



อัคคีภัยจากรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิดและปิด : ทบทวนวรรณกรรม

Fire hazards of electric vehicles in semi-enclosed and enclosed environments: A review

อมลวรรณ ชูดอนหวาย^{1*} นันทน์ภัสสร อินยิม²

¹ หลักสูตรหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Amonwan Choodonwai^{1*} Nannapasorn Inyim²

¹ Doctor of Philosophy Program in Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

* Corresponding author.

E-mail: 6719350004@rumail.ru.ac.th; Telephone: 06 2459 2641

วันที่รับบทความ 9 กันยายน 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 พฤศจิกายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ 7 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแนวโน้มการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles :EVs) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความเสียด้านอัคคีภัย โดยเฉพาะในพื้นที่ปิดและกึ่งปิด เช่น ที่จอดรถใต้ดิน และอุโมงค์ เป็นประเด็นที่ท้าทายเป็นอย่างมาก งานทบทวนวรรณกรรมฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมผลการศึกษที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิดและปิด ในช่วงปี ค.ศ.2015-2025 จำนวน 18 บทความ เพื่ออธิบายลักษณะพฤติกรรมของเพลิงไหม้ ภาวะหลุดร้อน (thermal runaway) อัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat Release Rate: HRR) การแพร่กระจายของควันและก๊าซพิษ แนวทางการระบายอากาศ และวิธีการดับเพลิงในพื้นที่กึ่งปิด และปิด ผลการทบทวน พบเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิดและปิด มีอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดเกิน 6-10 เมกกะวัตต์ และมากถึง 52 เมกกะวัตต์สำหรับรถบัสไฟฟ้า โดยระยะเวลาที่เข้าสู่ค่าสูงสุดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ระหว่างเพลิงไหม้สามารถปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) สูงถึง 488 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเกินเกณฑ์ระดับความเข้มข้นที่ส่งผลต่อสุขภาพ AEG1-2 ถึง 40 เท่า ส่งผลให้ระยะเวลาที่ปลอดภัยในการอพยพ ลดลงถึง 47% โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศจำกัด การดับเพลิงจำเป็นต้องใช้น้ำมากถึง 6,000 ลิตรหรือสารเคมีในปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับรถดับไฟของรถยนต์สันดาปภายใน และยังมีความเสี่ยงจากการลุกไหม้ซ้ำจากปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ของแบตเตอรี่ ข้อมูลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการทดลอง หรือจำลองเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิดและปิด หรือใช้ข้อมูลสำหรับสนับสนุนการออกกฎหมาย กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าในอาคารจอดรถ เพื่อรองรับนโยบายการส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้าของภาครัฐ และการเติบโตในอนาคตสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

คำสำคัญ

รถยนต์ไฟฟ้า ภาวะหลุดร้อน อัตราการปลดปล่อยความร้อน พื้นที่กึ่งปิด พื้นที่ปิด

Abstract

Electric vehicle (EV) adoption has been growing continuously; however, fire hazards remain a significant challenge, especially in semi-enclosed and fully enclosed environments such as underground parking lots and tunnels. The objective of this literature review is to understand EV fire behavior in semi-enclosed and enclosed environments. Eighteen studies published between 2015 and 2025 were reviewed to examine fire behavior, thermal runaway, heat release rate (HRR), smoke dispersion, and toxic gas emissions. The review also considers health hazards, fire suppression methods, and

ventilation strategies. EV fire behavior differs significantly from internal combustion engine vehicles (ICEVs), with maximum HRR reaching 6–10 MW within minutes and up to 52 MW in electric buses. Hydrogen fluoride (HF) concentrations can reach up to 488 ppm, exceeding the acute exposure guideline AEGL-2 by a factor of 40, which drastically reduces tenability time by up to 47%, especially in areas with limited ventilation. Fire suppression for EVs requires significantly more resources-around 6,000 liters of water or chemical agents compared to ICEV fires and poses a risk of re-ignition. The findings of this literature review can serve as a guideline for further studies involving experiments or simulations of electric vehicle fires in semi-enclosed and enclosed spaces. It can also be used to support legislation and establish safety standards related to EV fire incidents in parking structures, to align with government policies promoting electric vehicle adoption and accommodate future growth in EV usage.

Keywords

electric vehicle fire, thermal runaway, heat release rate, semi-enclosed environment, enclosed environment

1. คำนำ

การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน มีปัจจัยที่ส่งเสริมการเติบโต เช่น สภาพเศรษฐกิจ ราคารถยนต์ไฟฟ้าที่ถูกลง เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้บริโภคในการตัดสินใจใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ การส่งเสริมจากภาคเอกชน และภาครัฐในเชิงนโยบาย ให้มีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าให้แพร่หลาย และเพิ่มจำนวนมากขึ้น เพื่อสนับสนุนการมุ่งสู่เป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความยั่งยืนด้านพลังงานตาม นโยบาย “EV 30@30” ของประเทศไทยที่ตั้งเป้าผลิตยานยนต์ปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (Zero Emission Vehicle: ZEV) ให้ได้อย่างน้อย 30% ของการผลิตยานยนต์ทั้งหมดภายในปี 2030 สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) ข้อที่ 7 และข้อที่ 13 ที่มุ่งเน้นพลังงานสะอาดและรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาด้านอัคคีภัยของรถยนต์ไฟฟ้ายังมีความท้าทายอย่างมาก การเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่สามารถเกิดภาวะหลุดร้อน “Thermal runaway” นำไปสู่การเกิดควัน ก๊าซพิษ เพลิงไหม้ หรือการระเบิดที่รุนแรงมากกว่าการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์สันดาปภายใน (ICEV) นั้นหมายถึงผู้ที่อยู่ในพื้นที่เกิดเหตุ และนักดับเพลิง มีโอกาสที่จะได้รับอันตรายสูงมากขึ้น ทั้งนี้เป็นอันตราย และรุนแรงของเหตุเพลิงไหม้สามารถเพิ่มสูงมากขึ้นหากเกิดเหตุในพื้นที่คับแคบ มีการระบายอากาศที่จำกัด เช่น พื้นที่อาคารจอดรถใต้ดิน หรืออุโมงค์ ในบริบทของประเทศไทย ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบเฉพาะเพื่อรองรับความปลอดภัยด้านอัคคีภัยจากรถยนต์ไฟฟ้า เช่น ระบบ

ดับเพลิง การระบายอากาศที่รองรับความเสี่ยงเฉพาะของการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน รวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการพื้นที่สำหรับจอดรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่อาคารจอดโดยเฉพาะ อีกทั้งข้อมูลเหตุการณ์อุบัติเหตุเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้าจริงในประเทศ ก็มีจำกัด ส่งผลให้หน่วยงานกำกับดูแลและผู้ประกอบการอาคารขาดข้อมูลเชิงเทคนิคสำหรับการวางแผนมาตรการป้องกันด้านความปลอดภัยอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในเชิงรุกทางด้านความปลอดภัยอัคคีภัย และการบริหารจัดการรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต บทความปริทัศน์วรรณกรรมนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมองค์ความรู้ปัจจุบันเกี่ยวกับเพลิงไหม้แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิด และปิด เช่น อาคารจอดรถใต้ดิน และอุโมงค์ โดยการศึกษาทำการคัดเลือก ประเมิน และสังเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิด และปิด เป็นวรรณกรรมที่ได้รับการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อเข้าใจถึงปรากฏการณ์การเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า การเกิดก๊าซพิษ ผลกระทบต่อสุขภาพ และการดับเพลิง เพื่อใช้เป็นข้อมูล ในการออกแบบการจัดการความเสี่ยงด้านอัคคีภัยในเชิงป้องกัน สนับสนุนงานการออกแบบ และแนวทางปฏิบัติ หรือข้อบังคับเพื่อความปลอดภัย ในอนาคต เสริมสร้างการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมและเชิงนโยบายบนพื้นฐานของหลักฐานของการเกิดไฟไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิดและปิด

2. วิธีการ และขอบเขต

2.1 ขั้นตอนการสืบค้น และคัดเลือก

การทบทวนวรรณกรรมนี้ให้ความสนใจ การเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิด และปิด เช่น ลานจอดรถใต้ดินหรือภายในอุโมงค์ เพื่อทบทวน เข้าใจถึงกลไกการเกิดเพลิงไหม้ การปลดปล่อยความร้อน คาร์บอนและก๊าซพิษ รวมถึงการดับเพลิง จากเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิด และปิด กระบวนการสืบค้น และการคัดเลือกงานวิจัยที่สนใจ เป็นไปตามรูปที่ 1 โดยใช้คำสำคัญในการสืบค้น จากฐานข้อมูลหลัก ได้แก่ ScienceDirect, SpringerLink, IEEE/IET Electronic Library, และ Engineering Source ตั้งแต่ปี 2015 ถึง 2025 มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ เป็นบทความวิจัยที่ผ่านการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และตีพิมพ์เป็นภาษาอังกฤษ ซึ่งหลังจากได้บทความที่ผ่านการสืบค้นด้วยคำสำคัญ จึงทำการคัดเลือกบทความตามขั้นตอน

- 1) ตรวจสอบชื่อเรื่อง เพื่อตัดบทความที่ซ้ำออก
- 2) อ่านชื่อเรื่อง และคำสำคัญในบทความ และตัดงานวิจัยที่ไม่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ไฟฟ้าออก
- 3) อ่านบทคัดย่อเพื่อประเมินความเกี่ยวข้อง คัดงานวิจัยที่ระบุสถานที่การศึกษาไม่ชัดเจนออก
- 4) อ่านและประเมินเนื้อหาในบทความทั้งหมดอย่างละเอียด โดยมีเป้าหมายเพื่อคัดเลือกเฉพาะบทความที่เกี่ยวข้องโดยตรงกรณีเกิดเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิดและปิด โดยผลจากการดำเนินการตามขั้นตอน พบรายการวรรณกรรมที่สอดคล้องทั้งสิ้น 18 บทความ

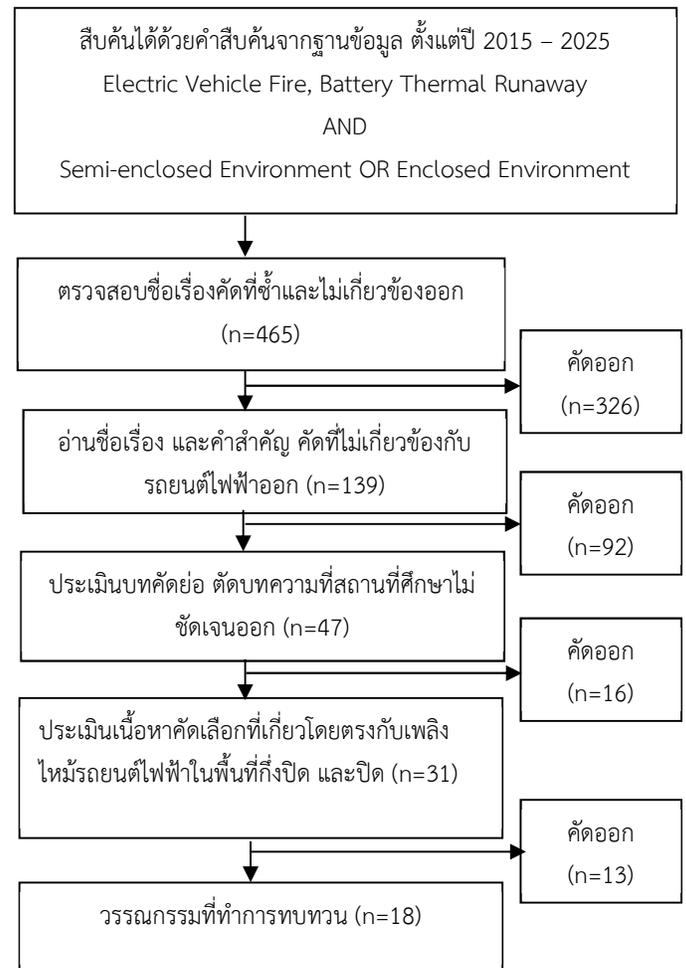
2.2 นิยาม

- 1) Peak HRR (MW) ค่าสูงสุดของอัตราการปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ Peak HRR (MW) ใช้เปรียบเทียบความรุนแรงของไฟ
- 2) Time-to-Peak HRR (min) เวลาตั้งแต่เริ่มติดไฟจนถึงเกิด Peak HRR บ่งชี้ความเร็วในการลุกลาม
- 3) Total Heat Release THR (MJ) คือ พลังงานความร้อนสะสมทั้งหมดตลอดการเผาไหม้
- 4) HF Concentration (ppm) คือ ความเข้มข้นสูงสุดของไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ใช้เทียบกับ AEGL-2

5) Tenability Time (min) คือ เวลาที่มนุษย์สามารถอยู่ในพื้นที่ได้ก่อนเป็นอันตราย

6) Battery SOC (%) คือ ระดับพลังงานแบตเตอรี่ขณะทดสอบ

7) Battery Capacity (kWh) คือ ความจุของแบตเตอรี่รถยนต์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการค้นหาค้นหา และคัดเลือกวรรณกรรม

3. ผลการทบทวน

บทความวิจัยที่ดำเนินการทบทวนทั้ง 18 บทความเป็นการศึกษาการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิด และปิด ที่มีวิธีการศึกษาเป็นการทดสอบเต็มรูปแบบของการเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าจริง (full scale experiment)

การศึกษาด้วยการจำลองด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics model) เมื่อพิจารณาตามวัตถุประสงค์สามารถแยกได้เป็น การศึกษาในพฤติกรรมของการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า การศึกษาการแพร่กระจายของควัน และก๊าซพิษขณะเกิดเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า การศึกษาสารดับเพลิง และวิธีการในการระงับเหตุเพลิงไหม้ และผลกระทบต่อผู้ใช้อาคารและนักดับเพลิงจากเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้าตามลำดับ

3.1 การเริ่มต้นของเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า

เหตุการณ์เพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้ามักมีจุดเริ่มต้นจากความล้มเหลวของเซลล์แบตเตอรี่ เช่น การลัดวงจรภายใน จนเกิดความร้อน การชาร์จเกินจนทำให้แบตเตอรี่มีความดันภายในที่สูงมากขึ้น ส่งผลให้ระบบความปลอดภัยล้มเหลว ปัญหาในระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่เอง ก็อาจทำให้เกิดการสะสมพลังงานเกินขีดจำกัดของเซลล์, ความเสียหายทางกล เช่น การชน กระแทกจากอุบัติเหตุ และการได้รับความร้อนจากภายนอก เช่น กรณีเพลิงไหม้รถข้างเคียง มีการจำลองการเกิดเพลิงไหม้ของรถ Tesla Model S ในอาคารจอดรถแบบปิด โดยใช้โปรแกรม FDS (fire dynamics simulator) แสดงให้เห็นว่ารถยนต์อื่นที่จอดใกล้เคียงกับรถยนต์ไฟฟ้าที่เกิดเพลิงไหม้ ในระยะรัศมีน้อยกว่า 2 เมตร มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดเพลิงไหม้ด้วย เนื่องจากความเข้มของรังสีความร้อนที่สูงมากกว่า 25 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร [1] นอกจากนี้การเสื่อมสภาพของชั้น solid electrolyte interphase และการแตกตัวของอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซไวไฟ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน เมื่อก๊าซเหล่านี้สัมผัสกับอากาศ สามารถเกิดการจุดติดไฟหรือการระเบิดภายในแบตเตอรี่ นำไปสู่การเกิดเพลิงไหม้ได้เช่นกัน [2]

3.2 ภาวะหลุตร้อน Thermal runaway

เป็นกระบวนการที่เซลล์แบตเตอรี่สร้างความร้อนมากกว่าที่จะสามารถระบายออกได้ทันเวลา นำไปสู่การเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดขึ้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนพร้อมกับการปล่อยก๊าซพิษและเกิดการติดไฟอย่างรวดเร็ว Barré A., et al. [2] จำลองการเกิดเพลิงไหม้ ด้วย FDS เพื่อศึกษาผลกระทบของภาวะหลุตร้อน โดยใช้กรณีศึกษาเป็นรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ Lithium Manganese Oxide

(LMO) ขนาด 24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในพื้นที่อาคารจอดรถคอนกรีตใต้ดิน พบมีการถ่ายเทความร้อนไปยังเพดานบริเวณเหนือรถที่ไฟไหม้ มีค่าความร้อนสูงถึง 73-75 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ส่งผลให้พื้นผิวคอนกรีตมีอุณหภูมิสูงถึง 510-530 องศาเซลเซียส ในขณะที่การศึกษาของ Sturm et al.[3] แสดงให้เห็นว่าไฟไหม้แบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า ภายในอุโมงค์สามารถทำให้อุณหภูมิบริเวณเพดานพุ่งสูงขึ้นเร็วกว่า เพลิงไหม้ที่เกิดจากรถยนต์สันดาปภายใน โดยอุณหภูมิสูงสุดบริเวณเหนือเพลิงไหม้ อยู่ในช่วง 800-1200 องศาเซลเซียส และเกิดการแพร่กระจายของไฟอย่างรุนแรงผ่านกระบวนการลุกไหม้ของเซลล์แบตเตอรี่แบบต่อเนื่อง สอดคล้องกับการศึกษาของ Funk E et al.[4] รายงานว่าอุณหภูมิของก๊าซจากเพลิงไหม้ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า สามารถพุ่งสูงขึ้นถึง 1000 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการเกิดเพลิงไหม้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดเริ่มต้นของไฟและโครงสร้างของตัวรถยนต์ และยังระบุเพิ่มเติมว่าการเผาไหม้แบตเตอรี่แบบภาวะหลุตร้อนทำให้เกิดควันดำหนาที่บในช่วงต้นของเพลิงไหม้ และเปลี่ยนเป็นควันขาวหนกภายในระยะเวลาไม่กี่นาที อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลต่อภาวะหลุตร้อน ได้แก่ ปริมาณของประจุในแบตเตอรี่ ยังมีปริมาณประจุมาก ความรุนแรงก็มากตามไปด้วย ประเภทของแบตเตอรี่ที่ส่งผลเช่นกัน เนื่องจากพฤติกรรมในการปล่อยพลังงานที่แตกต่างกัน ภาวะหลุตร้อนสามารถเกิดขึ้นได้รุนแรงและเร็วขึ้น เมื่อการตอบโต้เพลิงไหม้ทำได้ช้าเกินไป และเกิดเหตุในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่ดีพอ เช่น อุโมงค์ หรือลานจอดรถเพดานต่ำ

3.3 การพัฒนาเพลิงไหม้ และการปลดปล่อยความร้อนขณะเกิดเพลิงไหม้

3.3.1 การพัฒนาของการเกิดไฟ

การพัฒนาเพลิง (Fire growth stages) และอัตราการปลดปล่อยความร้อน (Heat release rate : HRR) เป็นตัวบ่งชี้ขนาดและความรุนแรงของไฟ ทั้งนี้การลุกไหม้ของแบตเตอรี่จะนำไปสู่การเผาไหม้วัสดุอื่นภายในรถ เช่น พลาสติก ฉนวนเบาะ และสายไฟ ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะเพิ่มความรุนแรงของไฟอย่างรวดเร็ว การศึกษาทดลองโดย Kang et at. [5] ทำการทดสอบไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้าทั้งคันในที่จอดรถใต้ดิน พบว่าเพลิงช่วงเริ่มต้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากแบตเตอรี่ และลุกลาม

ไปยังห้องโดยสารภายในเวลาไม่กี่นาที โดยมีลักษณะของ deflagration gas และการฟุ้งเปลวไฟออกจากช่องระบายแรงดันของแบตเตอรี่ นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในรายงานโดย Funk E et al.[4] ระบุเพลิงไหม้จากรถยนต์ไฟฟ้า สามารถทำให้อุณหภูมิเพดานสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียสในช่วง 5 นาทีแรกของเพลิงไหม้ และในกรณีเพลิงไหม้เกิดจากการชาร์จเกิน (130%) การพัฒนาของไฟจะยิ่งรวดเร็วมากขึ้น สามารถเห็นเปลวไฟได้ภายใน 1.5 นาที นอกจากนั้นการแพร่ของไฟไปยังรถข้างเคียงสามารถเกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลา 3 นาทีถึง 46 นาที ขึ้นอยู่กับสถานการณ์

3.3.2 การปลดปล่อยความร้อน

การเผาไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า มีค่าการปลดปล่อยความร้อนเปลี่ยนแปลงตามปริมาณพลังงานของแบตเตอรี่ และวัสดุติดไฟภายในรถยนต์ มีการศึกษาการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด ของเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดจากเพลิงไหม้ของรถยนต์สันดาปภายใน โดยใช้รถนั่งโดยสารขนาดทั่วไป และรถบัสที่มีขนาดใหญ่ ค่าเปรียบเทียบการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดในรถยนต์นั่งไฟฟ้าที่มีขนาดความจุแบตเตอรี่ระหว่าง 40 –

100 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะมีค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของรถยนต์ทั้งคัน อยู่ระหว่าง 6-8 เมกกะวัตต์ เมื่อพิจารณาการปลดปล่อยความร้อนจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ค่าจะอยู่ระหว่าง 1-2 เมกกะวัตต์ เช่นการศึกษาของ Boehmer HR et al.[8] ระบุการทดลองเปรียบเทียบระหว่างรถยนต์ไฟฟ้า และรถยนต์สันดาปภายในพบค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดจากเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้าใกล้เคียงกับรถยนต์สันดาปภายใน หรือ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยความร้อนขณะเกิดเพลิงไหม้ระหว่างรถยนต์ไฟฟ้า และรถยนต์สันดาปภายใน

ประเภทรถ	EV peak HRR (MW)	ICEV Peak HRR (MW)	อ้างอิง
รถนั่ง	6-8	6-8	EV: [1], [4-5],[10] ICEV: [5],[8],[11]
อูโม่งค์	5-15	5-10	EV: [12] ICEV: [13]
ที่จอดใต้ดิน	7-8	6-8	EV: [5] ICEV: [5]
รถบัส/รถบรรทุก	20-30	15-25	EV: [6],[14] ICEV: [6]

ตารางที่ 2 การทบทวนการศึกษาการปลดปล่อยความร้อน และอุณหภูมิสูงสุดในเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้า

ประเภทยานพาหนะ / Vehicle Type	ความจุแบตเตอรี่ (kWh) / Battery Capacity	วิธีการทดลอง/ จำลอง / Method	ค่า HRR สูงสุด (MW)	เวลาไปถึง ค่าสูงสุด (วินาที)	อุณหภูมิสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อ้างอิง
Tesla Model S	~75-100	CFD	~8	~610	900-1100	Gavryliuk,2024 [1]
Nissan Leaf	24	CFD	~10	~1080	555	Barre,2024 [2]
Renault/Tesla/Leaf	22-55	Experiment	6-8	180-600	800-1200	Funk, 2023 [4]
Modern BEV	39-64	Experiment	~7.2	~800	1100	Kang,2025 [5]
Electric Bus	~300	CFD	20-30	~600-900	>330	Caliendo, 2024 [6]
Electric Truck	~200-300	CFD	260	Not stated	1177	Li X, 2024 [7]
Tesla Model S	~75-100	CFD	3-6	720	1020	Gavryliuk,2023[9]
EV Car	~40-60	CFD	6-7	900	Not stated	Bryant, 2022 [10]
Electric Bus	>300	Experiment/CFD	52	~900	1200	Raza, 2024 [14]

บางครั้งในรถยนต์ไฟฟ้าอาจต่ำกว่า เนื่องจากการเกิด pool fire จากน้ำมันเชื้อเพลิง ในรถยนต์สันดาปภายใน การศึกษาเปรียบเทียบค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่เป็นอุโมงค์ และที่จอดรถใต้ดิน ก็ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [5], [12-13] ในขณะที่การศึกษาในรถยนต์ไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น รถบัสไฟฟ้า หรือ รถบรรทุกไฟฟ้า ค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดของการเกิดเพลิงไหม้ จะอยู่ที่ 20-30 เมกกะวัตต์ [6] และสูงถึง 52 เมกกะวัตต์ในการศึกษาของ Raza and Li [14] ในขณะที่รถบัสหรือรถบรรทุกสันดาปภายใน (ICEV) มีค่าสูงสุดของการปลดปล่อยความร้อนของเพลิงไหม้อยู่ที่ 15-25 เมกกะวัตต์ ผลจากการศึกษาในหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาค่าการปลดปล่อยความร้อนขณะเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิด และปิด แสดงในตารางที่ 2 โดยค่าการปลดปล่อยความร้อนต่ำสุดมาจากการศึกษาจำลองแบตเตอรี่ในรถยนต์โดยสารส่วนบุคคลที่มีขนาดของแบตเตอรี่อยู่ที่ 24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุดมาจากการจำลองแบตเตอรี่ขนาด 100 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในรถยนต์ส่วนบุคคลเช่นเดียวกัน [9] เห็นได้ว่าค่าการปลดปล่อยความร้อนมีค่าสูงมากขึ้น แปรผันตามขนาดของแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในส่วนของอัตราการเติบโตของไฟต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร โดยส่วนมากผลการศึกษาที่ได้จะอยู่ในลักษณะ ปานกลาง ถึงเร็วและเร็วมาก เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการปลดปล่อยค่าความร้อนขณะเกิดเพลิงไหม้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระยะเวลาการลุกไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าที่ไปถึงจุดการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด มีระยะเวลาสั้นสุด 200-250 วินาทีในการศึกษา เพลิงไหม้ในรถที่มีขนาดแบตเตอรี่ 100 กิโลวัตต์-ชั่วโมง [18] และใช้เวลานานประมาณ 200 วินาที จากการทดสอบเพลิงไหม้ในรถ Nissan Leaf ที่มีขนาดแบตเตอรี่ 24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง [2] นอกจากนี้ การศึกษาเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า มีการรายงานค่าอุณหภูมิเพดานสูงสุด ขณะเกิดเพลิงไหม้ โดยส่วนมากอยู่ที่ 800-1200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 2 แต่ในการศึกษาของ Caliendo et al.,[6] รายงานค่าอุณหภูมิสูงสุดที่มากกว่า 330 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการกำหนดการใช้ระบบระบายอากาศเชิงกลประเภท ceiling jet fans จำนวน 8 ชุดที่ความเร็วลม ประมาณ 3.2 เมตรต่อวินาที เพื่อป้องกันการเกิด back-layering จึงทำให้ค่าอุณหภูมิที่ได้ต่ำกว่าการศึกษานี้

3.4 คว้นและก๊าซพิษจากไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้า

เพลิงไหม้จากแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า นอกจากจะปลดปล่อยพลังงานความร้อน และอุณหภูมิที่สูงแล้ว ยังมีการปล่อยคว้น และก๊าซพิษระหว่างการเกิดเพลิงไหม้ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์, ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์และก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ เป็นต้น Truchot et al.[11] ทำการศึกษาการปล่อยก๊าซพิษจากการไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าเติมคันภายในอุโมงค์ เปรียบเทียบกับรถยนต์สันดาปภายใน พบรถยนต์ไฟฟ้า ขณะเกิดเพลิงไหม้ตรวจพบ ก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ 0.7 กิโลกรัม ในปริมาณมากกว่า เพลิงไหม้ในรถยนต์สันดาปภายในที่ตรวจพบเพียง 0.4 กิโลกรัม ทั้งนี้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ที่เกิดขึ้นในรถยนต์ไฟฟ้าเนื่องมาจากสาร LiPF₆ ที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่สลายตัวเมื่อโดนความร้อน และปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ออกมา แม้ Truchot et al.[11] จะระบุปริมาณไฮโดรเจนฟลูออไรด์จากการเผาไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า มีมากกว่าเพลิงไหม้ของรถยนต์สันดาปภายใน แต่ช่วงเวลาของการเกิด ไฮโดรเจนฟลูออไรด์สูงสุดในรถยนต์ไฟฟ้า เกิดหลังจากเพลิงไหม้เกิดขึ้นแล้วนานถึง 30 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผู้โดยสารสามารถอพยพออกไปได้แล้ว ในการศึกษาของ Jang et al. [15] ใช้โปรแกรม FDS จำลองการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้าที่มีขนาดแบตเตอรี่ต่างกัน ในที่จอดรถใต้ดินของอาคารอพาร์ทเมนต์ โดยพิจารณาขนาดของแบตเตอรี่ที่ 24, 53 และ 99.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่าค่าสูงสุดของก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศจำกัด เกิดจากการจำลองการเกิดเพลิงไหม้ของรถบัสไฟฟ้าที่มีขนาดแบตเตอรี่ 99.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง มีการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์สูงถึง 488 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ความปลอดภัย ของค่าความเข้มข้นของการรับสัมผัสสารไฮโดรเจนฟลูออไรด์ในระยะสั้น AEGL-2 (12 ppm, 30 นาที) ถึง 40 เท่า นานกว่า 50 นาที จากการทบทวนวรรณกรรม ผลการศึกษาการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ และเวลาความทนทานในการอพยพ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ และเวลาความทนทานในการอพยพ

อ้างอิง	ความจุแบตเตอรี่ kWh	ระยะเวลา AGEL-2 (12ppm,30 min)	HF Peak (ppm)	Tenability	
				FED (นาที)	FEC (นาที)
[15]	24	32 min 32s	45	20.5	26.8
[15]	53	41 min 10s	283	20.1	21.7
[15]	99.8	53 min 49s	488	16.5	13.4
[11]	ICEV	-	0.4 kg	30-45	15-20
[11]	EV	-	0.7 kg	30-45	15-20

จากตารางผลการศึกษาการปล่อยก๊าซก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ และเมื่อพิจารณา ขนาดแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไป จากขนาด 24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เป็น 99.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง พบค่าการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เพิ่มขึ้นเกือบ 4 เท่า และลดเวลาปลอดภัย Tenability time ลงถึง 47% เมื่อพิจารณา ค่าความเป็นพิษ FED (Fraction Effective Dose) และ FEC (Fractional Effective Concentration) ที่ใช้ในการวัด ระดับอันตรายต่อชีวิตในพื้นที่ปิด และพบว่าไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เข้าถึงระดับ FED > 1 ภายใน 6 นาทีเมื่อแบตเตอรี่มีขนาด 99.8 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ คาร์บอนมอนอกไซด์ถึงระดับ FEC ที่เป็นอันตรายภายใน 3-5 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการระบายอากาศ, ประเภทก๊าซพิษ และปริมาณที่เกิดขึ้นระหว่างเพลิงไหม้ มีการศึกษาทดลอง พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซพิษที่เกิดขึ้นในระหว่างเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้า มีค่าสูงเกินมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายถึงโอกาสของการได้รับอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้อาคาร และเจ้าหน้าที่ดับเพลิงเพิ่มสูงมากขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ระบายอากาศไม่ดี มีโอกาสเกิดการสะสมของสารพิษในร่างกาย และก่อให้เกิดโรคร้ายแรงได้

3.5 คิว้นและการบดบังการมองเห็น

Bai et al.,[12] พบว่าการลุกไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า ทำให้เกิดควันหนาแน่นมากในระยะเวลานับวินาที โดยความสามารถในการมองเห็นลดต่ำกว่า 10 เมตรภายใน 2-3 นาทีหลังจากเริ่มเกิดเพลิงไหม้ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการอพยพของผู้คน และการเข้าถึงของทีดับเพลิง และที่ระดับการปลดปล่อยความร้อนที่สูงมากกว่า 3 เมกกะวัตต์ การไหลย้อนของควันสามารถเกิดขึ้นได้ในระยะทางที่ยาวกว่า 18 เมตร แม้จะมีการระบาย

อากาศ และเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อความเร็วลดลง [12] ควันจากเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วยอนุภาคละเอียด ก๊าซพิษและความร้อนซึ่งมักลอยตัวขึ้นสู่เพดาน และกระจายตามโครงสร้างของอาคาร Zhao et al.[16] จำลองการไหลของควันจากไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้า ในอุโมงค์ภายใต้แรงลมตามยาว (longitudinal ventilation) พบว่าควันจะลอยขึ้นสู่เพดานอย่างรวดเร็ว และเกิด “smoke back-layering” ซึ่งเป็นการไหลย้อนของควันกลับไปยังทิศทางลม ทำให้พื้นที่ใกล้ต้นเพลิงมีทัศนวิสัยต่ำและอุณหภูมิสูง Bai et al.[17] รายงานว่าเมื่อการปลดปล่อยความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจากแบตเตอรี่ และวัสดุภายในรถ การกระจายของควันจะรุนแรงขึ้น และต้องการความเร็วลมที่มากขึ้นในการกำจัด back-layering นอกจากนี้ Jang et al.[15] แสดงให้เห็นว่าในที่จอดรถใต้ดินที่มีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ ควันและก๊าซ สามารถสะสมอยู่บริเวณเพดานหรือบันไดหนีไฟ ทำให้เวลาที่สามารถอพยพได้ (tenability time) ลดลงเหลือเพียงไม่กี่นาทีในกรณีที่แบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการจำลองโดย Zhao et al.[16] ชี้ว่าการติดตั้งหัวฉีดละอองน้ำแบบฝอย (Fine Water Mist) สามารถลดการลอยตัวของควันและการสะสมของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อทำงานร่วมกันกับการระบายลมตามยาวในอุโมงค์

3.6 อิทธิพลของโครงสร้างและการระบายอากาศ

โครงสร้างแบบเพดานต่ำในที่จอดรถใต้ดิน หรืออาคารกึ่งปิดจะทำให้ควัน และความร้อนสะสมเร็วกว่าอาคารที่มีเพดานสูง Funk et al. [4] ทดสอบไฟจากรถยนต์ไฟฟ้าในโครงสร้างเหล็กครึ่งเปิด และพบว่าแม้จะมีการไหลของอากาศจากภายนอก แต่ความร้อนและควันยังคงลอยสะสมบริเวณเพดาน ทำให้เกิดการแพร่กระจายของเปลวไฟสู่รถใกล้เคียงในเวลาเพียง 3-5 นาที การใช้ระบบระบายอากาศเชิงกล เช่น jet fan หรือ axial fan สามารถควบคุมการไหลของควันได้ดีขึ้น แต่ต้องออกแบบให้สอดคล้องกับตำแหน่งของรถยนต์ไฟฟ้า และจุดจอด การเคลื่อนที่ของควัน และความร้อนจากไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่ปิดเป็นเหตุการณ์ที่ซับซ้อน โดยอิทธิพลจากอัตราการปลดปล่อยความร้อน โครงสร้างอาคารโดยเฉพาะระดับความสูงของเพดาน และการระบายอากาศโดยตรง ควัน

ลอยตัวไปยังเพดานและกระจายย้อนกลับหากไม่มีแรงลมที่เพียงพอ (back-layering) และในขณะเดียวกันพลังงานความร้อนสามารถสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้าง และเพิ่มความเสียหายต่อชีวิตภายในเวลาไม่กี่นาที Jang et al. [15] ระบุว่าการระบายอากาศในพื้นที่ที่เพียงพอจะลดการสะสมของควันไฟ และก๊าซพิษในพื้นที่เพลิงไหม้ อย่างไรก็ตามในพื้นที่ปิดหรือกึ่งปิด การระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ ต่อการระบายก๊าซพิษให้อยู่ในระดับต่ำกว่าในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งหมายถึงโอกาสของนักดับเพลิงที่จะได้รับอันตรายจากการสูดดมก๊าซพิษในขณะที่เข้าระงับเหตุสูง

3.7 การดับเพลิง

การดับเพลิงและการควบคุมควันไฟในเหตุการณ์ไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้า มีความซับซ้อนและท้าทายมากกว่ารถยนต์เชื้อเพลิงสันดาป เนื่องจากลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ที่สามารถก่อให้เกิดภาวะหลุดร้อน และการลุกไหม้ซ้ำ (re-ignition) รวมถึงการปล่อยก๊าซพิษจำนวนมาก และรวดเร็ว

ตารางที่ 4 การดับเพลิงจากรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการต่างๆ

อ้างอิง	วิธีการดับเพลิง	ปริมาณน้ำที่ใช้	ประสิทธิภาพ	หมายเหตุ / การลุกไหม้อีกครั้ง
[4]	สเปรย์น้ำโดยตรง/อ้อม, ฟันละอองน้ำ, สายดับเพลิงแบบพกพา	ไม่ระบุ	ดับต้นเพลิงได้ ลดการลุกลาม มีประสิทธิภาพสูงสุด	การลุกลามใช้เวลา 3-46 นาทีขึ้นกับวิธี; การชาร์จเกินเพิ่มความเสี่ยง
[10]	สายน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์, สารเคมี	2500-6000 ลิตร (200 ลิตร/นาที)	น้ำเหมาะสำหรับลดความร้อน คาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สามารถ ลดอุณหภูมิได้เพียงพอ	จำเป็นต้องลดอุณหภูมิแบตเตอรี่; สารเคมีเพียงแค่อุณหภูมิชั่วคราว
[6]	ใช้น้ำในอุโมงค์	มากกว่าการดับไฟรถ ICEV มาก	ใช้เวลานานในการดับไฟจากรถไฟฟ้า	ต้องระบายความร้อนนาน; หน้ากากเต็มหน้าของนักดับเพลิงอาจไม่เพียงพอ
[18]	ฟันละอองน้ำละเอียด (fine mist)	ไม่ระบุ	ลดจุดสูงสุด HRR ลง 26%; ชะลอการเติบโตของไฟ	เหมาะกับการควบคุม; ไม่สามารถดับแบตเตอรี่ได้เต็มที่
[14]	ฉีดน้ำอ้อม + การควบคุมการระบายอากาศ	ไม่ระบุ	ลด HRR ได้ แต่ไม่สามารถดับแบตเตอรี่	เปลวไฟเจ็ด + ความร้อนสูง เป็นอันตรายต่อโครงสร้าง; เสี่ยงการลุกไหม้อีกครั้งสูง

โดยเฉพาะในพื้นที่จำกัด เช่น อุโมงค์หรือที่จอดรถใต้ดินที่มีระดับความสูงของเพดานที่ต่ำ ความท้าทายในการดับไฟได้แก่ ไฟจากแบตเตอรี่ต้องใช้เวลาในการดับ และอาจเกิดการลุกไหม้ซ้ำได้ หลังจากผ่านไปหลายชั่วโมง ปริมาณน้ำหรือสารดับเพลิงที่ต้องใช้ในปริมาณที่มากกว่า และนานกว่าหลายเท่าผลการทบทวนวรรณกรรม ในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ

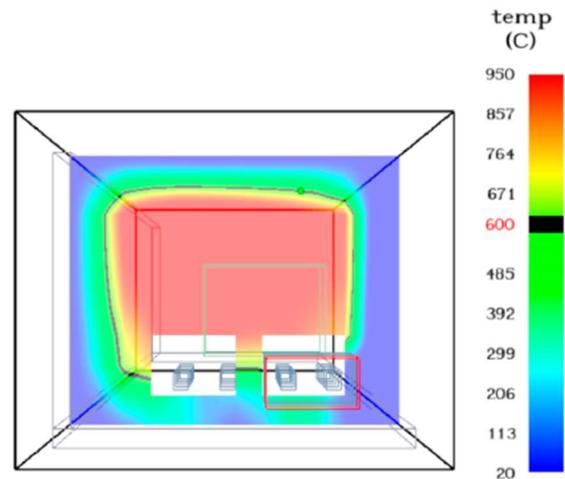
ดับเพลิงที่เกิดจากรถยนต์ไฟฟ้า และประสิทธิภาพ แสดงในตารางที่ 4 เห็นได้ว่าการใช้สารดับเพลิงประเภทเดียวในการดับไฟที่เกิดในรถยนต์ไฟฟ้า ไม่สามารถทำได้เพียงพอ การใช้วิธีการและสารดับเพลิงแบบผสมผสานบูรณาการจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพในการดับเพลิงจากรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น Funk et al.[4] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการดับเพลิงที่แตกต่างกันของเพลิงไหม้

รถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ที่กึ่งปิดให้ข้อเสนอแนะวิธีการดับไฟที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ แบบเจาะแบตเตอรี่ด้วยน้ำ (extinguishing lance) เนื่องจากใช้น้ำน้อยและลดการเกิดไฟซ้ำได้ อีกทั้งนำเสนอให้บรรจกระบบดับเพลิงอัตโนมัติในมาตรการความปลอดภัยของรถยนต์ไฟฟ้าในเรือหรืออาคารจอดรถ

3.8 วิธีการทดลอง และจำลองในการศึกษา

การทบทวนวรรณกรรมการศึกษาเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า พบมีการศึกษาโดย การทดลองขนาดจริง (full-scale testing) และ การจำลองด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลและก๊าซ รวมถึงการถ่ายเทความร้อน (computational fluid dynamics) โดยมีวัตถุประสงค์การทดลองที่แตกต่างกันออกไป เช่น เพื่อให้เข้าใจกลไกของการเกิดเพลิงไหม้ ให้ทราบถึงค่าการปลดปล่อยความร้อน การเกิดก๊าซพิษและความเข้มข้นขณะเพลิงไหม้ การแพร่กระจายของควัน รวมถึงการประเมินความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม และกลุ่มคนที่เกี่ยวข้อง เช่น ผู้ใช้อาคารและเจ้าหน้าที่ดับเพลิง จากการทบทวน พบว่าวิธีการทดลองที่เป็นที่ทดลองขนาดเต็มในสภาพจริงโดย Sturm et al. [3] ทำการทดสอบไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเพลิงไหม้รถยนต์เชื้อเพลิงสันดาป ในอุโมงค์ขนาดจริง แล้วทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และ อัตราการปลดปล่อยความร้อน ด้วยเทคนิค enthalpy flow method เช่นเดียวกับ Funk et al.[4] ทำการทดสอบไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้าในโรงจอดรถ แบบครึ่งเปิดที่มีโครงสร้างเป็นเหล็ก โดยใช้รถยนต์ไฟฟ้าจริง และ Kang et al.[5] ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงและพฤติกรรมการลุกไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าสถานะกึ่งปิด ในขณะที่ Truchot et al.,[11] ทำการทดสอบจริงเพื่อศึกษาการปล่อยก๊าซพิษจากเพลิงไหม้ นอกจากการทดลองขนาดเต็มในสภาพจริงแล้ว การศึกษาโดยใช้วิธีการใช้แบบจำลองการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อจำลอง การไหลของของไหล และการถ่ายเทความร้อน (computational fluid dynamics) มีความนิยมแพร่หลายเป็นอย่างมาก ในการศึกษาเพลิงไหม้ โดยที่ Fire Dynamics Simulator (FDS) เป็นซอฟต์แวร์ หลักที่ใช้ในหลายงานวิจัย เช่นในการศึกษาของ Jang et al.[15] ใช้ FDS เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของก๊าซระยะเวลาการสัมผัสที่เกินมาตรฐาน AEGL และเวลาที่ผู้คน

สามารถอยู่รอดได้ (tenability time) Zhao et al. [16] ใช้ FDS ร่วมกับหัวฉีดละอองน้ำละเอียด (water mist) และการไหลของลมแบบ longitudinal ventilation เพื่อวิเคราะห์การควบคุมควันในอุโมงค์



รูปที่ 2 ตัวอย่างการกระจายของอุณหภูมิจากการจำลองด้วย FDS [7]

นอกจากนี้โปรแกรม Pyrosim มักถูกนำมาใช้ร่วมกับ FDS เพื่อจำลองไฟไหม้ที่เกิดจากแบตเตอรี่ ตัวอย่างที่ได้จากการจำลองดังแสดงในรูปที่ 2 [7] ทั้งนี้การศึกษาเพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า ด้วยแบบจำลอง CFD หรือ FDS มีการนำเข้าสู่ข้อมูลเพื่อทำการจำลองซึ่งที่มาของข้อมูลที่นำเข้าเพื่อการจำลอง มีทั้งการใช้ข้อมูลจากการทดลองจริง [1,4,5,10] ค่าที่มาจากแบบจำลองเชิงประจักษ์ เช่น การศึกษาของ Li et al.,[18] ใช้ค่า $HRR = 2 \times E^{0.6}$ โดยที่ตัวแปร E คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง นอกจากนี้ค่าที่ใช้ในการจำลองสามารถมาจาก ค่ามาตรฐาน FDS หรือ จากการทบทวนวรรณกรรม [1,18] และค่าที่มาจากข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่ เช่น การจำลองของ Barré et al. [2] อย่างไรก็ตาม การใช้แบบจำลองในการศึกษาเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า เพียงอย่างเดียวยังมีข้อจำกัดในหลายประการ เช่น เงื่อนไขต่างๆ ที่ระบุใน โปรแกรมยังไม่ถูกพัฒนาให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้าในสถานการณ์จริง ดังนั้นการใช้วิธีการศึกษาทั้งการทดลองและการจำลองร่วมกัน ถือเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ เช่น ใช้การทดลองในการเก็บข้อมูลพฤติกรรมไฟจริง เช่น อัตราการปลดปล่อยความร้อน ความเร็วลม อุณหภูมิและควัน แล้วใช้การจำลองขยายผลจากข้อมูลจริง

ไปยังสถานการณ์ต่างๆ เช่น พื้นที่อาคารต่างๆ รูปแบบการระบายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาของ Barré et al. [2] ได้ใช้การทดลองเพื่อกำหนดขอบเขต และสภาวะที่ต้องการศึกษา แล้วสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาความเสี่ยงต่อโครงสร้าง เช่น การลุกลามไปยังเสาคอนกรีต หรือรถที่อยู่ข้างเคียง

4. การอภิปราย ช่องว่าง และข้อขัดแย้งงานวิจัย

4.1 การปลดปล่อยความร้อนและอุณหภูมิ

หลายงานวิจัยระบุ ค่าการปลดปล่อยความร้อนจากเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า มีค่าสูงกว่าเพลิงไหม้ในรถยนต์สันดาปภายใน โดยในรถยนต์ไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มักมีค่าการปลดปล่อยความร้อนอยู่ระหว่าง 5-10 เมกกะวัตต์ และสูงถึง 30-50 เมกกะวัตต์ในรถไฟฟ้านาฬิกา เช่น รถบีทีเอส หรือ รถบรรทุกไฟฟ้า เพลิงไหม้จากรถไฟฟ้าสามารถเกิด jet flame และมีอุณหภูมิเพดาน (ceiling temperature) เหนือตำแหน่งเพลิงไหม้ ภายในอุโมงค์หรือที่จอดรถสูงถึง 900-1200 องศาเซลเซียสโดยระยะเวลาที่อุณหภูมิไปถึงค่าสูงสุดภายในไม่กี่นาที [1,3,4,5,6] ในขณะที่บางการศึกษา พบว่าค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด ของเพลิงไหม้รถยนต์ไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับรถยนต์สันดาปภายใน และการลุกไหม้ของแบตเตอรี่ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อผลรวมของค่าการปลดปล่อยความร้อนทั้งหมด [11,14] ทั้งนี้ความแตกต่างของผลการศึกษาที่ได้สามารถเกิดจาก ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า และแบตเตอรี่มีความแตกต่างกัน การกำหนดจุดเริ่มต้นของเพลิงไหม้ที่แตกต่างกันในแต่ละการศึกษาก็สามารถส่งผลให้ได้พฤติกรรมของเพลิงไหม้ และระยะเวลาของการพัฒนาเพลิงไหม้ที่แตกต่างกันได้เช่นกัน อีกทั้งปัจจัยสิ่งแวดล้อมของการทดสอบ ในวิธีการศึกษาทดสอบเพลิงไหม้เต็มรูปแบบจริง มักเกิดขึ้นในพื้นที่นอกอาคาร หรือห้องทดลองขนาดใหญ่ซึ่งสภาพแวดล้อมของการทดสอบยังไม่สอดคล้องกับพื้นที่เพดานต่ำในลานจอดรถ [4]

4.2 คิวและก๊าซพิษ

จากการทบทวน งานวิจัยพบการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์จากเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้ามีค่าความเข้มข้นสูงกว่าการไหม้ของรถยนต์สันดาปภายใน บางการศึกษาระบุ ค่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ อยู่ระหว่าง 200-300 กรัมต่อ

เหตุการณ์ ซึ่งค่าความเข้มข้นระดับนี้ ถือว่าเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์สันดาปภายในเพียงเล็กน้อย และไม่รุนแรง [4,11] ในขณะที่บางการศึกษาระบุ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์จากเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า มีปริมาณสูงมากถึง 600-1000 กรัมต่อเหตุการณ์ และในพื้นที่ลานจอดรถสามารถมีปริมาณสูงได้ถึง 400-500 ppm [3,5,15] ซึ่งความขัดแย้งของการศึกษาสองกลุ่มสามารถเกิดจากความแตกต่างกันของเคมีภายในแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกใช้ในแต่ละการศึกษา นอกจากนั้นสภาพแวดล้อมในการทดสอบก็ส่งผลต่อปริมาณก๊าซพิษที่วัดได้ โดยบางการศึกษาทำในพื้นที่โล่ง ในขณะที่บางการศึกษามีการติดตั้งท่อตรวจรวบรวม แล้วทำการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซพิษ ส่งผลให้ปริมาณที่วัดได้มีปริมาณมากกว่า ในส่วนของช่องว่างของการศึกษาการเกิดก๊าซพิษข้อมูลที่พิจารณาการเกิดก๊าซพิษจากวัสดุอื่น ในรถยนต์ยังมีจำกัด ทำให้ไม่สามารถสรุปได้อย่างเจาะจงว่า ปริมาณก๊าซพิษที่เกิดขึ้นเกิดจากแบตเตอรี่ เป็นหลักหรือจากส่วนประกอบอื่นในรถยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นสายไฟ ฉนวน หรือพลาสติก การปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ในระดับที่เป็นอันตรายสามารถเกิดขึ้นในเวลาไม่กี่วินาที ในพื้นที่ปิดและ กึ่งปิด การระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการแพร่กระจายของควันและความเข้มข้นของ ก๊าซพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในอุโมงค์ และที่จอดรถใต้ดิน

ในส่วนของความขัดแย้งกันของผลการศึกษาการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ในพื้นที่กึ่งปิด และปิด ด้านพฤติกรรมของเพลิงไหม้ ควันและก๊าซพิษ โดยเปรียบเทียบกับรถยนต์สันดาปภายใน ผลการศึกษาที่ระบุ ค่าการปลดปล่อยความร้อนสูงสุด และค่าความเข้มข้นของก๊าซพิษที่เกิดขึ้น มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจนำไปสู่การสนับสนุน มาตรฐานด้านความปลอดภัย เช่น ระบบดับเพลิงในอาคารจอดรถ การออกแบบระบบระบายควัน และระบบระบายอากาศ ที่ออกแบบสำหรับรถยนต์สันดาปภายใน ปัจจุบันมีความสามารถเพียงพอ และสามารถใช้งาน ครอบคลุม เพลิงไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า ในขณะที่ผลการศึกษาการเกิดเพลิงไหม้ในรถยนต์ไฟฟ้า ที่ให้ค่าความร้อนสูงสุด หรือปริมาณของก๊าซพิษมีปริมาณมาก และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาเพลิงไหม้ในรถยนต์สันดาปภายใน นำไปสู่ข้อเสนอแนะของการแก้ไข

ปรับปรุงมาตรฐาน การออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบระบาย อากาศในพื้นที่จอดรถเพดานต่ำ เปลืองไหม้จากรถยนต์ไฟฟ้า การเกิดก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เกิดขึ้นในปริมาณมากและ รวดเร็ว ระบบที่ใช้ตั้งควันจะต้องทำได้อย่างรวดเร็ว ค่าสำหรับ การออกแบบก็ควรที่จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง แก้ไขให้ สอดคล้องกับเปลืองไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น

4.3 วิธีการดับไฟจากรถยนต์ไฟฟ้า

การดับไฟจากการไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้า ยังไม่สามารถระบุ ได้ชัดเจนว่าระบบดับไฟแบบไหนเหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่ เฉพาะ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการเลือกใช้วิธีการ ไม่ว่าจะเป็น ระบบ sprinkler ระบบละอองฝอย หรือการใช้ fire blanket ในพื้นที่ที่มีความสูงต่ำ หรือโครงสร้างซับซ้อน เช่น อาคารจอด รถใต้ดิน หรืออาคารจอดรถแบบหลายชั้น ทั้งยังไม่พบ การศึกษาเชิงเปรียบเทียบที่เป็นระบบ (comparative suppression trials) ขาดการบูรณาการ การศึกษาโดย ส่วนมากเน้นวิศวกรรมอัคคีภัยด้านเดียว ยังขาดองค์ประกอบ เชิงพฤติกรรม เช่น การอพยพของผู้โดยสารหรือผู้ใช้อาคาร การอบรมเจ้าหน้าที่ดับเพลิง และการสื่อสารในสถานการณ์ ฉุกเฉิน นอกจากนี้ข้อกำหนดด้านกฎหมายยังไม่ครอบคลุม ความเสี่ยงเปลืองไหม้จากรถยนต์ไฟฟ้า อย่างแท้จริง หลาย ประเทศยังอิงการปฏิบัติ ตามมาตรฐานเดิมที่ออกแบบสำหรับ รถยนต์เชื้อเพลิงสันดาปภายใน การดับเพลิงที่รวดเร็วและมี ประสิทธิภาพ ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร และนัก ดับเพลิง รวมถึงการออกแบบระบบควบคุมในพื้นที่ปิด อย่างไร ก็ตามยังมีข้อจำกัด และช่องว่างของความรู้หลายประการที่ควร ได้รับการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยกระดับความปลอดภัยเชิงระบบ

การทบทวนวรรณกรรมทั้ง 18 รายการ เมื่อวิเคราะห์ตาม หลักการ SWOT สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1) จุดแข็ง จากการทบทวนเปลืองไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าใน พื้นที่กึ่งปิด และปิด พบมีข้อมูลเชิงประจักษ์จากทั้งการทดลอง จริงเต็มรูปแบบ และการจำลองด้วย CFD ทำให้สามารถใช้ ผลการวิจัยในการกำหนดเกณฑ์ขั้นต่ำของการระบายอากาศ สำหรับอาคารที่จอดรถ หรือกำหนดมาตรฐานของการติดตั้ง สถานีชาร์จแบตเตอรี่ของกรมโยธา และผลวิจัยสามารถใช้ ปรับปรุงแบบจำลองไฟสำหรับการศึกษาในอนาคต

2) จุดอ่อน ข้อมูลที่ไม่สม่ำเสมอ ขาดการทวนสอบ หรือ ไปคนละทิศทางการทำให้สรุปผลข้ามผลงานได้ยาก อีกทั้งข้อมูล การศึกษาการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ในประเทศ มีน้อยมากทำให้ยังไม่มีการกำหนดความเสี่ยงต่อเจ้าหน้าที่ ดับเพลิงชัดเจน

3) โอกาส ผลการวิจัยควรใช้เป็นข้อมูลสนับสนุน สำหรับ การวางแผนเส้นทางสู่นโยบาย EV30@30 และจัดทำ กฎกระทรวงเฉพาะด้านความปลอดภัยสำหรับ สถานีจอด รถไฟฟ้าในอาคาร และที่ชาร์จ

4) อุปสรรค นำไปสู่สู่นโยบายเพื่อบรรเทาความเสี่ยง เนื่องจากเทคโนโลยีของรถยนต์ไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึง ค่าการปลดปล่อยความร้อน หรือก๊าซพิษที่เกิดขึ้น ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงควรกำหนดการทบทวนนโยบาย หรือการปรับปรุงข้อมูลให้ถี่มากขึ้น

โดยภาพรวมแล้วข้อมูลจากการศึกษาการเกิดเปลืองไหม้ ของรถยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่กึ่งปิด และปิด สามารถเชื่อมโยงสู่ ข้อเสนอทางนโยบายของประเทศไทยได้อย่างชัดเจน โดยผล วิจัยทางด้านค่าการปลดปล่อยความร้อน HRR ค่าการปล่อย ก๊าซพิษขณะเกิดเปลืองไหม้ และ tenability time เหล่านี้ สามารถสนับสนุนการออกแบบมาตรฐานอาคารที่จอดรถ และ สถานีชาร์จในอาคาร รวมทั้งการกำหนด การระบายอากาศ การดับเพลิง และการจัดการก๊าซพิษภายใต้สู่นโยบาย EV30@30 ของประเทศไทย ทั้งนี้จุดอ่อนและอุปสรรค เช่น ความไม่ สม่าเสมอของข้อมูลและการขาดการทวนสอบ ซึ่งให้เห็นถึง ความจำเป็นของการวิจัยเชิงทดลองเพิ่มเติมและการสร้างการ รายงานอุบัติเหตุเปลืองไหม้ของรถยนต์ไฟฟ้าระดับประเทศเพื่อ พัฒนากฎระเบียบต่อไป

5. สรุป

แม้ว่างานวิจัยด้านอัคคีภัยจากรถยนต์ไฟฟ้าจะได้รับความ สนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเพื่อตอบสนองกับการ เติบโตของการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ยังทำได้จำกัด และยังมีช่องว่าง ข้อขัดแย้ง ที่ ต้องได้รับการศึกษาเพิ่มไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมการลุกไหม้ การ แพร่กระจายของก๊าซพิษ ประสิทธิภาพของระบบดับเพลิงใน สถานการณ์จริง เพื่อให้มีข้อมูลมากขึ้น สำหรับการกำหนด

กฎหมาย มาตรฐาน การวางแผน การออกแบบจุดติดตั้งสถานีชาร์จรถไฟฟ้าในระยะห่าง หรือพื้นที่ที่ปลอดภัย และการเชื่อมโยงกับข้อกำหนดด้านกฎหมาย การอุดช่องว่างเหล่านี้จะช่วยสร้างแนวทางการออกแบบที่ยั่งยืน และปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร และเจ้าหน้าที่ดับเพลิงในยุคของการเติบโตของรถยนต์ไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gavryliuk A, Yakovchuk R, Chaly D, Lemishko M, Tur N. Determination of fire protection distances during a Tesla Model S fire in a closed parking lot. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2023;2(10):39–46.
- [2] Barré PA, Carlotti P, Guibaud A. Numerical investigation of the influence of thermal runaway modelling on car park fire hazard and application to a lithium-ion manganese oxide battery. *Fire Safety Journal*. 2024;150:104284.
- [3] Sturm P, Fößleitner P, Fruhwirt D, Heindl SF, Heger O, Galler R, et al. Dataset of fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Data in Brief*. 2023;46:108839.
- [4] Funk E, Flecknoe-Brown KW, Wijesekere T, Husted BP, Andres B. Fire extinguishment tests of electric vehicles in an open sided enclosure. *Fire Safety Journal*. 2023;141:103920.
- [5] Kang S, Kwon M, Choi JY, Choi S. Full-scale fire testing to assess the risk of battery electric vehicle fires in underground car parks. *Fire Technology*. 2025;61:4133–4163.
- [6] Caliendo C, Russo I, Genovese G. A numerical evaluation for estimating the consequences on users and rescue teams due to the fire of an electric bus in a road tunnel. *Applied Sciences*. 2024;14(20):9191.
- [7] Li X, Cheng Y. Comparative study on fire resistance of different thermal insulation materials for electric vehicle tunnel fire. *Applied Sciences*. 2024;14(24):11533.
- [8] Boehmer HR, Klassen MS, Olenick SM. Fire hazard analysis of modern vehicles in parking facilities. *Fire Technology*. 2021;57:2097–2127.
- [9] Gavryliuk A, Yakovchuk R, Ballo Y, Rudyk Y. Thermal modeling of the electric vehicle fire hazard effects on parking building. *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023;11(3):421–434.
- [10] Brzezinska D, Bryant P. Performance-based analysis in evaluation of safety in car parks under electric vehicle fire conditions. *Energies*. 2022;15(2):649.
- [11] Truchot B, Fouillen F, Collet S. An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fire. *Fire Safety Journal*. 2018;97:111–118.
- [12] Bai Z, Zhao X, Song H, Zhang Y, Yao H, Zhang J. Prediction of back-layering length and critical velocity with lithium-ion battery car fires in tunnel. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*. 2024;54(6):1033–1045. Available from: <https://www.iaeng.org/IJAM>
- [13] Stan C, Năstase I, Bode F, Calotă R. Smoke and hot gas removal in underground parking through computational fluid dynamics: a state of the art and future challenges. *Fire*. 2024;7(11):375.
- [14] Connell W, Li S, Del Solar J, Raza H, Louie A. Investigation of fire hazard mitigation, control and ventilation for battery electric bus fire in enclosed vehicular facility. *ASHRAE Transactions*. 2024;130(C022):200–214. Available from: <https://www.ashrae.org>
- [15] Jang J, Jeon J, Oh CB. Risk assessment of toxic gas dispersion from electric vehicle fires in underground apartment parking garages using numerical analysis. *Fire*. 2025;8(3):96.
- [16] Bai Z, Zhao X, Zhang J, Song H, Qin H, Yao H. Research on the smoke diffusion with new energy vehicle fire in tunnel under the action of fine water mist and longitudinal ventilation.

IAENG International Journal of Applied Mathematics. 2025;55(6):1495–1501.

- [17] Bai Z, Li J, Qin H, Yao H, Zhao X. Research on the smoke flow law of new energy vehicle fire in tunnel. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*. 2025;55(4):927–932.
- [18] Li X, Chen S, Wei R, Huang S, Ren Z. The effect of water mist nozzle settings on fire suppression of electric vehicles in garages. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;60:104803.