

การประเมินค่าฝุ่นละอองจากเครื่องจักรหนักงานก่อสร้างและแนวทางการบรรเทา  
ผลกระทบเพื่อพัฒนาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน กรณีศึกษาโครงการก่อสร้าง  
ชั้นทางแบบผิวทางยืดหยุ่น

**Evaluating Particulate Matters from Heavy Construction Equipment and  
Mitigation Strategies for Sustainable Environment: Case Study of  
Flexible Pavement Projects**

ดาวรัชชาญ์ มะโน,<sup>1</sup> ชาริณี ลิ้มสวัสดิ์<sup>1\*</sup> และ นที อธิกคุณากร<sup>1</sup>  
*Daoratcha Mano,<sup>1</sup> Charinee Limsawasd<sup>1\*</sup> and Nathee Athigakunagorn<sup>1</sup>*

Received 6 January 2023, Revised 24 February 2023, Accepted 9 March 2023

**ABSTRACT**

Nowadays, an increase of the particulate matter (PM) impacts human health and life, especially in the construction industry, and road construction projects utilized with heavy equipment with a high fuel consumption rate that directly generates PM and pollution. This research, therefore, aimed to develop the PM evaluation model due to the equipment operations and to propose construction equipment allocation and management strategies for mitigating the environmental impact. Four different sustainable mitigation options were used: 1) biodiesel usage; 2) new equipment replacement; 3) hybrid engine replacement; and 4) retrofit device installation. The results presented that the amount of PM emission from the equipment operations in the project case study was 27.48 kg. In addition, the emission was reduced by approximately 10% when applying the biodiesel option. Moreover, selecting the proper hybrid and retrofit options could enable a complete and efficient PM reduction.

**Keywords:** Environmental impact, Particulate Matters, Sustainability, Heavy equipment, Construction projects

**บทคัดย่อ**

ปัจจุบันปริมาณฝุ่นละอองที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสุขภาพและการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น โครงการก่อสร้างประเภทงานทาง มีการใช้เครื่องจักรหนักซึ่งมีอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงสูงก่อให้เกิดมลภาวะอากาศและฝุ่นละอองโดยตรง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินค่าฝุ่นละอองและเสนอแนวทางการจัดสรรทรัพยากรเครื่องจักรเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากการจัดสรร

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

\* Corresponding author: Tel. 0-3435-1851, E-mail address: charinee.l@ku.th

ทรัพยากรเครื่องจักรร่วมกับการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม 4 แนวทาง คือ (1) การเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซล (2) การเลือกใช้เครื่องจักรรุ่นใหม่ (3) การเลือกใช้เครื่องจักรประเภทไฮบริด และ (4) การเลือกติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษไอเสีย ผลการวิจัยพบว่า การใช้ทรัพยากรเครื่องจักรในการก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาก่อให้เกิดฝุ่นละออง เท่ากับ 27.48 กิโลกรัม ทั้งนี้หากมีการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมโดยการเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซลส่งผลให้ค่าฝุ่นละอองลดลงประมาณ 10% ในขณะที่ การเลือกใช้เครื่องจักรรุ่นใหม่ การเลือกใช้เครื่องจักรประเภทไฮบริด และการเลือกติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษไอเสียที่เหมาะสมสามารถลดค่าฝุ่นละอองได้อย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูงสุด

**คำสำคัญ:** ผลกระทบสิ่งแวดล้อม ฝุ่นละออง การพัฒนาที่ยั่งยืน เครื่องจักรหนัก โครงการก่อสร้าง

## คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเผชิญวิกฤติมลพิษทางอากาศอย่างต่อเนื่องและทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะปัญหาฝุ่นละอองในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบว่าสถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็กเฉลี่ยทั้งปีมีแนวโน้มสูงขึ้นและเฉลี่ยที่ 24 ชั่วโมงสูงเกินค่ามาตรฐานตลอดระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาพบว่าโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ก่อให้เกิดฝุ่นละอองจากเครื่องจักรหนักก่อสร้างสองส่วนสำคัญ คือ ฝุ่นฟุ้งกระจายในพื้นที่ก่อสร้าง (สุภานนท์, 2563; EPA, 2012) และฝุ่นจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่เกิดจากเครื่องจักร (Singh *et al.*, 2003; Zeng, 2006; Lewis *et al.*, 2009; EPA, 2016b) จากการประกอบกิจกรรมต่างๆ เช่น กิจกรรมขนส่งวัสดุ งานดิน งานคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเครื่องจักรหนักเหล่านี้มีอัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงสูงและก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศซึ่งส่งผลให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชากร แรงงาน พื้นที่ก่อสร้างรวมถึงพื้นที่ใกล้เคียง (กรมควบคุมมลพิษ, 2562; Coburn, 2004; Boddi Reddy *et al.*, 2017; EPA, 2022)

จากยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศไทยตามแผนเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2560 - 2564 ในยุทธศาสตร์ที่ 4 เรื่องเกี่ยวกับการเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (สำนักนายกรัฐมนตรี, 2559) มีแนวคิดในการสร้างความมั่นคงและ

ยกระดับคุณภาพของสิ่งแวดล้อมที่จะรองรับการเติบโตทางสังคม เพื่อความเป็นอยู่ที่ดีของคนในประเทศพร้อมทั้งส่งเสริมการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ

เนื่องจากการวัดค่าปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ก่อสร้างจริงทำได้ยาก จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดค่า อีกทั้งการทราบปริมาณฝุ่นจะทำให้หลังจากการดำเนินกิจกรรมก่อสร้างและมีการปล่อยมลพิษแล้วเท่านั้น ดังนั้นการประเมินค่าฝุ่นละอองโดยที่ยังไม่มีการใช้เครื่องจักรจริงเพื่อก่อสร้างภายในพื้นที่ก่อสร้างจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-Event Simulation: DES) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการก่อสร้างที่มีความซับซ้อน (Martinez and Ioannou, 1999) ซึ่งวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การประยุกต์ใช้ DES ในการหาแนวทางการจัดการเครื่องจักรและแรงงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานพร้อมทั้งลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อสร้าง (Smith *et al.*, 1995; Martinez, 2009; Jiradamkerng, 2013) อีกทั้งการจัดสรรทรัพยากรเครื่องจักรและประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการก่อสร้าง (González and Echaveguren, 2012; Zhang, 2013; Zhang, 2015) และการประยุกต์ใช้ DES ในการคำนวณหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Ahn *et al.*, 2009; Ahn *et al.*, 2010; Zhang, 2015; Limsawasd and Athigakunakorn,

2017; Somboonpisan and Limsawasd, 2021) ซึ่งจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมในรูปของก๊าซเรือนกระจกและฝุ่นละอองในรูปของดัชนีคุณภาพอากาศทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในรูป

ของปริมาณฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ของเครื่องจักรหนัก ภายใต้แนวคิดการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยประยุกต์ใช้วิธีระบบการจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่องในการสร้างแบบจำลองกระบวนการทำงานของโครงการประเภทงานทาง และเสนอแนวทางการจัดสรรทรัพยากรเครื่องจักรเพื่อลดปริมาณฝุ่นละอองจากงานก่อสร้าง

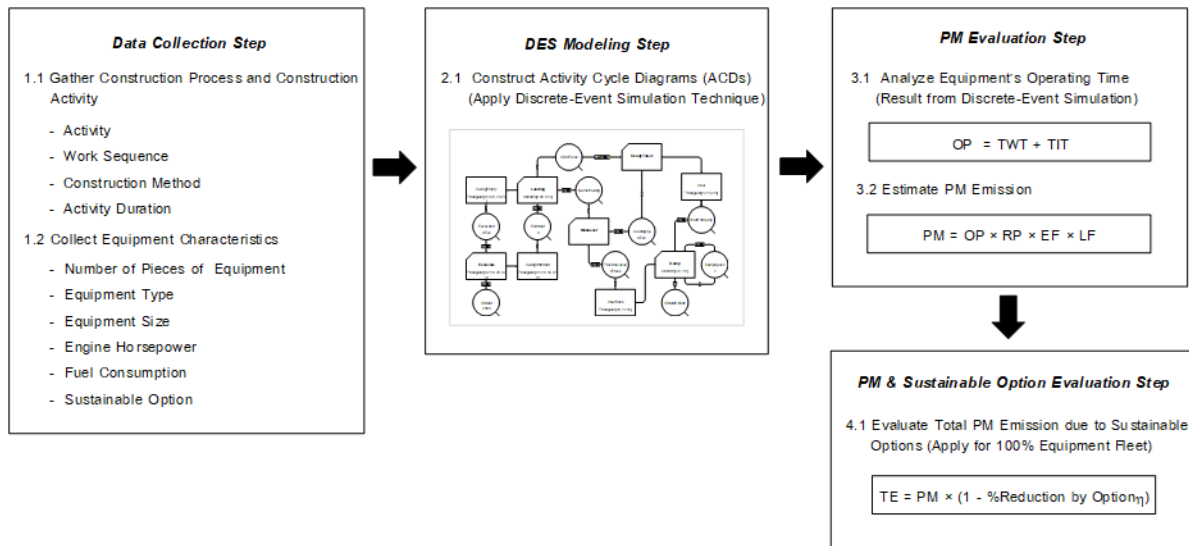


Figure 1 Research methodology framework

### ระเบียบวิธีการวิจัย

การประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในรูปของปริมาณฝุ่นละอองจากการใช้งานเครื่องจักรหนักในงานก่อสร้าง เพื่อการวางแผนงานก่อสร้างตามแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืน กรอบแนวคิดงานวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังรายละเอียดใน Figure 1

1. ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลจากโครงการก่อสร้างงานทาง (Data Collection)

ในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ โดยเป็นข้อมูลจากหน้างานจริงของโครงการก่อสร้างทางประเภทยึดหยุ่นแบบแอสฟัลต์คอนกรีต จำนวน 4 เลน ระยะทางเทียบเท่า 1 กิโลเมตร เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองกระบวนการก่อสร้าง 4 ชั้นทาง ได้แก่ ชั้นพื้นฐานทาง (Subgrade Layer) ชั้นรองพื้นทาง

(Subbase Layer) ชั้นพื้นทาง (Base Layer) และชั้นผิวทาง (Pavement หรือ Surface Layer) ตามลำดับ ด้วยการใช้อุปกรณ์ทั้งหมด 7 ประเภท ได้แก่ รถเกรด (Grader) รถบดอัดล้อยาง (Pneumatic Roller; PR) รถบดอัดล้อเหล็ก (Tandem Vibratory Roller; TVR) รถขุด (Excavator) รถบรรทุก (Truck) รถบรรทุกน้ำ (Water Truck) และรถปูผิวทาง (Paver) เป็นต้น สำหรับการประมาณค่าฝุ่นละอองแบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย ดังนี้

- ข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรม/กระบวนการก่อสร้าง ได้แก่ กิจกรรมและลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง วิธีการหรือเทคนิคการก่อสร้างที่ใช้ระยะเวลาดำเนินการแต่ละขั้นตอนก่อสร้าง เช่น กิจกรรมการขนวัสดุ (Material Delivering) ในขั้นตอนก่อสร้างชั้นพื้นทาง (Base Layer) ดังรายละเอียดใน Figure 2

- ข้อมูลเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง ได้แก่ รายการเครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ และ คุณสมบัติของเครื่องจักร เช่น จำนวนและขนาดเครื่องจักร กำลังแรงม้า ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เป็นต้น จากโครงการกรณีศึกษาใน Figure 2 มีการใช้วัสดุก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วยหินคลุกจึงมีการขนย้ายวัสดุ (Base Material Delivering) จากแหล่งวัสดุมายังพื้นที่ก่อสร้างจริงตามปริมาณที่ต้องการใช้ซึ่งในขั้นตอนนี้มีเครื่องจักร 2 ชนิด ได้แก่ รถขุด (Excavator) จำนวน 1 คันและรถบรรทุก (Truck) จำนวน 8 คัน ซึ่งจำนวนและกำลังแรงม้าของเครื่องจักรที่ใช้น้อยกว่าการจัดสรรทรัพยากรที่เหมาะสมที่เป็นไปได้

2. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการก่อสร้างแบบไม่ต่อเนื่อง (DES Modeling)

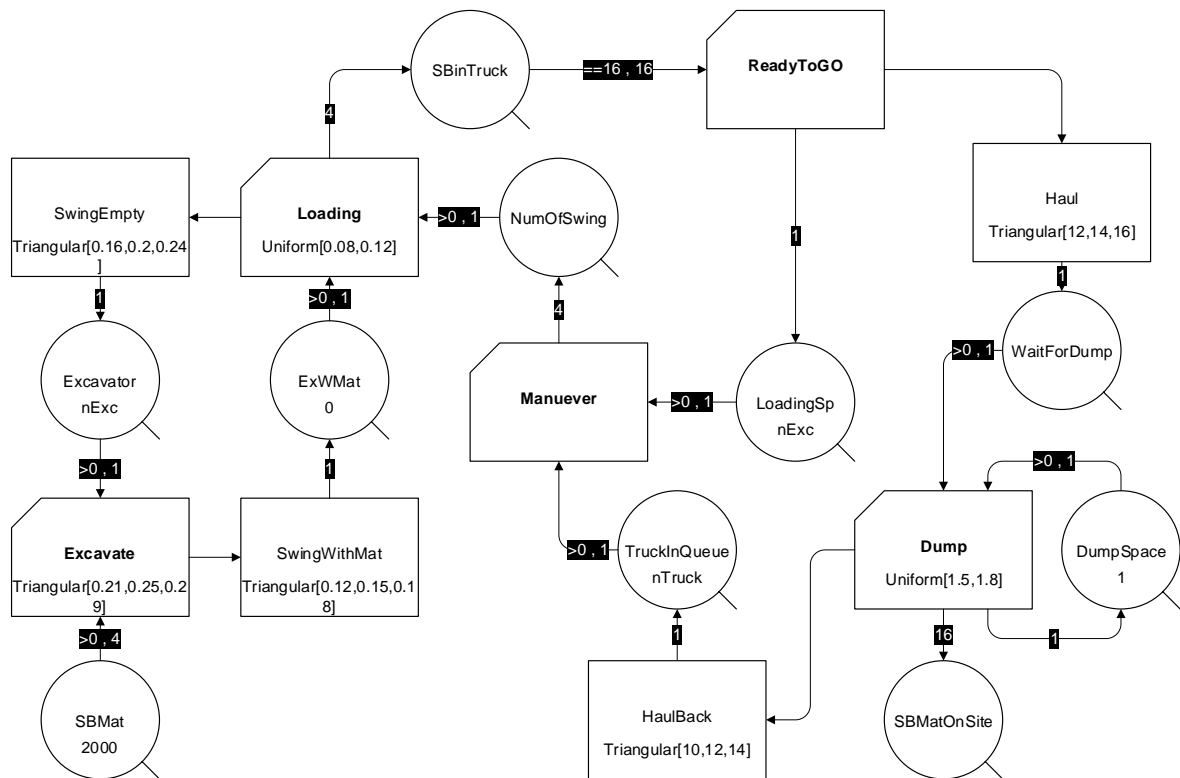


Figure 2 Activity Cycle Diagram (ACD) for the base layer-material delivering

3. ขั้นตอนการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการประเมินค่าฝุ่นละออง (PM Evaluation)

จากกิจกรรมการทำงานของเครื่องจักรหนักในงานก่อสร้าง ซึ่งสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันของ TWT, TIT, และอัตราการปล่อย PM ของ

เริ่มต้นด้วยการแตกงานออกเป็นกิจกรรมย่อย (Work Breakdown) ระบุข้อมูลของเครื่องจักรทั้งจำนวนและชนิดที่ใช้ในแต่ละกิจกรรม รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานในแต่ละรอบของกิจกรรมนั้นๆ (Activity Duration) จากนั้นเชื่อมโยงความสัมพันธ์ลำดับงานก่อน-หลังกิจกรรมในรูปแบบ Activity Cycle Diagram (ACD) เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการทำงานของเครื่องจักร (Total Working Time: TWT และ Total Idle Time: TIT), ระยะเวลารวมของโครงการ (Total Project Duration: TPD) และรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลกิจกรรมย่อย (Distribution)

เครื่องจักรมีแนวคิดสมการอ้างอิงจาก EPA (1998), Ahn *et al.* (2009), and Zhang H. (2015) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$OT = TWT + TIT \quad (1)$$

$$PM = OT \times EF \times RP \times LF \quad (2)$$

โดย OT แสดงถึง ระยะเวลาดำเนินการของเครื่องจักร (ชั่วโมง), TWT หมายถึง ระยะเวลาทำงาน (ชั่วโมง) ของเครื่องจักรสำหรับกิจกรรม, TIT หมายถึง ระยะเวลาว่างงาน (ชั่วโมง) ของเครื่องจักรสำหรับกิจกรรม, PM แสดงถึง ปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเครื่องจักร (กิโลกรัม), EF แสดงถึง ค่าแฟกเตอร์ของการปล่อย PM ของเชื้อเพลิงที่ใช้ (กรัม/แรงแม่-ชั่วโมง หรือกรัม/กิโลวัตต์-ชั่วโมง), RP หมายถึง กำลังของเครื่องยนต์ของเครื่องจักร (แรงแม่ หรือ กิโลวัตต์), LF หมายถึง ค่าแฟกเตอร์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจริงของกำลังเครื่องยนต์สูงสุดสำหรับเครื่องจักรหนักชนิดต่างๆ

4. ขั้นตอนการประเมินค่าฝุ่นละอองตามแนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (PM & Sustainable Option Evaluation)

EPA (2016a) นำเสนอแนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และเพื่อการปรับปรุงคุณภาพอากาศด้วยการลดการปล่อยมลพิษที่เป็นอันตรายจากเครื่องยนต์ดีเซลมีอยู่ 2 แนวทางหลัก ได้แก่ การเลือกใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานสะอาด (Cleaner Fuel Strategies) และการดำเนินการปรับปรุงเครื่องจักร (Equipment Modification Strategies) โดยมีรายละเอียดดังนี้

แนวทางที่ 1 (Option 1): การเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซลแทนการใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องจักรปกติ (Biodiesel Usage) ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลเป็นพลังงานสะอาดที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนจากธรรมชาติและเพิ่มสมรรถนะในการเผาไหม้ได้ดีขึ้นทำให้ปล่อยค่า PM ได้ลดลง โดยมีอัตราการลดการเกิดค่า PM เท่ากับ 10.10% (EPA, 2002)

แนวทางที่ 2 (Option 2): การเลือกใช้เครื่องจักรรุ่นใหม่ (Newer Machinery Replacement) มีอัตราการลดการเกิดค่า PM โดยแบ่งตาม tier 1, tier 2, tier 3, tier 4i, และ tier 4f เท่ากับ 0%, 62.50%, 62.50%, 97.50% และ 97.50% ตามลำดับ (Metham and Benjaoran, 2018) ซึ่งการเลือกใช้เครื่องจักร

รุ่นใหม่นี้หมายถึงการเลือกเปลี่ยนเครื่องจักรเก่า (Tier 1) ที่มีอยู่เดิมเป็นเครื่องจักรรุ่นใหม่ขึ้น (Tier 3 - 4) โดยเครื่องจักรรุ่นใหม่มีอัตราการปล่อยมลพิษไอเสียของเครื่องยนต์ต่ำกว่าการใช้เครื่องจักรรุ่นเก่าซึ่งส่งผลให้เกิดค่า PM ได้น้อยลง โดยอัตราการลดการเกิดค่า PM ของ Tier 3 และ Tier 4 เท่ากับ 62.50% และ 97.50% ซึ่งเทียบจาก Tier 1 ตามลำดับ

แนวทางที่ 3 (Option 3): การเลือกใช้เครื่องจักรไฮบริด (Hybrid Machinery Replacement) คือการเปลี่ยนมาใช้เครื่องจักรที่มีการผสมผสานการทำงานของ 2 แหล่งพลังงานขับเคลื่อนโดยในงานวิจัยนี้หมายถึงเครื่องยนต์ที่มีการสันดาปภายในร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ของแหล่งพลังงานที่สมบูรณ์ส่งผลให้สามารถลดการเกิดค่า PM ได้โดยตรง โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้เครื่องจักรไฮบริดเป็นเทคโนโลยีเครื่องยนต์ในระดับ Tier4f (Caterpillar, 2023) ซึ่งมีอัตราการลดการเกิดค่า PM เท่ากับ 97.50% และอัตราการประหยัดน้ำมันของเครื่องจักรประเภทไฮบริดสามารถลดการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel Reduction) ได้อย่างน้อยที่สุด 10% เมื่อเทียบกับเครื่องจักรหนักเดียวกันที่ไม่ใช่ไฮบริด (Metham and Benjaoran, 2018) ดังนั้นจึงส่งผลให้มีอัตราการลดการเกิดค่า PM เพิ่มขึ้นเท่ากับ 97.80%

แนวทางที่ 4 (Option 4): การเลือกติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษไอเสีย (Retrofit Devices Installation) ซึ่งสามารถเลือกติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษจากเครื่องยนต์ดีเซลหรือ PM แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ โดยมีอัตราการลดการเกิดค่า PM ดังนี้ (1) tier 3 + ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเครื่องยนต์ดีเซล (DOC) เท่ากับ 70%; (2) tier 3 + ตัวกรองอนุภาคฝุ่นละอองของเครื่องยนต์ดีเซล (DPF) เท่ากับ 96.30% ; และ (3) tier 3 + ตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาแบบตัวเลือก (SCR) + DPF เท่ากับ 96.30% (Metham and Benjaoran, 2018; EPA, 2021) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เป็นการติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษไอเสียร่วมกับเครื่องจักร Tier 3 เพื่อศึกษาหาแนวทางในลดการเกิดค่า PM ให้ได้

มากที่สุดและบรรลุผลตามแนวคิด Net Zero PM Emission

โดย Tier 1 หมายถึงเครื่องจักรที่ผลิตในปี 1997 – 2002, Tier 2 หมายถึงเครื่องจักรที่ผลิตในปี 2003 – 2006, Tier 3 หมายถึงเครื่องจักรที่ผลิตในปี 2006 – 2010, Tier 4i หมายถึง เครื่องจักรที่ผลิตในปี 2011 – 2013 และ Tier 4f หมายถึงเครื่องจักรที่ผลิตหลังจากปี 2014 จนถึงปัจจุบันด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องยนต์ที่แตกต่างกันตามมาตรฐานการควบคุมการปล่อยมลพิษไอเสียที่ถูกพัฒนาโดย NONROAD Engine Model Year (EMY) (EPA, 2010) ซึ่งอัตราการลดการเกิดค่า PM จะแตกต่างกันตามแต่ละ Tier ดังในแนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมแนวทางที่ 2 – 4 ที่กล่าวมาข้างต้น

จากแนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม สามารถแสดงเป็นฟังก์ชันของ PM และอัตราการลดการเกิดค่า PM ดังสมการที่ (3)

$$TE = PM \times (1 - \%Reduction \text{ by Option}_\eta) \quad (3)$$

โดย TE แสดงถึง ปริมาณฝุ่นละอองที่ลดลงหลังการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Option 1 - 4) และ %Reduction by Option $\eta$  แสดงถึง อัตราการลดการเกิดค่า PM ตามการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้สมมติให้มีการประยุกต์ใช้ Option (100%) ในเครื่องจักรทุกตัว

### ผลและวิจารณ์

1. ภาพรวมโครงการกรณีศึกษา: โครงสร้างชั้นทางแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Flexible Pavement)

เป็นโครงการก่อสร้างจริงที่ใช้เป็นกรณีศึกษาจากวารสารวิชาการที่ผ่านมาในอดีต โดยมีการตรวจสอบข้อมูลการทำงานของ

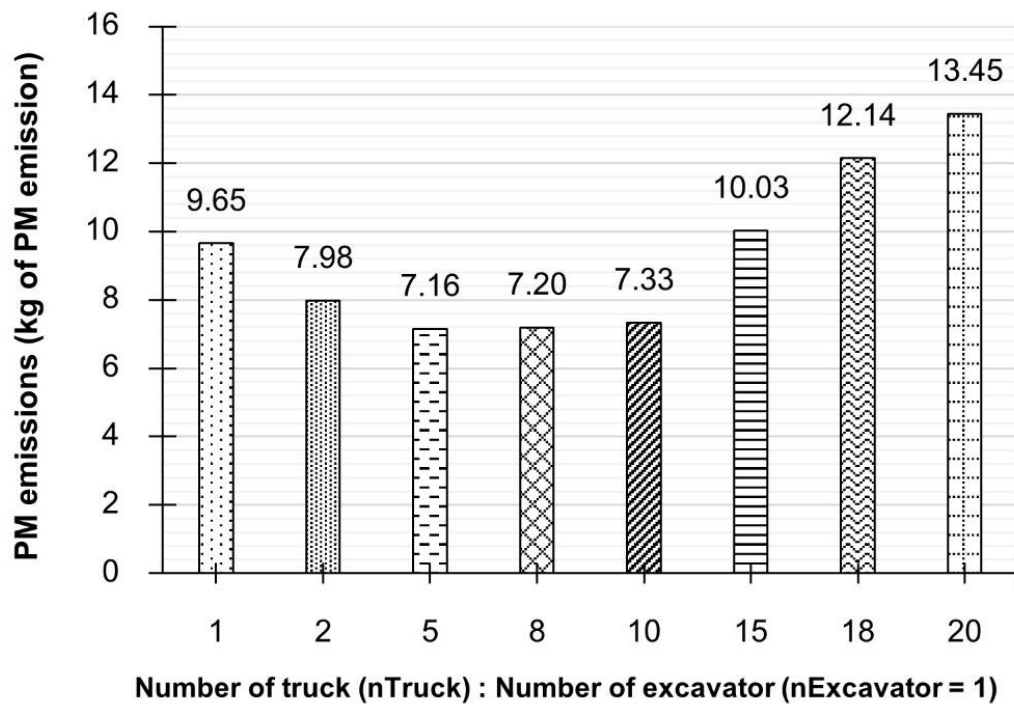
เครื่องจักรหนัก รวมถึงขั้นตอนและลำดับการทำงานก่อสร้างกับหน้างานจริงโดยวิศวกรผู้ควบคุมงานและผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนการดำเนินการก่อสร้างทางจากโครงการกรณีศึกษา สามารถจำแนกขั้นตอนได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ การก่อสร้างชั้นพื้นฐานทาง (Subgrade Layer) ชั้นรองพื้นทาง (Subbase Layer) ชั้นพื้นทาง (Base Layer) และชั้นผิวทาง (Pavement หรือ Surface Layer) ตามลำดับ

### 2. แบบจำลองการก่อสร้างงานทาง

จัดทำแบบจำลองในรูปแบบ Activity Cycle Diagram (ACDs) จำแนกขั้นตอนการทำงานในแต่ละชั้นโครงสร้าง โดย Figure 2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองกิจกรรมในรูปแบบของ ACD ซึ่งแสดงการขนย้ายวัสดุจากแหล่งวัสดุ (Material Delivering) เพื่อนำมาก่อสร้างชั้นพื้นทาง (Base Layer) โดยเครื่องจักรที่ใช้ในขั้นตอนนี้มีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ รถขุด (Excavator) และรถบรรทุก (Truck) และนำข้อมูลการวิเคราะห์ระยะเวลาการทำงานของเครื่องจักร (TWT และ TIT) ที่ได้จากการใช้เทคนิค DES ด้วยซอฟต์แวร์ EZStrobe เพื่อหาค่า PM ที่เกิดในขั้นตอนก่อสร้างชั้นพื้นทาง

จาก Figure 3 แสดงถึงค่า PM ที่เกิดขึ้นจากการเลือกใช้จำนวนรถบรรทุกที่ต่างกัน ซึ่งค่า PM ที่เกิดจากการเลือกใช้ต่อจำนวนรถบรรทุก (nTruck) เท่ากับ 5 คัน ต่อจำนวนรถขุด (nExcavator) เท่ากับ 1 คัน ส่งผลก่อให้เกิดค่า PM น้อยที่สุด เท่ากับ 7.16 กิโลกรัม ซึ่งสามารถคำนวณค่า PM ตามสมการ (1) และ (2) โดยกำหนดค่าแฟกเตอร์ของการปล่อย PM มีค่าเท่ากับ 0.60 กรัม/แรงม้า-ชั่วโมง (EPA, 2016b) ค่ากำลังของเครื่องยนต์ของรถขุดและรถบรรทุก เท่ากับ 150 และ 320 แรงม้า (Patcharachavalit *et.al.*, 2023) และค่าแฟกเตอร์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจริงของกำลังเครื่องยนต์สูงสุดของรถขุดและรถบรรทุก เท่ากับ 57% (EPA, 1998)



**Figure 3** PM emissions from delivering activity in the base layer at different number of trucks

Table 1 แสดงข้อมูลเครื่องจักร (Equipment Characteristics) ระยะเวลาทำงานของเครื่องจักร (Working Time) ระยะเวลาว่างงานของเครื่องจักร (Idling Time) และอัตราการใช้ประโยชน์ของเครื่องจักร (Equipment Utilization: %) โดยจำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทที่ถูกใช้ใน แต่ละขั้นตอนก่อสร้างนั้นถูกจัดสรรทรัพยากรเครื่องจักรโดยมีการพิจารณาจากค่า PM ที่ต่ำและมีอัตราการใช้ประโยชน์ของเครื่องจักรที่เหมาะสม

3. การประมาณค่าฝุ่นละออง (PM) ที่เกิดจากโครงการก่อสร้างงานทาง

Table 2 แสดงค่า PM ที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างงานทางทั้งหมด (Total PM Emissions) มีค่าเท่ากับ 27.48 กิโลกรัม และค่า PM ที่เกิดขึ้นในแต่ละโครงสร้างชั้นทาง (Structural Layer) โดยในชั้นพื้นทาง (Base Layer) ก่อให้เกิดค่า PM มากที่สุด เท่ากับ 17.38 กิโลกรัม เนื่องจากโครงสร้างชั้นพื้นทางมีการใช้ปริมาณวัสดุและจำนวนเครื่องจักรที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างทางชั้นอื่นๆ

**Table 1** Equipment characteristics, working time, idling time and percent utilization

Structural layer	Activity	Equipment type	Number of pieces of equipment	Rate power (HP)	Load factor (%)	Working time (min)	Idling time (min)	Equipment utilization (%)
Subgrade	Grading	Grader	1	145	61%	521.6	0.0	100.0%
	Compacting	PR	1	95	56%	551.5	521.6	51.4%
Subbase	Material delivering	Excavator	1	150	57%	97.3	59.4	62.1%
		Truck	8	320	57%	977.4	175.5	84.8%
	Material mixing	Grader	2	145	61%	515.5	75.3	87.3%
		Water Truck	1	320	57%	260.5	0.0	100.0%
	Compacting	Grader	1	145	61%	504.1	429.9	54.0%
		PR	1	95	56%	750.8	183.2	80.4%
		TVR	1	75	56%	934.0	0.0	100.0%
Base	Material delivering	Excavator	1	150	57%	351.1	148.8	70.2%
		Truck	8	320	57%	3509.6	202.1	94.6%
	Material mixing	Grader	2	145	61%	1956.1	217.4	90.0%
		Water Truck	1	320	57%	964.2	0.0	100.0%
	Compacting	Grader	1	145	61%	1937.9	1658.4	53.9%
		PR	1	95	56%	2898.9	691.9	80.7%
		TVR	1	75	56%	3584.8	0.0	100.0%
Surface	Paving	Paver	2	123	62%	530.0	305.0	63.5%
		Truck	4	320	57%	1505.6	164.4	90.2%
	Compacting	PR	1	95	56%	170.5	247.0	40.8%
		TVR	1	75	56%	303.7	113.8	72.8%



**Table 2** PM emissions from equipment operations on each structural layer

Structural layer	PM emissions (kg of PM emission)		Total PM emissions (kg of PM emission)
	Equipment working	Equipment idling	
Subgrade	0.75	0.27	1.02
Subbase	4.03	0.85	4.89
Base	14.91	2.47	17.38
Surface	3.44	0.75	4.19
Total	23.13	4.35	27.48

4. การประมาณค่าฝุ่นละออง (PM) โดยการประยุกต์ใช้แนวทางผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากสมการที่ (3) เมื่อมีการเลือกใช้ Option 1

$$\begin{aligned} TE &= PM \times (1 - \% \text{Reduction by Option 1}) \\ &= 27.48 \times (1 - (10.10/100)) = 24.70 \text{ kg.} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) เมื่อมีการเลือกใช้ Option 3 โดยเครื่องจักรประเภทไฮบริดถูกจัดอยู่ใน Tier 4f

$$\begin{aligned} TE &= PM \times (1 - \% \text{Reduction by Tier4f}) \\ &= 27.48 \times (1 - (97.50/100)) = 0.69 \text{ kg.} \end{aligned}$$

พิจารณาค่า Fuel Reduction ของเครื่องจักรประเภทไฮบริดรวมด้วยซึ่งส่งผลให้อัตราการลดการเกิดค่า PM เพิ่มขึ้นอีก 10% จาก %Reduction by Tier4f สามารถลดได้เมื่อเทียบกับเครื่องจักรเดียวกันที่ไม่ใช่ไฮบริด ดังนั้นจึงประมาณค่า PM เมื่อมีการเลือกใช้ Option 3 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} TE &= 0.69 \text{ kg.} \\ &= 0.69 \times (1 - (10/100)) = 0.62 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Figure 4 แสดงถึงปริมาณค่า PM ที่ลดลงจากเดิม (Nongreen Emission) มีค่าเท่ากับ 27.48 กิโลกรัม หลังจากการประยุกต์ใช้แนวทาง

การบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมหรือแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Options) ที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า Option 1 สามารถลดค่า PM ได้น้อยที่สุดคงเหลือ เท่ากับ 24.70 กิโลกรัม ส่วน Option 2, Option 3 และ Option 4 นั้นสามารถลดค่า PM ได้คงเหลือเท่ากับ 0.69, 0.62 และ 1.03 กิโลกรัม ตามลำดับ โดย Option 3 มีประสิทธิภาพในการลดค่า PM ได้มากที่สุดและมีแนวโน้มที่จะสามารถลดค่า PM ได้ตามแนวคิด Net Zero PM Emission

โดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Ann *et al.*, 2013; Metham and Benjaoran, 2018) ในการบริหารจัดการสัญญาก่อสร้างในทุกรูปแบบของแนวทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งแนวทางเลือกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ การเลือกใช้เครื่องจักรไฮบริด (Option 3) การเลือกใช้เครื่องจักรรุ่นใหม่ (Option 2) การติดตั้งอุปกรณ์กรองมลพิษไอเสีย (Option 4) และการเลือกใช้น้ำมันไบโอดีเซล (Option 1) ตามลำดับ

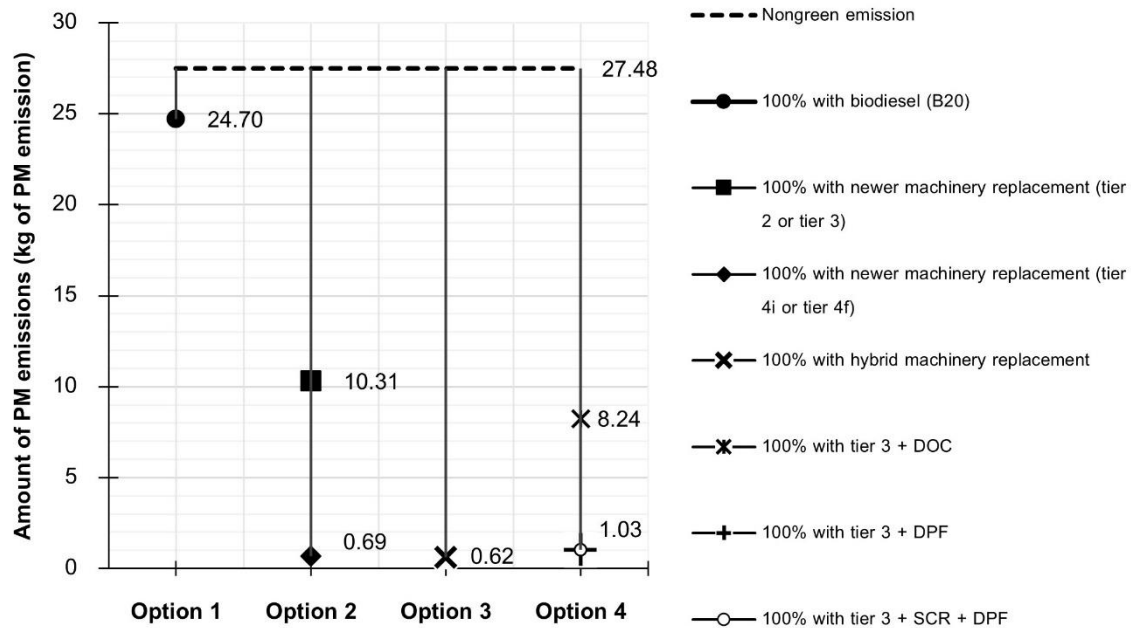


Figure 4 Possible amount of PM emissions after applying sustainable options

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประเมินค่าฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ของเครื่องจักรหนักจากกิจกรรมงานก่อสร้างผิวทางแบบยึดหยุ่น จำนวน 4 เลน ระยะทางเทียบเท่า 1 กิโลเมตร พบว่าการจัดสรรทรัพยากรเครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ ร่วมกับการประยุกต์ใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมส่งผลให้ลดค่าฝุ่นละอองได้อย่างเป็นรูปธรรม แสดงให้เห็นว่าหากมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้แนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างจริงจัง อาจส่งผลให้อุตสาหกรรมก่อสร้างสามารถลดการเกิดฝุ่นละอองที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสภาพอากาศได้อย่างยั่งยืน

แต่อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยในอนาคตควรศึกษาปริมาณฝุ่นฟุ้งที่เกิดในพื้นที่ก่อสร้างเพิ่มเติม เนื่องจากฝุ่นฟุ้งกระจายในพื้นที่ก่อสร้างส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อทั้งพื้นที่ก่อสร้างและบริเวณโดยรอบซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาฝุ่นละอองในบรรยากาศของประเทศไทย นอกจากนี้อาจพิจารณาแนวทางการบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ นอกเหนือจากสี่แนวทางเลือกที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ หากมี

แนวทางบรรเทาผลกระทบรูปแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้รับเหมามีทางเลือกเพิ่มขึ้นสำหรับตัดสินใจในการวางแผนลดปริมาณฝุ่นละอองจากการก่อสร้าง

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2565 รหัส KPS-RDI 2021-009 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน และผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้ความอนุเคราะห์ทรัพยากร สถานที่สำหรับทำวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการให้คำแนะนำต่างๆ มา ณ โอกาสนี้

### เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2562) *มลพิษทางอากาศของประเทศไทย การสนับสนุนข้อมูล และการสร้างความตระหนัก*. เมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2566, จาก <https://shorturl.asia/zwgEy>.

- สำนักนายกรัฐมนตรี. (2559). *แผนเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2560 - 2564*. เมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2566, [https://www.nesdc.go.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=6422](https://www.nesdc.go.th/ewt_dl_link.php?nid=6422)
- ศุภนันท์ จิโรโสภณ. (2563). *การวิเคราะห์ลักษณะระยะยาวของมลพิษอากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานคร*. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาบริหารศาสตร์.
- Ahn, C., Martinez, J. C., Rekapalli, P. V., & Peña-Mora, F. A. (2009). Sustainability analysis of earthmoving operations. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2605-2611. doi: 10.1109/WSC.2009.5429656.
- Ahn, C., Pan, W., Lee, S., & Peña-Mora, F. A. (2010). Lessons learned from utilizing discrete-event simulation modeling for quantifying construction emissions in pre-planning phase. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC)*, 3170-3176. doi: 10.1109/WSC.2010.5679009.
- Ahn, C., Peña-Mora, F., Lee, S., & Arboleda, C. A. (2013). Consideration of the environmental cost in construction contracting for public works: A+C and A+ B+C bidding methods. *Journal of Management in Engineering*, 29(1), 86-94. doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000124.
- Belassi, W., & Tukel, O. I. (1996). A new framework for determining critical success/failure factors in projects. *International journal of project management*, 14(3), 141-151. doi: 10.1016/0263-7863(95)00064-X.
- Boddi Reddy, S. A., & Arocho, I. (2017). Estimating Air Pollutant Emissions for Nonroad Equipment Using MOVES: Case Study of a Building Project. *Construction Research Congress 2018*, 513-522.
- Cass, D., & Mukherjee, A. (2011). Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations by using a hybrid life-cycle assessment approach: case study for pavement operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(11), 1015-1025. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000349.
- Coburn, T. C. (2004). Mixed-model statistical analysis of fuel, equipment, mileage, and driving schedule effects on particulate matter emissions from heavy diesel-powered vehicles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(9), 1151-1161. doi: 10.1080/10473289.2004.10470982.
- East, E. W., Martinez, J. C., & Kirby, J. G. (2009). Discrete-event simulation based performance quantification of web-based and traditional bidder inquiry processes. *Automation in Construction*, 8(2), 109-117. doi: 10.1016/j.autcon.2008.05.003.
- EPA. (1998). *Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling (NR-005)*. Retrieved February 11, 2023, from <https://www.shorturl.asia/OHJmj>.

- EPA. (2002). *A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions — Draft Technical Report (EPA 420- P-02- 001)*. Retrieved February 11, 2023, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1001ZA0.TXT>
- EPA. (2010). *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling — Compression-Ignition (EPA 420-R-10- 018)*. Retrieved February 11, 2023, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P10081UI.TXT>
- EPA. (2012). *Regulatory Impact Analysis for the Final Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter (EPA-452/R-12-005)*. Retrieved February 11, 2023, from [http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/s\\_pm\\_history.html](http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/s_pm_history.html)
- EPA. (2016a). *National Clean Diesel Campaign "FY 2014 – 2016 STATE CLEAN DIESEL GRANT PROGRAM INFORMATION GUIDE"*. Retrieved February 11, 2023, from <http://www.epa.gov/cleandiesel/clean-diesel-state-allocations>.
- EPA. (2016b). *Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards (EPA 420-B-16-022)*. Retrieved February 11, 2023, from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100OA05.pdf>
- EPA. (2021). *Diesel Emissions Reduction Act (DERA) State Grants Program Guide (EPA 420- B-21- 027)*. Retrieved February 11, 2023, from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/420b21027.pdf>
- Lewis, P., Rasdorf, W., Frey, H. C., Pang, S. H., & Kim, K. (2009). Requirements and incentives for reducing construction vehicle emissions and comparison of nonroad diesel engine emissions data sources. *Journal of Construction Engineering and management*, 135(5), 341-351. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000008.
- Martinez, J. C. (2001). EZStrobe-general-purpose simulation system based on activity cycle diagrams. *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1556-1564. doi: 10.1109/WSC.2001.977485.
- Martinez J. C. (2009). Methodology for conducting discrete-event simulation studies in construction engineering and management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 136 (1), 3-16. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000087.
- Martinez, J. C., & Ioannou, P. G. (1999). General-purpose systems for effective construction simulation. *Journal of construction engineering and management*, 125(4), 265-276. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:4(265)

- Metham, M., & Benjaoran, V. (2018). Incentive contracts for road construction to reduce greenhouse gas emissions. *Engineering Journal*, 22(5), 105-122. doi: 10.4186/ej.2018.22.5.105.
- Patcharachavalit, N., Limsawasd, C., & Athigakunagorn, N. (2023). Multiobjective Optimization for Improving Sustainable Equipment Options in Road Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(1), 04022160. doi: 10.1061/JCEMD4.COENG-12544.
- Singh, R. B., Huber, A. H., & Braddock, J. N. (2003). Development of a microscale emission factor model for particulate matter for predicting real-time motor vehicle emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(10), 1204-1217. doi: 10.1080/10473289.2003.10466288.
- Smith, S. D., Osborne, J. R., & Forde, M. C. (1995). Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(4), 388-396. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1995)121:4(388).
- Somboonpisan, J., & Limsawasd, C. (2021). Environmental weight for bid evaluation to promote sustainability in highway construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(4), 04021013. doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002005.
- Zeng, Y. (2006). A comprehensive particulate matter monitoring system and dosimetry-based ambient particulate matter standards. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(4), 518-529. doi: 10.1080/10473289.2006.10464528.
- Zhang, H. (2013). Discrete-event simulation for estimating emissions from construction processes. *Journal of Management in Engineering*, 31(2), 04014034. doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000236.
- Zhang H. (2015). Simulation-based estimation of fuel consumption and emissions of asphalt paving operations. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 29 (2), 04014039. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000326.