ได้แก่ สภาพของผู้ขับขี่ (Driver State Warning: DSW) ซึ่งสะท้อนระดับความพร้อมและความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ตัวแปรกึ่งกลาง (mediating variables) ได้แก่ พฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัยซึ่งแสดงผ่านการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (Headway Monitoring Warning: HMW) และสัญญาณเตือนการชนล่วงหน้า (Forward Collision Warning: FCW) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทนของการเพิ่มระดับความเสี่ยงในระหว่างกระบวนการ และตัวแปรตาม ได้แก่ ความเสี่ยงของการชนในระดับสูง ซึ่งแสดงผ่านการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (Pedestrian Collision Warning: PCW) โดยตัวแปรทั้งหมดถูกนิยามในลักษณะของข้อมูลเชิงเหตุการณ์ (event-based indicators) ที่ได้จากระบบ ADAS และ DMS ในสภาพการขับขี่จริง ทำให้สามารถสะท้อนพลวัตของความเสียหายและตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงลำดับของตัวแปรได้อย่างเป็นรูปธรรมในบริบทของการชนส่งวัตถุนัตถาย

3. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

3.1 สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ถูกนำมาใช้ในขั้นต้นเพื่ออธิบายลักษณะพื้นฐานและรูปแบบการกระจายของตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยสภาพของผู้ขับขี่ (DSW) พฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย (HMW) สัญญาณเตือนการชนล่วงหน้า (FCW) และความเสี่ยงของการชนในระดับสูง (PCW) โดยค่าสถิติที่ใช้ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อสะท้อนแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางและความแปรปรวนของข้อมูล รวมถึงค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) เพื่อประเมินลักษณะการกระจายของข้อมูลและตรวจสอบความเป็นปกติของตัวแปร ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรส่วนใหญ่มีการกระจายแบบไม่เป็นปกติ โดยมีค่าความเบ้เชิงบวกและค่าความโด่งในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของข้อมูลเชิงเหตุการณ์ที่มีการเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงในระดับสูงแบบเป็นช่วง (sporadic high-risk events) และมีการกระจุกตัวของเหตุการณ์ในบางช่วงเวลา ลักษณะดังกล่าวมีความสอดคล้องกับบริบทของข้อมูลการขับขี่จริง (real-world driving data) และเป็นเหตุผลสนับสนุนการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบไม่อาศัยพารามิเตอร์ (non-parametric methods) ในขั้นตอนถัดไปของการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเหมาะสม

3.2 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ในการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการโดยใช้สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's rank correlation) เนื่องจากตัวแปรมีลักษณะการกระจายแบบไม่เป็นปกติและเป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์ (event-based data) ที่มีความเบ้และความโด่งในระดับสูง วิธีการดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการประเมินความสัมพันธ์เชิงอันดับ (monotonic relationship) ระหว่างตัวแปรโดยไม่ต้องอาศัยสมมติฐานการกระจายแบบปกติของข้อมูล โดยการวิเคราะห์ครอบคลุมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักในแบบจำลอง ได้แก่ สภาพของผู้ขับขี่ (DSW) พฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย (HMW) สัญญาณเตือนการชนล่วงหน้า (FCW) และความเสี่ยงของการชนในระดับสูง (PCW) ผลการวิเคราะห์รายงานในรูปของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ρ) และระดับนัยสำคัญทางสถิติ (p-value) เพื่อประเมินทั้งทิศทางและความแข็งแกร่งของความสัมพันธ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญระหว่างตัวแปรในแต่ละลำดับ ซึ่งสนับสนุนแนวคิดของโครงสร้างความเสี่ยงเชิงลำดับ (sequential risk structure) ที่ความเสี่ยงมีการถ่ายทอดและเพิ่มระดับอย่างต่อเนื่องจากพฤติกรรมผู้ขับขี่ไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่สูงขึ้นอย่างเป็นระบบ

3.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ในการศึกษาที่ใช้การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression) ภายใต้กรอบการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น (sequential regression modeling) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์เชิงทิศทางระหว่างตัวแปรตามลำดับของแบบจำลองการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ โดยกำหนดให้สภาพของผู้ขับขี่ (DSW) เป็นตัวแปรอิสระที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัยซึ่งแสดงผ่านการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) ในขั้นแรก จากนั้นพฤติกรรมการขับขี่ดังกล่าวถูกใช้เป็นตัวแปรอิสระในการอธิบายสัญญาณเตือนการชนล่วงหน้า (FCW) ในขั้นถัดไป และในขั้นสุดท้าย สัญญาณเตือนการชนล่วงหน้าถูกใช้ในการอธิบายความเสี่ยงของการชนในระดับสูง ซึ่งแสดงผ่านการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW) โดยรายงานค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐาน (β) ค่า p-value และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เพื่อประเมินทั้งทิศทาง ความมีนัยสำคัญทางสถิติ และความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามในแต่ละขั้น ทั้งนี้ การวิเคราะห์มุ่งเน้นการตรวจสอบความต่อเนื่องของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในแต่ละระดับ เพื่อยืนยันว่ากลไกการเพิ่มระดับของความเสี่ยงมีลักษณะเป็นกระบวนการเชิงลำดับอย่างเป็นระบบในบริบทของการชนส่งวัตถุนัตถาย

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา

ตารางที่ 1 ค่าสถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรด้านพฤติกรรมการขับขี่และความเสี่ยงจากระบบ ADAS และ DMS

Variable	Mean	Median	SD	IQR	Skewness	Kurtosis
HMW	143.1	52	246.64	134	2.803	8.267
FCW	9.4	4	19.07	7	3.019	9.334
PCW	29.9	13	54.55	12	3.076	9.602
DDW	107.2	77.5	88.55	111	1.641	3.244
DSW	0.1	0	0.316	0	3.162	10
Yawn	2.8	2	3.23	3	2.113	5.104
Drowsiness	1.3	0	2.21	3	1.447	0.837

จากตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาแสดงให้เห็นว่าตัวแปรส่วนใหญ่มีลักษณะการกระจายแบบไม่เป็นปกติ (non-normal distribution) โดยมีค่าความเบ้เชิงบวกในระดับสูง (Skewness > 1) ในตัวแปรส่วนใหญ่ ซึ่งสะท้อนว่าการกระจายของข้อมูลมีค่ามากกระจุกตัวอยู่ทางด้านขวา โดยเฉพาะตัวแปร HMW (Skewness = 2.803), FCW (Skewness = 3.019) และ PCW (Skewness = 3.076) ที่มีค่าความเบ้สูงกว่า 2 อย่างชัดเจน แสดงถึงการเกิดเหตุการณ์ค่ามากในลักษณะไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ค่าความโด่ง (Kurtosis) ของตัวแปร HMW (8.267), FCW (9.334) และ PCW (9.602) มีค่าสูงกว่า 8 ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของข้อมูลที่มีหางหนา (heavy-tailed distribution) และมีการกระจุกตัวของเหตุการณ์ความเสี่ยงในบางช่วงเวลา ขณะที่ตัวแปร DDW มีค่าความเบ้และความโด่งในระดับปานกลาง (Skewness = 1.641, Kurtosis = 3.244) แสดงถึงการกระจายของข้อมูลที่มีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นเมื่อพิจารณาค่าพิสัยระหว่างควอไทล์

(Interquartile Range: IQR) พบว่าตัวแปร HMW (IQR = 134) และ DDW (IQR = 111) มีความแปรปรวนของข้อมูลในระดับสูง ซึ่งสะท้อนถึงความผันผวนของพฤติกรรมการขับขี่ในสภาพการใช้งานจริง ขณะที่ตัวแปร DSW มีค่า IQR เท่ากับ 0 และค่ามัธยฐานเท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นไม่บ่อย แต่มีความสำคัญในฐานะตัวชี้วัดความเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในระดับต้นน้ำโดยรวม ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวยืนยันว่าข้อมูลมีลักษณะการกระจายแบบไม่เป็นปกติอย่างชัดเจน และมีลักษณะการเกิดเหตุการณ์ในรูปแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับธรรมชาติของข้อมูลเชิงเหตุการณ์จากระบบ ADAS และ DMS และสนับสนุนการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบไม่อาศัยพารามิเตอร์ในขั้นตอนถัดไปของการศึกษา

2. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมนระหว่างตัวแปรความเสี่ยงจากระบบ ADAS และ DMS

Variable Pair	ρ (rho)	p-value
HMW and FCW	0.656	0.039
FCW and PCW	0.636	0.048

Note: ρ = Spearman's coefficient; $p < 0.05$ indicates significance.

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's rank correlation) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตัวแปรในแบบจำลอง โดยพบว่าการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญกับการเตือนก่อนการชน (FCW) ในระดับค่อนข้างสูง ($\rho = 0.656$, $p = 0.039$) นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเตือนก่อนการชน (FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW) ($\rho = 0.636$, $p = 0.048$) ซึ่งสะท้อนถึงความเชื่อมโยงของตัวชี้วัดความเสี่ยงในระดับกลางไปสู่ตัวชี้วัดความเสี่ยงในระดับที่สูงขึ้น โดยรวม ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดของโครงสร้างความเสี่ยงเชิงลำดับ (sequential risk structure) ซึ่งตัวแปรในแต่ละระดับมีความสัมพันธ์กันในลักษณะต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ที่พบเป็นเพียงความสัมพันธ์เชิงสถิติ (association) และไม่สามารถตีความเป็นความสัมพันธ์เชิงเหตุและผล (causality) ได้โดยตรง

3. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของแบบจำลองการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ

Model	Path	β	t-value	p-value	R ²
Model 1	DSW $\rightarrow$ HMW	0.967	10.763	<0.001	0.935
Model 2	HMW $\rightarrow$ FCW	0.971	11.439	<0.001	0.942
Model 3	FCW $\rightarrow$ PCW	0.972	11.79	<0.001	0.946

Note: β = standardized regression coefficient; R² = coefficient of determination.

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่า DSW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ HMW อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.967$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.935$) แสดงให้เห็นว่าสภาพของผู้ขับขี่ที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้าได้ร้อยละ 93.5 สะท้อนให้เห็นว่าสถานะของผู้ขับขี่ เช่น ความง่วงนอน การหาว และการละสายตาจากเส้นทาง มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับพฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย นอกจากนี้ HMW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ FCW อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.971$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.942$) โดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของการเตือนก่อนการชนได้ร้อยละ 94.2 แสดงให้เห็นว่าการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้าในระดับที่ไม่ปลอดภัยมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเสี่ยงของการเกิดเหตุการณ์เฉียดการชนด้านหน้า และ FCW มีอิทธิพลเชิงบวกต่อ PCW อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.972$, $p < 0.001$, $R^2 = 0.946$) โดยสามารถอธิบายความแปรปรวนของการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวางได้ร้อยละ 94.6 สะท้อนให้เห็นว่าความเสี่ยงจากเหตุการณ์เฉียดการชนด้านหน้ามีแนวโน้มพัฒนาไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่สูงขึ้นตามลำดับ ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ (Sequential Risk Propagation) ซึ่งอธิบายว่าความเสี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน แต่มีการพัฒนาและส่งต่อระหว่างปัจจัยความเสี่ยงในแต่ละระดับอย่างต่อเนื่อง

สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาทำให้หลักฐานเชิงประจักษ์ที่สำคัญเกี่ยวกับโครงสร้างความเสี่ยงเชิงลำดับ (sequential risk propagation) ในบริบทของการขนส่งวัตถุอันตราย โดยพบว่าความเสี่ยงไม่ได้เกิดขึ้นแบบฉับพลัน แต่เป็นกระบวนการที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องจากสภาพของผู้ขับขี่ไปสู่พฤติกรรมการขับขี่ และนำไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่สูงขึ้นตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับกรอบแนวคิดด้านปัจจัยมนุษย์ (Human Factors) ซึ่งอธิบายว่าสภาพของผู้ขับขี่ เช่น ความเหนื่อยล้าและการลดลงของความตื่นตัว สามารถส่งผลต่อพฤติกรรมการขับขี่และเพิ่มโอกาสในการเกิดเหตุการณ์เสี่ยงได้ ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญระหว่างตัวแปรในแต่ละระดับของแบบจำลอง กล่าวคือ สภาพของผู้ขับขี่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย ซึ่งสะท้อนผ่านการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า ขณะเดียวกัน พฤติกรรมการขับขี่ดังกล่าวมีความเชื่อมโยงต่อเนื่องไปยังการเตือนก่อนการชน และนำไปสู่ความเสี่ยงของการชนในระดับที่รุนแรงขึ้น ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงกระบวนการเพิ่มระดับของความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับแนวคิดของการถ่ายทอดความเสี่ยง (risk propagation) ที่มองว่าความเสี่ยงเป็นกระบวนการที่พัฒนาและส่งต่อระหว่างตัวแปรในลักษณะเชิงพลวัต ในมุมมองของเทคโนโลยี ระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (ADAS) และระบบตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ (DMS) สามารถทำหน้าที่เป็นกลไกในการตรวจจับและสะท้อนระดับของความเสี่ยงในแต่ละช่วงของกระบวนการ โดยเหตุการณ์เตือนในแต่ละประเภท เช่น การเตือนการเว้นระยะห่าง การเตือนก่อนการชน และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง สามารถตีความได้ว่าเป็นตัวชี้วัดของระดับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยด้าน Driver Monitoring Systems (DMS) และ Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) หลายฉบับที่รายงานว่าความเหนื่อยล้า การละสายตาจากเส้นทาง และการเสียสมาธิของผู้ขับขี่ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพในการรับรู้สถานการณ์และการตัดสินใจขณะขับขี่ งานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าพฤติกรรมดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการลดระยะห่างที่ปลอดภัย การตอบสนองต่อเหตุการณ์ล่าช้า และการเพิ่มโอกาสเกิดเหตุการณ์เฉียดการชน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาครั้งนี้ที่พบว่าสภาพของผู้ขับขี่ (DSW) มีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อการเตือนการเว้นระยะห่างจากรถคันหน้า (HMW) และส่งผลต่อเนื่องไปยังการเตือนก่อนการชน (FCW) และการเตือนการชนกับคนหรือสิ่งกีดขวาง (PCW) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบย่อยของตัวแปร Driver State Warning (DSW) พบว่าประกอบด้วยเหตุการณ์การละสายตาจากเส้นทาง (Distracted Driving Warning: DDW) การหาว (Yawn Warning) และการง่วงนอน (Drowsiness

Warning) ซึ่งล้วนเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการลดลงของระดับความตื่นตัวของผู้ขับขี่ โดยเฉพาะการง่วงนอนและการหาที่หลับ การยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นสัญญาณเริ่มต้นของความเหนื่อยล้าขณะขับขี่ ขณะที่การละสายตาจากเส้นทางสะท้อนถึงภาวะเสียสมาธิหรือภาระทางปัญญาที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สนับสนุนแนวคิดที่ว่าปัจจัยเหล่านี้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเพิ่มระดับความเสี่ยง และสามารถนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงรุกในการเฝ้าระวังความปลอดภัยก่อนที่จะพัฒนาไปสู่เหตุการณ์ด้านการชนในระดับที่รุนแรงยิ่งขึ้น การตีความในลักษณะนี้ช่วยขยายบทบาทของ ADAS จากเครื่องมือป้องกันอุบัติเหตุไปสู่การเป็นระบบติดตามและวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงโครงสร้าง

อีกประเด็นสำคัญคือค่าความสามารถในการอธิบายของแบบจำลอง (R^2) ที่อยู่ในระดับสูงในทุกสมการ ซึ่งสะท้อนถึงความเชื่อมโยงของตัวแปรในแบบจำลองอย่างใกล้ชิด ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะของข้อมูลที่เป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์ (event-based data) ที่ได้จากระบบตรวจจับเดียวกันภายใต้บริบทการขับขี่จริง ประกอบกับการออกแบบการเก็บข้อมูลแบบระยะทางเท่ากันในทุกยานพาหนะ ซึ่งช่วยลดความแปรปรวนจากปัจจัยภายนอกและทำให้ข้อมูลมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า R^2 ที่สูงควรได้รับการตีความอย่างระมัดระวัง เนื่องจากอาจสะท้อนทั้งความสัมพันธ์เชิงพฤติกรรมที่แท้จริงและลักษณะของแหล่งข้อมูลที่ร่วมกันในเชิงปฏิบัติ ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการพัฒนาระบบบริหารความปลอดภัยในการขนส่งวัตถุอันตราย โดยสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบติดตามความเสี่ยงแบบลำดับขั้น ซึ่งช่วยให้สามารถระบุและจัดการความเสี่ยงตั้งแต่ระยะเริ่มต้นก่อนที่จะพัฒนาไปสู่เหตุการณ์ที่รุนแรงมากขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบเตือนภัยอัจฉริยะ การวิเคราะห์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการกำหนดมาตรการป้องกันเชิงรุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุป ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงสาเหตุเบื้องต้นของปัจจัยเสี่ยงเชิงพฤติกรรมในการขนส่งวัตถุอันตราย ภายใต้กรอบแนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ ซึ่งอธิบายว่าความเสี่ยงเริ่มต้นจากสถานะของผู้ขับขี่ ก่อนจะพัฒนาไปสู่พฤติกรรมขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย และเพิ่มระดับเป็นความเสี่ยงของการชนในลำดับถัดไป แม้ว่าการศึกษานี้จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบลำดับขั้นในการอธิบายความสัมพันธ์เชิงทิศทางระหว่างตัวแปร แต่ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของข้อมูลจากระบบ ADAS และ DMS ในการใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงสาเหตุและระบบบริหารความเสี่ยงเชิงรุกในการขนส่งวัตถุอันตรายในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้ใช้กลุ่มตัวอย่างรถบรรทุกทุกขนาดใหญ่อายุ 10 คัน ซึ่งแม้จะครอบคลุมผู้ประกอบการหลายรายและการขนส่งวัตถุอันตรายหลายประเภท แต่อาจมีข้อจำกัดด้านความสามารถในการสรุปผลไปยังประชากรยานพาหนะทั้งหมด ดังนั้น การวิจัยในอนาคตควรเพิ่มขนาดกลุ่มตัวอย่าง และขยายขอบเขตการศึกษาให้ครอบคลุมประเภทยานพาหนะ เส้นทางขนส่ง และประเภทวัตถุอันตรายที่หลากหลายมากขึ้น
2. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลเชิงเหตุการณ์จากระบบ DMS และ ADAS ซึ่งเป็นระบบตรวจจับที่ทำงานร่วมกัน อาจส่งผลให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในระดับสูง ดังนั้น การวิจัยในอนาคตควรบูรณาการข้อมูลจากแหล่งอื่นเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลอุบัติเหตุ ข้อมูลสภาพถนน ข้อมูลสภาพอากาศ หรือข้อมูลจากระบบ GPS Tracking เพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ของแบบจำลองและลดข้อจำกัดจากการใช้ข้อมูลจากแหล่งเดียว
3. แม้ว่าผลการศึกษานี้จะสนับสนุนแนวคิดการถ่ายทอดความเสี่ยงเชิงลำดับ (Sequential Risk Propagation) แต่การวิเคราะห์ในครั้งนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปร จึงยังไม่สามารถยืนยันความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลได้โดยตรง ดังนั้น ควรมีการพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) เพื่อยืนยันโครงสร้างเชิงสาเหตุของปัจจัยความเสี่ยงได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

4. ควรพัฒนาแบบจำลองสมการโครงสร้าง (SEM) โดยบูรณาการผลการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกรอบ Dangerous Goods Transport Safety Model (DGTSM) ซึ่งประกอบด้วย 4 มิติหลัก ได้แก่ Regulatory Compliance and Traffic Safety (RCTS), Vehicle Maintenance and Control Systems (VMCS), Road Environment and Infrastructure (REI) และ Fatigue Management and Driver Behavior (FMDB) โดยกำหนดให้ตัวแปร Driver State Warning (DSW), Headway Monitoring Warning (HMW), Forward Collision Warning (FCW) และ Pedestrian Collision Warning (PCW) เป็นตัวชี้วัดภายใต้มิติ FMDB เพื่อยกระดับการวิเคราะห์จากความสัมพันธ์เชิงพฤติกรรมไปสู่การอธิบายโครงสร้างความปลอดภัยของการขนส่งวัตถุอันตรายในภาพรวม

5. เนื่องจากการเก็บข้อมูลดำเนินการภายใต้สภาพการใช้งานจริงในช่วงเวลาและพื้นที่ศึกษาที่กำหนด การวิจัยในอนาคตควรขยายการศึกษาให้ครอบคลุมสภาพถนน สภาพจราจร และสภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการประยุกต์ใช้แบบจำลองในบริบทที่แตกต่างกัน

6. ในเชิงปฏิบัติ ผู้ประกอบการขนส่งวัตถุอันตรายควรนำข้อมูลจากระบบ Driver Monitoring System (DMS) และ Advanced Driver Assistance System (ADAS) มาใช้เป็นเครื่องมือเฝ้าระวังความเสี่ยงเชิงรุก โดยเฉพาะข้อมูลการรบกวนการหาว การละสายตาจากเส้นทาง และเหตุการณ์เตือนด้านความปลอดภัย เช่น HMW, FCW และ PCW เพื่อสนับสนุนการติดตามพฤติกรรมผู้ขับขี่แบบเรียลไทม์ การคัดกรองผู้ขับขี่ที่มีความเสี่ยงสูง และการป้องกันอุบัติเหตุก่อนเกิดเหตุ

7. หน่วยงานกำกับดูแลและผู้ประกอบการควรนำผลการศึกษาไปใช้ในการกำหนดนโยบาย มาตรการด้านความปลอดภัย และการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมผู้ขับขี่ รวมถึงส่งเสริมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี DMS และ ADAS ร่วมกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อพัฒนาระบบประเมินความเสี่ยงและระบบแจ้งเตือนล่วงหน้าสำหรับการบริหารจัดการความปลอดภัยในการขนส่งวัตถุอันตรายอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Costa, S. Innamaa, and F. Malin, "Safety impact of advanced driver assistance systems in Europe in 2030," *Journal of Safety Research*, vol. 95, pp. 290–300, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.jsr.2025.10.008.
- [2] M. Aleksa, A. Schaub, I. Erdelean, S. Wittmann, A. Soteropoulos, and A. Furdös, "Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials," *European Transport Research Review*, vol. 16, art. no. 39, 2024, doi: 10.1186/s12544-024-00654-0.
- [3] N. Pumpugsri, W. Rattanawong, and V. Vongmanee, "Applying GIS Analytics and ADAS with DMS to Assessment Heavy-Duty Vehicles Unsafe Acts and Unsafe Conditions in Thailand," in *Proc. 2023 27th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, Chiang Rai, Thailand, Sept. 2023, pp. 434–439, doi: 10.1109/ICSEC59635.2023.10329638.
- [4] T. Garefalakis, E. Michelaraki, S. Roussou, M. Kourtesis, A. Chrysanthou, and C. Antoniou, "Predicting risky driving behavior with classification algorithms: Results from a large-scale field-trial and simulator experiment," *European Transport Research Review*, vol. 16, art. no. 65, 2024, doi: 10.1186/s12544-024-00691-9.

-
- [5] Y. Zhang, "Analysis of Psychological Factors Affecting Drivers' Driving Safety and Countermeasures," *Lecture Notes in Education, Arts, Management and Social Science*, vol. 3, no. 6, 2025, doi: 10.18063/lne.v3i6.1133.
- [6] N. Vasta and F. Biondi, "Effect of Partially Automated Driving on Mental Workload, Visual Behavior and Engagement in Nondriving-Related Tasks: A Meta-Analysis," *Human Factors*, vol. 67, no. 9, pp. 962–991, Mar. 2025, doi: 10.1177/00187208251323132.
- [7] N. Pumpugsri, W. Rattanawong, and V. Vongmanee, "Development of a Safety Heavy-Duty Vehicle Model Considering Unsafe Acts, Unsafe Conditions and Near-Miss Events Using Structural Equation Model," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, art. no. 12150, 2023, doi: 10.3390/su151612150.
- [8] N. Pumpugsri, W. Rattanawong, and V. Vongmanee, "Path Analysis Model of Heavy-Duty Vehicle Safety for Road Environment Improvement and Accidents Prevention," *Journal of Logistics and Supply Chain Operations (JLSCO)*, vol. 11, no. 1, pp. 121–138, 2025, doi:10.53848/jlsco.v11i1.271296.
- [9] Y. Chen, Y. Xie, C. Wang, L. Yang, N. Zheng, and L. Wu, "Time-dependent effect of advanced driver assistance systems on driver behavior based on connected vehicle data," *Analytic Methods in Accident Research*, vol. 45, art. no. 100370, 2025, doi: 10.1016/j.amar.2025.100370.
- [10] L. Ferreira, A. Valente, P. Salgado, et al., "Advances on risky driver behaviour detection in road vehicles: A systematic literature review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 59, art. no. 93, 2026, doi: 10.1007/s10462-026-11492-y.
- [11] F. N. Biondi and B. Balakumar, "Human factors of automated driving systems: A compendium of lessons learned," *International Journal of Human Factors and Ergonomics*, vol. 8, no. 2, pp. 183–194, 2021, doi: 10.1504/IJHFE.2021.116066.
- [12] A. Rahman, F. Barber, M. Lovric, R. Woodman, and V. Donzella, "Driver Monitoring Systems: Advances, Challenges, and Future Directions in Noncontact Sensor Technologies: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 3540–3557, Feb. 2026, doi: 10.1109/JSEN.2025.3646923.
- [13] F. Chen and J. Terken, "Human Factors of Automated Driving," in *Automotive Interaction Design, Springer Tracts in Mechanical Engineering*, A. Riener and M. Jeon, Eds. Singapore: Springer, 2023, pp. 273–307, doi: 10.1007/978-981-19-3448-3_16.
- [14] N. Pumpugsri, W. Rattanawong, and V. Vongmanee, "Using Telematics and AI Technology to Reduce Road Accidents for Heavy-Duty Vehicles," in *Proc. 2023 27th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 2023, doi: 10.1109/ICSEC59635.2023.10329662.
- [15] C. Yang, A. Agarwal, and P. Konana, "General Behavioral Impact of Smart System Warnings: A Case of Advanced Driving Assistance Systems," *Production and Operations Management*, vol. 34, no. 11, 2025, doi: 10.1177/10591478251336742.