

การลอยตัวของฝุ่นบนถนนจากรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้การทดสอบแบบคงตัวและการขับขี่เสมือนจริง

ศิริศักดิ์ พงษ์สมบัติ วรวัฒน์ ทรงกิตติ และ เอกไท วิโรจน์สกุลชัย*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

รับบทความ 27 กุมภาพันธ์ 2566 แก้ไขบทความ 4 มิถุนายน 2566 ตอบรับบทความ 29 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันดีว่ารถยนต์สันดาปภายในเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญที่สุด ซึ่งในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยได้ให้ความสำคัญถึงปัญหานี้และสนใจที่จะเปลี่ยนมาใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางวิจัยพบว่ารถยนต์ไฟฟ้ายังคงมีการปล่อย PM (Particulate Matter) ที่ไม่ได้มาจากไอเสีย (Non-Exhaust PM Emission) ได้แก่ การสึกหรอของยาง (Tyre wear) การสึกหรอของระบบเบรก (Brake wear) การสึกหรอของพื้นผิวถนน (Road surface wear) และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน (Resuspension of road dust) นอกจากนี้ยังพบว่ามีตัวแปรสำคัญคือน้ำหนักของรถยนต์ และความเร็วของรถยนต์ที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสีย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปล่อย PM แบบ Non-Exhaust ที่เกิดจากรถยนต์ไฟฟ้าโดยติดตั้งอุปกรณ์วัด ปริมาณความเข้มข้นของ PM แบบ Real-time ที่บริเวณด้านหลังของล้อหน้าซ้ายในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบ 3 รูปแบบ คือความเร็วในการขับขี่แบบคงที่ การเบรกรถยนต์ตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 และการทดสอบในวัฏจักรการขับขี่เสมือนจริง ซึ่งแต่ละการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกต่างกัน 200 kg จากการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบพบว่า เมื่อรถยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยของ PM สุกชัดอย่างชัดเจน โดยในการทดสอบแบบความเร็วคงที่พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน ความเร็วที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยของ PM₁₀ เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 km/hr พบว่าการปลดปล่อยของ PM₁ และ PM_{2.5} จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่จะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงการปลดปล่อยของ PM₁₀ เท่านั้น ในการเบรกดตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 น้ำหนักที่บรรทุกเพิ่มขึ้น 200 kg ส่งผลต่อการปลดปล่อย PM เพิ่มขึ้นเกือบสองเท่า และในการทดสอบแบบวัฏจักรการขับขี่เสมือนจริง การเร่งความเร็วเพื่อออกตัวและเบรกเพื่อชะลอความเร็วส่งผลให้การปลดปล่อยของ PM จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้สภาพพื้นผิวถนนที่สกปรกยังเป็นปัจจัยสำคัญในการปลดปล่อยของ PM ที่เพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ : มลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสีย; รถยนต์ไฟฟ้า; ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2797 0999 ต่อ 1839, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: fengeka@ku.ac.th

Resuspension of Road Dust from Electric Vehicles under Steady and Real-world Driving Tests

Sirasak Pong-a-mas Worawat Songkitti and Ekathai Wirojsakunchai*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road Ladyao, Chatuchak District Bangkok, Thailand 10900

Received 27 February 2023; Revised 4 June 2023; Accepted 29 June 2023

Abstract

Internal combustion engines are considered as one of the most important major causes of air pollution. Many countries including Thailand pay attention to this problem and support electric vehicle usages for emission reductions. However, past literatures indicated that electric vehicles also emitted Particulate Matter (PM) via non-exhaust emissions. These included tyre wear, brake wear, road surface wear, and resuspension of road dust. Weight and speed of vehicles were found out as the major variable on this non-exhaust PM emissions. In the current study, non-exhaust PM emissions from an electric vehicle were measured by installing a real-time PM concentration measuring device in the back of the front left wheel while the vehicle was moving. There were three types of tests: constant speed test, ISO 21994:2007 standard brake test, and real-world driving cycle test. In each type of tests, payloads were varied. From the experimental data in all tests, it has been clearly seen that increasing payloads on the tested vehicle resulting in changes in PM emissions. With the same payload, the amounts PM10 emissions increase when the vehicle speeds are varied from 40 to 80 km/hr. However, varying speed do not affect the amounts of PM1 and PM2.5 at the speed of 60 and 80 km/hr. Only the increase of PM10 emissions is observed. In ISO 21994:2007 standard brake test, additional payload of 200 kg results in almost half of PM emissions increase. In the real-world driving test, braking sequences (vehicle was accelerated and stopped) tremendously affects the amount of PM emissions. In addition, the condition of road surface also impacts the amounts of resuspended PM emissions.

Keywords : Non-exhaust exhaust emissions, Electric vehicles, Particulate Matters

* *Corresponding Author. Tel.: +66 2797 0999, E-mail Address: fengeka@ku.ac.th*

1. บทนำ

ฝุ่นละออง Particulate Matter (PM) เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่เป็นปัญหาอย่างมากในด้านของสุขภาพมนุษย์ โดยทั่วไป PM มักถูกแบ่งออกเป็น PM₁, PM_{2.5} และ PM₁₀ ซึ่งใช้แทนในการเรียกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร, 2.5 ไมโครเมตร และ 10 ไมโครเมตร ตามลำดับ [1], [2]-[6] แหล่งที่มาหลักของ PM สามารถพบได้ในเขตเมือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่มีการจราจรที่แออัดหนาแน่น ซึ่งหนึ่งในกลยุทธ์ที่ถูกนำมาใช้ในหลากหลายประเทศ รวมถึงในประเทศไทยเพื่อปรับปรุงดัชนีคุณภาพอากาศคือการส่งเสริมนโยบายให้หันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้าโดยได้รับเสนอให้เป็นวิธีการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [7]

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อจำลองผลกระทบของรถยนต์ไฟฟ้าต่อคุณภาพอากาศ [8], [9] พบว่าการหันมาใช้รถยนต์ไฟฟ้าไม่สามารถลดการปล่อย PM อย่างมีนัยสำคัญได้เนื่องมาจากความสำคัญของการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสีย Non-Exhaust PM Emission จากการตรวจเอกสารเบื้องต้นพบว่ารถยนต์ไม่เพียงแต่ปล่อย PM ที่เกิดจากไอเสีย แต่ยังปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากไอเสียอีกด้วย เช่น การสึกหรอของยาง (Tyre Wear) การสึกหรอของระบบเบรก (Brake wear) การสึกหรอของพื้นผิวถนน (Road Surface Wear) และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน (Resuspension of Road Dust) [10]-[13] การปล่อยมลพิษที่ไม่ได้เกิดจากไอเสียเหล่านี้มักจะมี PM₁₀ เป็นส่วนใหญ่ แต่ส่วนที่สำคัญของการปล่อยมลพิษยังมี PM_{2.5} อีกเช่นกัน โดยลักษณะทางเคมีของการปล่อย PM ที่ไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้แตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) และอื่นๆ [14], [15]-[21] การสึกหรอของถนนและการสึกหรอของยางเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างดอกยางกับพื้นผิวถนน การสึกหรอของเบรกเกิด

จากการเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรก และการลอยตัวของฝุ่นบนถนน เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์กับพื้นผิวถนน [22] โดยน้ำหนักของรถยนต์จะมีอิทธิพลต่อตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งรถยนต์ไฟฟ้ามีน้ำหนักมากกว่ารถยนต์สันดาปภายใน 24% [23] จึงส่งผลให้รถยนต์ไฟฟ้ายังคงเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสีย

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปล่อยมลพิษไม่ได้เกิดจากไอเสียในรถยนต์ไฟฟ้า โดยทำการทดสอบในช่วงความเร็วคงที่ ทดสอบในมาตรฐานการเบรก (ISO 21994:2007) และทดสอบในวัฏจักรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง (Real World Driving Cycle) ซึ่งแต่ละการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกเพื่อศึกษาผลกระทบปริมาณการปล่อย PM กับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยในการทดสอบนี้จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มข้นของ PM แบบ Real-time ที่ฟังก์กระจายบริเวณด้านหลังล้อหน้าซ้ายของรถยนต์ไฟฟ้า ขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อย PM จากรถยนต์ดังกล่าว โดยการวัด PM ในงานวิจัยนี้เป็นวิธีการวัดการลอยตัวของฝุ่นบนถนนที่เกิดจากรถยนต์ [24] ไม่ได้ใช้วิธีการวัดการสึกหรอของเบรกตรงที่ดุมล้อของรถยนต์ [25] นอกจากนี้ระยะทางที่ใช้ในการทดสอบรถยนต์ในงานวิจัยนี้มีระยะทางที่ไม่มากนัก จึงได้ไม่คิดผลกระทบของการสึกหรอที่มาจากยางล้อรถยนต์ การทดสอบทำขึ้นในช่วงเวลากลางคืนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการจราจรที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 รถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าเอสยูวีที่มีระบบขับเคลื่อนเฉพาะล้อหน้าเท่านั้น โดยที่รถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้รับการบำรุงรักษาตรวจเช็ค

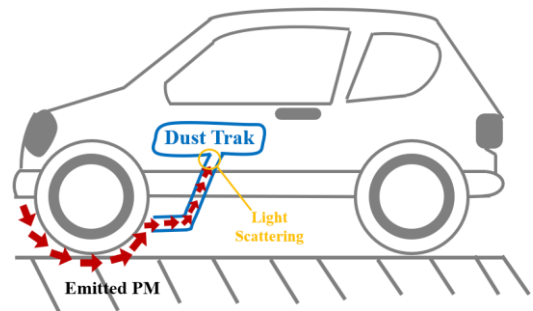
ระยะตามมาตรฐานรวมถึงแรงดันลมยางที่เติมตามสเปกที่ตัวรถยนต์ไฟฟ้ากำหนด โดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ไฟฟ้าทดสอบในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะของรถยนต์ไฟฟ้า

รายละเอียด	ข้อมูลทางเทคนิค
มิติ	
ความยาว (มิลลิเมตร)	4,314
ความกว้าง (มิลลิเมตร)	1,089
ความสูง (มิลลิเมตร)	1,624
ระยะช่วงล้อ (มิลลิเมตร)	2,585
ระยะห่างระหว่างล้อคู่หน้า / หลัง (มิลลิเมตร)	1,526 / 1,539
ระยะต่ำสุดจากพื้น (มิลลิเมตร)	161
ขนาดล้อ และยาง	
	ล้ออัลลอยด์ 17 นิ้ว 215 / 50 R17
น้ำหนักกรด (กิโลกรัม)	1,590
สมรรถนะ	
ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า	Permanent Magnet Synchronous Motor
ประเภทแบตเตอรี่	Lithium – Ion Battery
กำลังสูงสุด (แรงม้า (กิโลวัตต์))	150 (110)
แรงบิดสูงสุด (นิวตัน - เมตร)	350
ความจุแบตเตอรี่ (กิโลวัตต์ - ชั่วโมง)	44.5
ระยะทางวิ่งสูงสุด (NEDC Mode) (กม.)	337
ระบบพวงมาลัย และระบบช่วงล่าง	
ระบบพวงมาลัย	แร็คแอนด์พีนีเยน ควบคุมด้วยไฟฟ้า (EPS)
รัศมีวงเลี้ยวแคบสุด (เมตร)	5.6
ระบบช่วงล่างหน้า	อิสระแมคเฟอร์สันสตรัท พร้อมเหล็กกันโคลง
ระบบช่วงล่างหลัง	ทอร์ชันบาร์
ระบบเบรคหน้า	ดิสก์เบรคพร้อมช่องระบายความร้อน
ระบบเบรคหลัง	ดิสก์เบรค

2.2 การเก็บตัวอย่าง

การทดลองได้ทำการใช้อุปกรณ์ตรวจจับอนุภาคฝุ่นละออง Dust Trak DRX 8533 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ $\pm 0.1\%$ และเครื่องมือชนิดนี้ได้มีการตั้งค่า Isokinetic Sampling ภายในตัวเครื่อง โดยมีการไหลในท่อแบบคั่งที่ (Choked flow) [26] ซึ่งแผนผังการทดลองแสดงดังในรูปที่ 1 โดยได้ทำการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งด้านหลังยางของล้อหน้าซ้ายของรถยนต์ไฟฟ้างดรูปที่ 2 ในการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างในเวลากลางคืนเพื่อลดการปนเปื้อนของ PM ที่อาจปลดปล่อยมาจากรถยนต์คันอื่นในเวลาที่ทำการทดสอบ โดยทุกการทดสอบจะทำการทดสอบในสภาพถนนที่แห้งสนิท



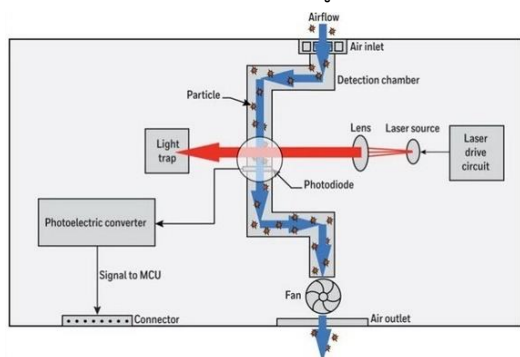
รูปที่ 1 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด

Dust Trak DRX 8533 เป็นอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM ที่สามารถวัดความเข้มข้นในแต่ละขนาดของอนุภาคได้ในเวลาเดียวกัน ค่าที่วัดได้จะแสดงผลแบบ Real Time ซึ่งสามารถวัดอนุภาคได้พร้อมกันทั้ง 4 ขนาดได้แก่ PM1, PM2.5, PM4 และ PM10 โดยจะแสดงผลการตรวจวัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีช่วงการตรวจวัด 0.001 ถึง 150 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

หลักการทำงานของ Dust Trak DRX 8533 จะมีอุปกรณ์ปล่อยแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับค่าการสะท้อนแสงถูกวางไว้ให้ลำแสงของทั้งสองอุปกรณ์ตัดกันตรงรูปออดี้ (Light Scattering) โดยหลักการการตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองนั้นจะทำได้ด้วยการใช้ปั๊มดูดอากาศเข้าไปในตัวเซนเซอร์แล้วใช้เลเซอร์ตรวจจับ เมื่อเลเซอร์ตรวจพบอนุภาคฝุ่นละออง แสงเลเซอร์ที่กระทบตัวอนุภาคจะหักเหอยู่ในรูปคลื่นแสงที่มีลักษณะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคฝุ่นละอองโดยได้แสดงถึงลักษณะตัวอย่างหลักการทำงานของเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่างการทำงานของเครื่องมือวัด [27]

2.3 กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บค่าและบันทึกผลโดยมีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

2.3.1 น้ำหนัก

จากการศึกษาในงานวิจัยพบว่า น้ำหนักของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เพิ่มการปล่อยอนุภาค

มลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสียเพิ่มขึ้น [23] โดยในการทดสอบนี้ได้ทำการเพิ่มภาระโหลด (Payload) ของรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อศึกษาความแตกต่างของการปล่อยมลพิษที่ไม่ได้มาจากไอเสียจากภาระโหลดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำหนักของรถยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดรวมถึง 1 คนขับ คือ 1,663 กิโลกรัม จากนั้นจะทำการเพิ่มน้ำหนักประมาณ 200 กิโลกรัม ให้กับรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการนั่ง 4 ที่นั่งให้เต็มคันรถ ทำให้รถยนต์ไฟฟ้าน้ำหนักเป็น 1,863 กิโลกรัม

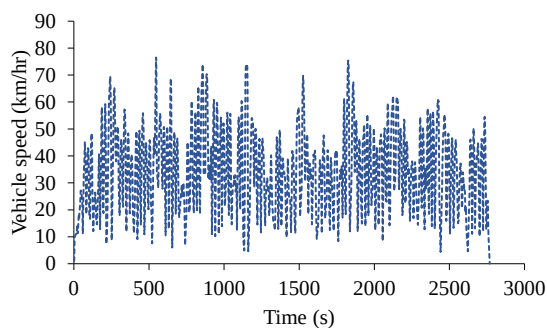
2.3.2 ความเร็วของรถยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับขี่

ทำการทดสอบผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ที่ส่งผลต่อการปล่อย PM ซึ่งจากงานวิจัยของ [24] ได้ทำการทดสอบด้วยความเร็วคงที่คือ 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าความเร็วที่ใช้ในการขับขี่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM เพิ่มขึ้น โดยเป็นการทดสอบในช่วงความเร็วต่ำ และเนื่องจากยังไม่มี การทดสอบที่ความเร็วสูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบด้วยความเร็วคงที่ที่ใช้ในการทดสอบคือ 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อศึกษาว่าในช่วงของความเร็วสูงนั้นส่งผลต่อปริมาณการปล่อย PM อย่างไร

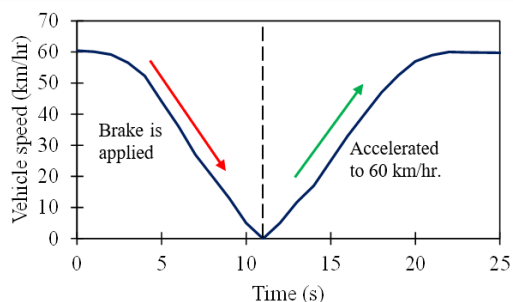
2.3.3 วงจรการขับขี่

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบลักษณะการปล่อย PM โดยใช้เงื่อนไขลักษณะการขับขี่สองรูปแบบ โดยแบบแรกคือ วงจรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง ดังที่แสดงในรูปที่ 4 โดยในงานวิจัยนี้ใช้เวลาเกือบ 3,000 วินาที ในการขับขี่ โดยเลือกขับขี่ในพื้นที่ปิด ซึ่งในวงจรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริงนี้ มีทั้งช่วงการชะลอความเร็ว และการเร่งความเร็ว เพื่อใช้ในการเลียนแบบวงจรการขับขี่บนท้องถนนจริงภายใต้พื้นที่การจราจรคับคั่ง ส่วนที่สอง คือ รูปแบบการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 ดังที่แสดงในรูปที่ 5 โดยยานพาหนะจะวิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นจะทำการเหยียบเบรกให้ความเร็วของ

ยานพาหนะเป็น 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อให้ยานพาหนะหยุดภายในระยะ 36.7 เมตร และจากนั้นก็ทำความเร็วของยานพาหนะให้เป็น 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอีกครั้ง โดยสามารถหาข้อมูล การเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 เพิ่มเติมได้จาก [28]



รูปที่ 4 ตัวอย่างรูปแบบวัฏจักรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริงที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5 การชะลอความเร็วจาก 60 – 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใต้การเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007

โดยตัวแปรต่างๆทั้งหมดที่ถูกกำหนดในแต่ละการทดสอบนี้จะทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้ในการบรรทุกคือ 1,663 กิโลกรัม (น้ำหนักเบา) และ 1,863 กิโลกรัม (น้ำหนักหนัก) เพื่อศึกษาถึงผลเปลี่ยนแปลงของปริมาณของ PM ที่ออกมาจากการขับขี่ที่มีน้ำหนักบรรทุกที่แตกต่างกัน โดยแต่ละตัวแปรและลักษณะการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

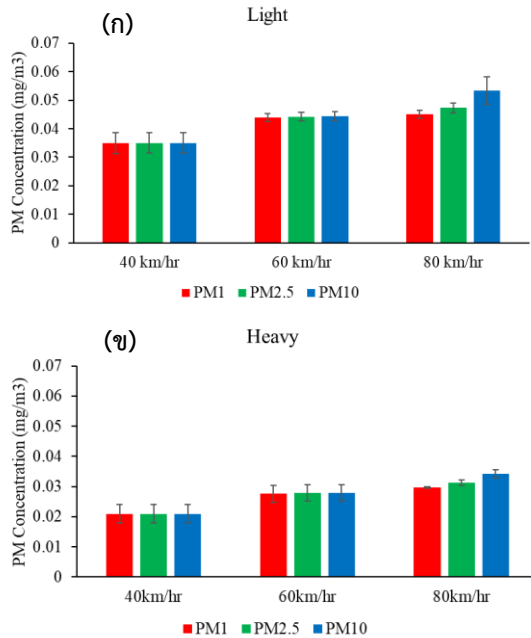
ตัวแปร	ลักษณะการทดสอบ
การขับขี่ช่วงความเร็วคงที่	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก
การขับขี่ตามเงื่อนไขจริง	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก
มาตรฐานการเบรก ISO 21994:2007	น้ำหนักเบา น้ำหนักหนัก

จากนั้นทำการหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและเฉลี่ยออกมาเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ย PM สู่ท่อในหน่วย มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ PM

ในการทดสอบนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ต่อการปล่อย PM ในช่วงของความเร็วสูงโดยการทดสอบจะขับขี่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการขับขี่ ได้แก่ สถิติ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่ท่อที่เพิ่มขึ้น แบบมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ระดับของ PM1 และ PM2.5 แบบมีนัยสำคัญ แต่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่ท่อที่ระดับของ PM10 เท่านั้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [29] ที่ระบุว่า การลอยตัวของฝุ่นบนถนนที่เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์กับพื้นผิวถนนเป็น PM ขนาดใหญ่ ดังที่แสดงในตารางที่ 3



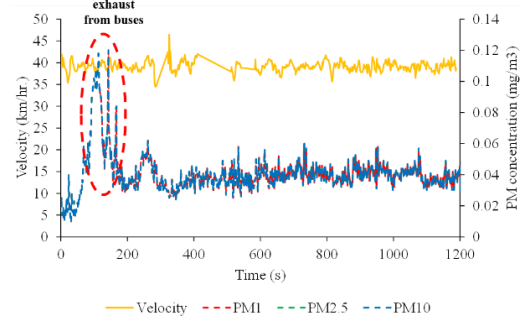
รูปที่ 6 ปริมาณความเข้มข้นของ PM สุทธิจากการเปลี่ยนแปลงความเร็ว: (ก) แบบน้ำหนักเบา (ข) แบบน้ำหนักหนัก

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติถึงผลกระทบของความเร็วต่อการปลดปล่อย PM10

Tests of Between-Subjects Effects					
Dependent Variable: PM2.5					
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	.001 ^a	5	.000	9.393	.008
Intercept	.013	1	.013	880.836	.000
Velocity	.000	2	7.46E-005	4.904	.055
Weight	.001	1	.001	36.171	.001
Velocity * weight	1.50E-005	2	7.50E-006	.493	.633
Error	9.13E-005	6	1.52E-005		
Total	.014	12			
Corrected Total	.001	11			

a. R Squared = .887 (Adjusted R Squared = .792)

เนื่องจากการทดสอบที่ความเร็วคงที่จำเป็นต้องใช้ระยะทางกว้าง จึงอาจมีตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับการทดสอบ เช่น ไอเสียจากยานพาหนะรอบๆ โดยได้ยกกรณีตัวอย่างมาจากการขับด้วยความเร็วคงที่แบบน้ำหนักเบา ช่วงความเร็วคงที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 7

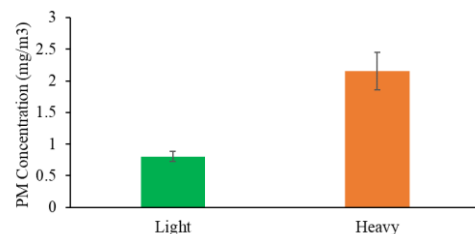


รูปที่ 7 ตัวอย่างค่าความเข้มข้นของ PM ของภาระน้ำหนักเบาในแต่ละช่วงเวลาของความเร็วคงที่ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2 มาตรฐานการเบรก ISO 21994:2007

เป็นการทดลองการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 โดยยานพาหนะจะวิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นจะทำการเหยียบเบรกให้ความเร็วของยานพาหนะเป็น 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อให้หยุดภายในระยะ 36.7 เมตรโดยการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาพื้นที่ใต้กราฟของผลการทดลองและเฉลี่ยออกมาเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยสุทธิของฝุ่นอนุภาคที่มีการฟุ้งกระจายขึ้นมาจากรถยนต์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 แบบน้ำหนักหนักนั้นจะทำให้การเพิ่มขึ้นของค่า PM10 โดยสุทธินั้นมากกว่าแบบน้ำหนักเบาประมาณ 50 % เนื่องจากน้ำหนักที่มากทำให้เกิดแรงที่กดที่พื้นผิวถนนมีค่ามาก ทำให้ทั้งการเบรกและการเร่งแบบน้ำหนักนั้นมีการตะกุกฝุ่นขึ้นมาจากพื้นและรุนแรงกว่าแบบน้ำหนักเบาซึ่งสอดคล้องกับงานของ [30]

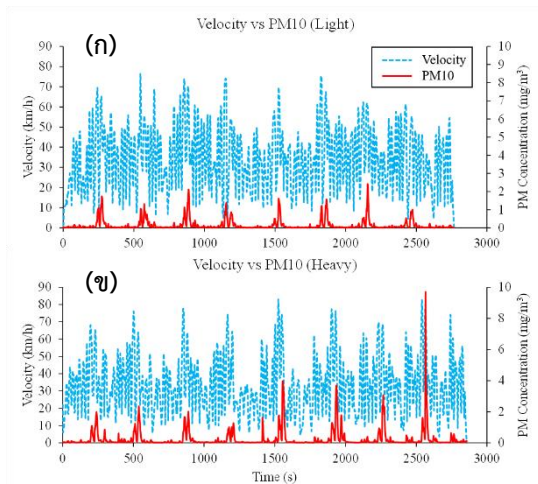
Braking from 60 to 0 km/h under ISO 21994:2007 standard.



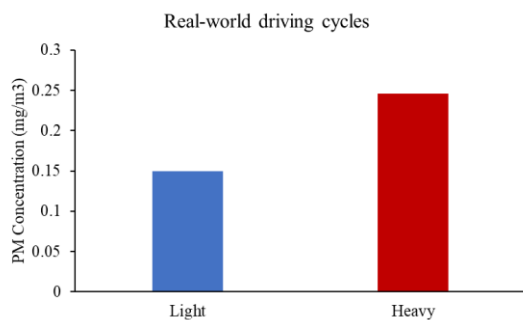
รูปที่ 8 ปริมาณความเข้มข้นของ PM10 โดยสุทธิจากการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007

3.3 การขับขี่ตามเงื่อนไขจริง

เป็นการทดลองการขับขี่เพื่อจำลองการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง โดยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 9 ปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ออกมาจากภาระหนักมีค่ามากกว่าภาระเบา แต่จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าตำแหน่งที่มีค่า PM สูงและเกิดเป็นลักษณะลูกคลื่นนั้นมาจากการขับวนซ้ำเป็นวัฏจักร เมื่อรถทดสอบขับไปที่ช่วงของถนนที่มีพื้นผิวถนนค่อนข้างสกปรกปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่วัดได้จะมีค่าสูง แต่เมื่อรถทดสอบขับไปที่ช่วงของถนนที่มีพื้นผิวค่อนข้างสะอาดปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่วัดได้ก็จะมิต่ำ โดยลักษณะของพื้นผิวถนนได้แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 พฤติกรรมการปล่อย PM ที่วัดได้ระหว่างวัฏจักรการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง: (ก) แบบน้ำหนักเบา (ข) แบบน้ำหนักหนัก



รูปที่ 10 ปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่ทิศจากการขับขี่ตามเงื่อนไขจริง



รูปที่ 11 ลักษณะพื้นผิวถนนที่ทำการทดสอบ: (ก) ช่วงที่ถนนสะอาด (ข) ช่วงถนนที่สกปรก

4. สรุป

ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเกิด Non-Exhaust PM Emissions จาการถยนต์ไฟฟ้าที่ทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกันสามารถสรุปได้ดังนี้

1.จากการทดสอบในการขับขี่ด้วยความเร็วคงที่พบว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM สู่ทิศที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สังเกตพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM1 และ PM2.5 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ PM10 จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2.จากการทดสอบการเบรกตามมาตรฐาน ISO 21994:2007 น้ำหนักที่บรรทุกส่งผลต่อการปล่อย PM

เป็นอย่างมาก ในขณะที่การเร่งความเร็วเพื่อออกตัว โดยความเข้มข้นของ PM จะเพิ่มขึ้นเกือบครึ่งหนึ่งจากเดิม นอกจากนี้ยังเพิ่มการปล่อย PM ที่มาจากการสึกหรอของเบรกในระหว่างการชะลอความเร็วอีกด้วย

3.จากการทดสอบการขับขึ้นเนินจริง น้ำหนักที่บรรทุกเพิ่มขึ้นส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของ PM ที่ออกมาจากรถยนต์ไฟฟ้า แต่ที่สังเกตได้ชัดเจนคือสภาพของพื้นผิวถนนที่มีความสะอาดและสกปรกที่ไม่เท่ากันมีผลต่อการฟุ้งกระจายของ PM เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ที่เกิดจากการตะกุกของล้อรถยนต์ไฟฟ้า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รหัสโครงการวิจัยเลขที่ 62/09/ME/D.Eng และมูลนิธิโทรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนทางการเงินในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. D. B. B. Guerreiro, F. Leeuw, V. Foltescu, J. Horalek. (2014, Jan) Air Quality in Europe - 2014 Report. European Environmental Agency Copenhagen. [Online] Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2014>.
- [2] A. Valavanidis, K. Fiotakis, T. Vlachogianni, "Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms," Journal of Environmental Science and Health, Part C, vol. 26, no. 4, pp. 339-362, 2008.
- [3] N. Li, M. Hao, R. F. Phalen, W. C. Hinds, A. E. Nel, "Particulate air pollutants and asthma: a paradigm for the role of oxidative stress in PM-induced adverse health effects," Clinical Immunology, vol. 109, no. 3, pp. 250-265, Dec. 2003.
- [4] U. Gehring, R. Beelen, M. Eeftens, G. Hoek, K. de Hoogh, J. C. de Jongste, M. Keuken, G. H. Koppelman, K. Meliefste, M. Oldenwening, D. S. Postma, L. V. Rossem, M. Wang, H. A. Smit, B. Brunekreef, "Particulate matter composition and respiratory health: the PIAMA Birth Cohort Study," Epidemiology, vol. 26, no. 3, pp. 300-309, Feb. 2015.
- [5] World Health Organisation. (2015, Aug 3). Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012. [Online]. Geneva. Available: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/AAP_BoD_results_March2014.pdf.
- [6] J. D. Sacks, L. W. Stanek, T. J. Luben, D. O. Johns, B. J. Buckley, J. S. Brown, M. Ross, "Particulate matter induced health effects: who is susceptible?," Environ Health Perspect, vol. 119, no. 4, pp. 446-454, Apr. 2011.
- [7] T. Murrells, Y. Pang. (2013, Feb 6). Emission Factors for Alternative Vehicle Technologies. [Online]. Available: http://naei.defra.gov.uk/resources/NAEI_Emission_factors_for_alternative_vehicle_technologies_Final_Feb_13.pdf.

- [8] A. Soret, M. Guevara and J. M. Baldasano, "The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain)," *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 51-63, Dec. 2014.
- [9] J. J. P. Kuenen, A. J. H. Visschedijk, M. Jozwicka and H. A. C. Denier van der Gon, "TNO-MACC_II emission inventory: a multi-year (2003 – 2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, no. 20, pp. 10963-10976, 2014.
- [10] P G Boulter, "A Review of Emission Factors and Models for Road Vehicle Nonexhaust Particulate Matter," TRL Project Report PPR065 for DEFRA, 2005.
- [11] A. Thorpe and R. M. Harrison, "Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 400, no. 1, pp. 270-282, Aug. 2008.
- [12] M. Mathissen, V. Scheer, R. Vogt, T. Benter, "Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire-road interface," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 34, pp. 6172-6179, Nov. 2011.
- [13] Victor R.J.H. Timmers and Peter A.J. Achten, "Non-Exhaust PM Emissions from Electric Vehicles," *Atmospheric Environment*, vol. 134, pp. 10-17, Jun. 2016.
- [14] Sanders, P.G., Xu, N., Dalka, T.M., Maricq, M.M., "Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests," *Environmental Science Technology*, vol. 37, no. 18, pp. 4060-4069, 2003.
- [15] Hjortenkrans, D.S.T., Bergbäck, B.G., Häggerud, A.V., "Metal emissions from brake linings and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005," *Environmental Science Technology*, vol. 41, no.15, pp. 5224–5230, 2007.
- [16] F. Amato, M. Pandolfi, M. Viana, X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, "Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 9, pp. 1650–1659, 2009.
- [17] F. Amato, M. Pandolfi, T. Moreno, M. Furger, J. Pey, A. Alastuey, N. Bukowiecki, A.S.H. Prevot, U. Baltensperger, X. Querol, "Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities," *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 6777-6787, 2011.
- [18] Gietl, J.K., Lawrence, R., Thorpe, A.J., Harrison, R.M., "Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road," *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 2, pp. 141–146, 2010.
- [19] Apeagyei, E., Bank, M.S., Spengler, J.D., "Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts," *Atmospheric Environment*, vol. 45, no. 13, pp. 2310–2323, 2011.

- [20] Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., Green, D.C., "Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non-exhaust traffic particles derived from atmospheric measurements," *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 12, pp. 6523–6529, 2012.
- [21] Hulskotte, J.H.J., Roskam, G.D., Denier van der Gon, H.A.C., "Elemental composition of current automotive braking materials and derived air emission factors," *Atmospheric Environment*, vol. 99, pp. 436–445, Dec. 2014.
- [22] A. Simons, "Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in Ecoinvent v3, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 21, no. 9, pp. 1299-1313, 2013.
- [23] E. Wirojsakunchai, C. Plengsa-Ard, and W. Songkitti, "Effects of Payload on Non-exhaust PM Emissions from Hybrid Electric Vehicle during Braking Sequences," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1013, no. 1, pp. 012002.
- [24] Noh, S.-Y., K.-R. Lee, J.-H. Noh, H.-S. Kim and S.-J. Yook, "Comparison of resuspended road dust concentration for identifying optimum sampling position on a mobile laboratory vehicle," *Aerosol Science and Technology*, vol. 55, no. 11, pp. 1230-1238, 2021.
- [25] W. Songkitti, E. Wirojsakunchai, and T. Aroonsrisopon, "Identifying Factors that Affect Brake Wear PM Emissions during Real-World Test Conditions," *SAE Technical Paper*, Mar. 2022.
- [26] Nertrium. (2015). Choked Flow. [Online]. Available: <https://neutrium.net/fluid-flow/choked-flow/>
- [27] W. Songkitti, S. Pong-A-Mas, C. Plengsa-Ard, and E. Wirojsakunchai, "Influence of Factors on Non-Exhaust PM Emissions from Motorcycle," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 46-53, Mar. 2022.
- [28] ISO, (2007). ISO 21994:2007. Passenger Cars — Stopping Distance at Straight-Line Braking with ABS — Open-Loop
- [29] D. R. Fitz, K. Bumiller, C. Bufalino, D. E. James, "Real-time PM10 emission rates from paved roads by measurement of concentrations in the vehicle's wake using on-board sensors part 1. SCAMPER method characterization," *Atmospheric Environment*, vol. 230, Jun. 2020.
- [30] Hagino, H., M. Oyama, and S. Sasaki, "Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating," *Wear*, vol. 334-335, p. 44-48, 2015.