

# การออกแบบผนังพืชพรรณที่เหมาะสมในการลดมลพิษทางอากาศ: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## Optimal Design of Bio Walls for Reducing Air Pollution: A Case Study of Kasetsart University

|              |            |
|--------------|------------|
| รับบทความ    | 03/02/2569 |
| แก้ไขบทความ  | 24/04/2569 |
| ยอมรับบทความ | 28/04/2569 |

วงศ์ธร ศรีสุข<sup>1</sup> กันติทัต ทับสุวรรณ<sup>1\*</sup> สนิ ลิ้มทองสกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชานวัตกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

<sup>2</sup>ภาควิชาภูมิสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wongsaton Srisum<sup>1</sup>, Kantitub Tubsuwan<sup>1\*</sup>, Sani Limthongsakul<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Building Innovation, Faculty of Architecture, Kasetsart University

<sup>2</sup> Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture, Kasetsart University

Wpnsaton43@gmail.com, kantitub.t@ku.th, sani.w@ku.th

\*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

### บทคัดย่อ

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสำคัญในเมืองขนาดใหญ่ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของการจราจร ซึ่งมักก่อให้เกิดการสะสมของฝุ่นละอองและก๊าซมลพิษ งานวิจัยฉบับนี้มุ่งศึกษารูปแบบการออกแบบผนังพืชพรรณที่เหมาะสมสำหรับการลดมลพิษทางอากาศในพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การศึกษาประยุกต์ใช้แบบจำลอง ENVI-met ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดพืชพรรณ รูปแบบการติดตั้ง และสัดส่วนพื้นที่ปกคลุมที่แตกต่างกันต่อระดับความเข้มข้นของ PM2.5, PM10 และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจำลองการติดตั้งผนังพืชพรรณ 3 รูปแบบ ได้แก่ การปลูกกระถางบนดิน การปลูกในแนวนอนตามแนวชั้นอาคาร และการปลูกในแนวตั้งเว้นช่อง ครอบคลุมสัดส่วนพื้นที่ปกคลุม 25%, 50% และ 75% ของพื้นที่หน้าอาคาร และเลือกพืชพรรณ 3 ชนิดเป็นตัวแทนกลุ่ม LAI คือ ถั่วแขก สร้อยอินทนิล และจัสมินใบต่าง

ผลการศึกษาพบว่า ผนังพืชพรรณสามารถช่วยลดระดับฝุ่นละอองได้ในทุกกรณีเมื่อเทียบกับสภาพปกติ โดยการลดลงจะไม่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ปกคลุม โดยรูปแบบแนวตั้งเว้นช่อง ในกรณีของพืชพรรณชนิดจัสมินใบต่าง ให้ประสิทธิภาพลด PM2.5 และ PM10 สูงที่สุด สามารถลดฝุ่นได้เกือบ 20% และพืชพรรณชนิดสร้อยอินทนิล ในรูปแบบการติดตั้งเดียวกันให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่การลดคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชนิดพืช ซึ่งสะท้อนว่า ประสิทธิภาพการลดมลพิษขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการไหลของลมและโครงสร้างพืชมากกว่าปริมาณพื้นที่ปกคลุมเพียงอย่างเดียว

**คำสำคัญ:** ผนังพืชพรรณ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ENVI-met การออกแบบเชิงสิ่งแวดล้อม

## Abstract

Air pollution is a critical issue in large urban areas, particularly in zones with high traffic density, where particulate matter and gaseous pollutants tend to accumulate. This study aims to investigate optimal bio wall design configurations for mitigating air pollution within Kasetsart University. The study integrates ENVI-met simulations with field measurement data to analyze the effects of plant species, installation configurations, and different coverage ratios on the concentrations of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Three bio wall configurations were simulated: planting at pedestrian level, horizontal planting along building floors, and segmented vertical planting. Coverage ratios of 25%, 50%, and 75% of the building frontage were examined, and three plant species were selected to represent 3 difference Leaf Area Index (LAI): *Phaseolus vulgaris*, *Thunbergia grandiflora*, and *Pandorea jasminoides Variegated*.

The results indicate that bio walls can reduce particulate matter concentrations in all cases compared to the baseline condition; however, the reduction does not increase proportionally with greater coverage. The vertical strip configuration, particularly with *Pandorea jasminoides Variegated* demonstrated the highest reduction efficiency for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, achieving nearly a 20% decrease, while *Thunbergia grandiflora* under the same configuration yielded comparable performance. In contrast, CO<sub>2</sub> reduction did not differ significantly among plant species. These findings suggest that the effectiveness of bio walls in mitigating air pollution is more strongly influenced by the interaction between airflow patterns and plant structure than by the extent of vegetative coverage alone.

**Keywords:** *bio walls, fine particulate matter, PM<sub>2.5</sub>, ENVI-met, environmental design*

## บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มลพิษทางอากาศได้กลายเป็นปัญหาสำคัญของเมืองใหญ่ทั่วโลก โดยเฉพาะเมืองที่มีความหนาแน่นของประชากรและการจราจรสูง (Han et al., 2017) เช่น กรุงเทพมหานคร แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม และกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลให้ระดับฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM<sub>2.5</sub>) และก๊าซมลพิษ เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนอย่างรุนแรง ทั้งโรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจ และหลอดเลือด รวมถึงผลกระทบต่อระบบประสาท (Wu et al., 2021) นอกจากนี้ มลพิษทางอากาศยังส่งเสริมปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมืองส่งผลให้อุณหภูมิในเขตเมืองเพิ่มขึ้น กระตุ้นต่อคุณภาพชีวิตและการใช้พลังงานในอาคาร (Ciacci et al., 2023; Viecco et al., 2021)

เพื่อลดปัญหาดังกล่าว แนวคิดการใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว เช่น การปลูกต้นไม้ในเมือง ผนังพืชพรรณ และหลังคาเขียวได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีศักยภาพในการช่วยลดมลพิษ ปรับปรุงคุณภาพอากาศ (Mobarhan et al., 2024; Rodrigues et al., 2024) โดยเฉพาะผนังพืชพรรณซึ่งเหมาะสมกับพื้นที่เมืองที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และมีการสะสมของมลพิษสูง (Borna & Yeganeh, 2024) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นในบริบทภูมิอากาศเขตอบอุ่นหรือเขตอบร้อน และขาดการศึกษาที่สอดคล้องกับสภาพอากาศร้อนชื้น รวมถึงบริบทเฉพาะของกรุงเทพมหานคร ทั้งด้านชนิดพืชพรรณ รูปแบบการออกแบบ และสภาพแวดล้อมเมือง (Guo et al., 2023; Daranee Jareemit et al., 2023; Jin et al., 2024) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณในการลดระดับ PM<sub>2.5</sub> ในพื้นที่เมืองของกรุงเทพมหานคร โดยใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ENVI-met เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบผนังพืชพรรณที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเมืองร้อนชื้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเมืองสีเขียวและยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในอนาคต

## กลไกการกำจัดมลพิษทางอากาศโดยใช้พืช

พืชพรรณมีบทบาทสำคัญในการลดมลพิษทางอากาศผ่านกลไกทางธรรมชาติหลายประการ ได้แก่ การดูดซับ การสะสม และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub>) รวมถึงก๊าซมลพิษ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ด้วยเหตุนี้ พืชพรรณจึงถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในเมือง อาทิ ผนังพืชพรรณและหลังคาเขียว เพื่อบรรเทาผลกระทบจากมลพิษทางอากาศและปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมเมือง (Mobarhan et al., 2024; Viecco et al., 2021) โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองที่มีการจราจรหนาแน่นและมีข้อจำกัดด้านพื้นที่สีเขียวในระดับพื้นดิน

กลไกสำคัญคือการดักจับและการสะสมของฝุ่นละอองบนพื้นผิวใบพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของใบ เช่น ขนาด รูปร่าง ความหยาบของผิวใบ และความหนาแน่นของขนใบ (Wu et al., 2021) งานวิจัยหลายฉบับพบว่า พืชที่มีความหนาแน่นและลักษณะใบที่เหมาะสมสามารถช่วยลดระดับ PM<sub>2.5</sub> ได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละอองขึ้นอยู่กับชนิดพืชและสภาพแวดล้อมเมือง (Rodrigues et al., 2024) ฝุ่นละอองที่สะสมบนใบสามารถถูกกำจัดออกโดยการชะล้างโดยฝนหรือเกิดการหลุดร่วงของฝุ่นจากผิวใบ (Tripathi & Nema, 2023) นอกจากนี้ พืชยังสามารถดูดซับก๊าซมลพิษผ่านปากใบและสามารถถูกเปลี่ยนแปลงเป็นสารที่มีความเป็นอันตรายน้อยลงภายในเซลล์พืชส่งผลให้พืชพรรณมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพอากาศและการลดภาระมลพิษในเขตเมือง (Ciacci et al., 2023)

## ประเภทของพืชที่นำมาประกอบอาคารเพื่อการลดมลพิษ

พืชไม้เลื้อยเป็นพืชพรรณที่ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอาคารสีเขียว เช่น ผนังพืชพรรณและซุ้มไม้เลื้อย เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตในแนวตั้งได้ดี ใช้พื้นที่แนวราบค่อนข้างน้อย (Wang et al., 2022) และมีศักยภาพในการดูดซับมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub>) รวมถึงก๊าซมลพิษ (Wu et al., 2021) การนำไม้เลื้อยมาใช้งานออกแบบอาคารเขียวช่วยลดการสะสมของมลพิษในเขตเมือง ผ่านกลไกการดักจับฝุ่นละอองบนพื้นผิวใบ ซึ่งไม้เลื้อยที่มีความหนาแน่นของใบและพื้นผิวใบขรุขระจะมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละอองได้สูงกว่า (Xue et al., 2025) นอกจากนี้ กระบวนการสังเคราะห์แสงของ

ใบไม้เลี้ยงยังช่วยดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้คุณภาพอากาศโดยรวมดีขึ้น (Mobarhan et al., 2024) ทั้งนี้ ผลอาจจะเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิอากาศประจำถิ่นและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ที่แตกต่างกัน

การเลือกชนิดพืชสำหรับใช้ในผนังพืชพรรณภายใต้บริบทของประเทศไทยจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและลักษณะทางชีวภาพของพืช ควบคู่กับความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพภูมิอากาศร้อนชื้นที่มีอุณหภูมิสูง แสงแดดจัด และรูปแบบปริมาณน้ำฝนที่แปรผันตามฤดูกาล หนึ่งในตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของพืชคือดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index: LAI) ซึ่งสะท้อนถึงพื้นที่ของใบพืชต่อหน่วยพื้นที่ พืชที่มีค่า LAI สูงสามารถสร้างร่มเงา ลดอุณหภูมิพื้นผิวและอากาศโดยรอบ รวมถึงมีศักยภาพในการดักจับฝุ่นละอองและดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าพืชที่มีค่า LAI ต่ำ (Ghafar et al., 2020)

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาแนวทางการใช้ผนังพืชพรรณประกอบอาคารเพื่อลดมลพิษทางอากาศ
2. เพื่อเสนอแนวทางการลดปัญหาฝุ่นในบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## ขอบเขตงานวิจัย

- การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจัดวางและสัดส่วนของผนังพืชพรรณเพื่อการลดฝุ่น PM2.5, PM10 และคาร์บอนไดออกไซด์สะสมในพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- การทดลองนี้เป็นการจำลองพื้นที่ศึกษาในโปรแกรม ENVI-met เพื่อคำนวณอัตราไหลเวียน และสะสมของ PM2.5, PM10 และคาร์บอนไดออกไซด์
- จำลองผลกระทบของผนังพืชพรรณต่อการลดระดับ PM2.5, PM10 และคาร์บอนไดออกไซด์ ในพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร โดยกำหนดแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองจากการจราจรทางถนนและ Background Pollution เท่านั้น
- พื้นที่ศึกษาอยู่บริเวณประตูงามวงศ์วาน 1 ซึ่งเป็นจุดที่มีการจราจรหนาแน่นและมีโอกาสสะสมฝุ่นละอองสูงจากการปล่อยมลพิษของยานพาหนะที่สัญจรเข้า-ออกมหาวิทยาลัยตลอดทั้งวัน
- พื้นที่อ้างอิงในการศึกษาผลกระทบจากการลดระดับ PM2.5 จะทำการศึกษากายนอกอาคารในบริเวณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ด้านที่ติดเส้นทางสัญจร

## การคัดเลือกพื้นที่การศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณในการลดระดับฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และปรับปรุงคุณภาพอากาศในพื้นที่เมือง โดยประยุกต์ใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ENVI-met ในพื้นที่ศึกษาภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร จำนวน 3 พื้นที่ ได้แก่ 1) บริเวณประตูงามวงศ์วาน 1 2) บริเวณประตูงามวงศ์วาน 2 และ 3) บริเวณด้านหน้าคณะสัตวแพทยศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นและมีแนวโน้มการสะสมมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่น PM2.5 การศึกษามุ่งเปรียบเทียบผลกระทบของผนังพืชพรรณต่อการลดมลพิษในแต่ละบริบทพื้นที่ และวิเคราะห์แนวทางการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการประยุกต์ใช้ในสภาพเมืองร้อนชื้น ก่อนดำเนินการจำลอง จะมีการตรวจวัดระดับฝุ่น PM2.5 ภาคสนามโดยใช้เครื่องวัดคุณภาพอากาศ BLATN Air Quality Monitor รุ่น BR-HOL ในช่วงเวลาที่มีการจราจรหนาแน่น เพื่อประเมินระดับมลพิษของแต่ละพื้นที่และใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดพื้นที่ศึกษาที่มีความเหมาะสม โดยการเก็บข้อมูลทำในช่วงเวลาเดียวกัน โดยมีการบันทึกค่า PM2.5, PM10 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ในช่วงเวลาเร่งด่วนในช่วงเย็น ซึ่งมักอยู่ระหว่างเวลา 16.30–17.30 น. เป็นช่วงเวลาที่ปริมาณการใช้ถนนสูงสุด เก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงครึ่งต่อพื้นที่ศึกษา เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตั้งค่าจำลอง (boundary conditions)

ตาราง 1 สรุปข้อมูลเฉลี่ยเบื้องต้นจากการเก็บภาคสนาม

| พื้นที่ศึกษา                    | PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | PM1.0 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | CO <sub>2</sub> (ppm) | อุณหภูมิ (°C) | ความชื้น (%rh) |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------------|----------------|
| คณะสัตวแพทยศาสตร์ – ถนนพหลโยธิน | 77.7                               | 123.2                             | 47.7                               | 666.2                 | 32.3          | 49.5           |
| ประตูมวงควาน 1                  | 80.0                               | 128.6                             | 49.7                               | 492.2                 | 33.0          | 50.1           |
| ประตูมวงควาน 2                  | 76.3                               | 123.0                             | 45.9                               | -                     | 33.8          | 48.6           |

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

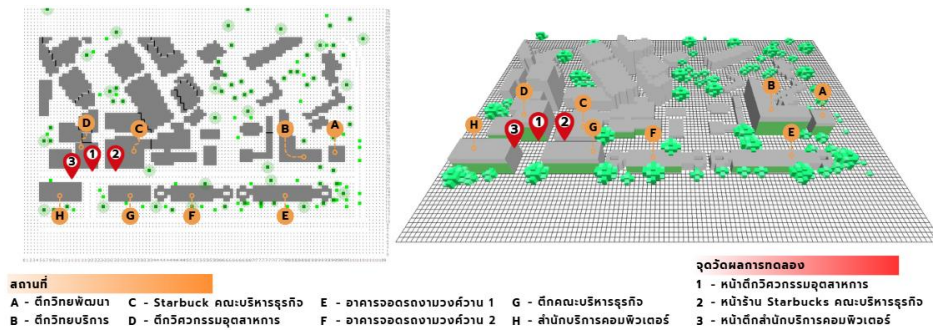
จากการเก็บข้อมูลฝุ่นละออง PM2.5 และข้อมูลสภาพแวดล้อมภาคสนามในพื้นที่ศึกษา 3 แห่ง พบว่า พื้นที่ประตูมวงควาน 1 มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ PM2.5 สูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 80 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศขององค์การอนามัยโลก (WHO) ซึ่งเกณฑ์ PM2.5 ตาม AQI ปี ค.ศ. 2024 แบ่งเป็น 6 ระดับ ได้แก่ ระดับดี 0.0–9.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ระดับปานกลาง 9.1–35.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ระดับเริ่มส่งผลกระทบต่อกลุ่มเสี่ยง 35.5–55.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ระดับมีผลกระทบต่อสุขภาพ 55.5–125.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ระดับมีผลกระทบมาก 125.5–225.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  และระดับอันตราย 225.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ขึ้นไป สะท้อนถึงปัญหาการสะสมของมลพิษทางอากาศในพื้นที่เมืองที่มีการใช้งานหนาแน่นและมีลักษณะกึ่งปิด (ดูตาราง 1)

พื้นที่ประตูมวงควาน 1 ถูกล้อมรอบด้วยอาคารเรียนขนาดใหญ่หลายแห่ง ส่งผลให้การไหลเวียนของอากาศถูกจำกัดและเกิดการสะสมของฝุ่นละอองในระดับความสูงของการหายใจของมนุษย์ แม้สภาพอุณหภูมิและความชื้นจะใกล้เคียงกับพื้นที่อื่น แต่ค่าฝุ่น PM2.5 ยังคงอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงที่มีลมน้อย ประกอบกับการเป็นจุดศูนย์กลางของการเดินเท้าและการจอดรถโดยสาร ทำให้ผู้ใช้งานในพื้นที่ได้รับผลกระทบจากมลพิษทางอากาศโดยตรง ดังนั้นพื้นที่ประตูมวงควาน 1 จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณในการลดฝุ่นละอองขนาดเล็ก และสามารถสะท้อนปัญหาเชิงสาธารณสุขและการออกแบบพื้นที่เมืองในบริบทเมืองร้อนชื้นได้อย่างชัดเจน

### การตั้งค่าแบบจำลองสำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติ

ENVI-met เป็นซอฟต์แวร์จำลองทางกายภาพที่ถูกออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางกายภาพของเมือง เช่น อาคาร พื้นผิวถนน และพืชพรรณ กับสภาวะอากาศในระดับจุลภาค โดยเฉพาะในบริบทของการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของมลพิษทางอากาศ (Rodrigues et al., 2024) ซึ่ง ENVI-met สามารถจำลองพฤติกรรมของอากาศ เช่น การไหลของลม การแผ่รังสีความร้อน การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวเมืองกับชั้นบรรยากาศ และกระบวนการคายระเหยของพืชพรรณ (Viecco et al., 2021) ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพื้นที่สีเขียว เช่น ผนังพืชพรรณ (green walls) และหลังคาเขียว (green roofs) ต่อคุณภาพอากาศและสภาพแวดล้อมของเมืองได้อย่างแม่นยำ

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ของผนังพืชพรรณด้วยการสร้างแบบจำลองสามมิติในโปรแกรม ENVI-met โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ขนาด ความสูง และรูปทรงของอาคาร ทิศทางการวางตัวของอาคาร ลักษณะและความกว้างของถนน พืชพรรณเดิมในพื้นที่ รวมถึงข้อมูลทิศทางและความเร็วลม ข้อมูลดังกล่าวได้จากการสำรวจภาคสนามร่วมกับภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth เพื่อให้แบบจำลองแม่นยำและใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่จริงมากที่สุด พื้นที่จำลองถูกกำหนดขนาด 550 × 375 เมตร ด้วยความละเอียดกริด 5 × 5 × 3 เมตร (กว้าง × ยาว × สูง) ซึ่งเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ระดับจุลภาค โดยเฉพาะในระดับความสูงระดับคนเดิน (ประมาณ 1.5 เมตร) (Daranee Jareemit et al., 2023) พร้อมตั้งค่าข้อมูลสภาพอากาศเริ่มต้นให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีการตรวจวัดภาคสนาม เพื่อสะท้อนบริบทเมืองร้อนชื้นได้อย่างเหมาะสม



ภาพ 1 การจำลองอาคารตัวอย่างในโปรแกรม ENVI-met

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการจำลองการไหลของอากาศและการแพร่กระจายของ PM<sub>2.5</sub> โปรแกรมได้มีฟังก์ชัน แดกความละเอียดกริดระดับคนเดินจำนวน 5 กริด เพื่อให้ครอบคลุมความสูง 1.50 เมตร (ระดับคนเดิน) และการใช้ฟังก์ชัน Extended domain ใน ENVI-met เพื่อขยายขอบเขตการคำนวณ โดยเฉพาะในทิศทางลมประจำถิ่นจากตะวันตกเฉียงใต้ไปตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากขอบเขตจำลองและทำให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างสมจริง นอกจากนี้ ยังมีการจำลองพืชพรรณเดิมโดยเลือกต้นไม้จากฐานข้อมูลของโปรแกรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพจริง พร้อมกำหนดแหล่งกำเนิดมลพิษในรูปแบบ Line source ตามแนวนอนและเส้นทางจราจรหลัก โดยอ้างอิงข้อมูลปริมาณยานพาหนะเฉลี่ยในพื้นที่ เพื่อให้ระดับการปล่อยมลพิษสอดคล้องกับสถานการณ์จริง ผลการจำลองพบว่า ฝุ่น PM<sub>2.5</sub> มีแนวโน้มสะสมสูงในบริเวณช่องแคบระหว่างอาคารและพื้นที่ที่การไหลเวียนอากาศจำกัด โดยเฉพาะในระดับการใช้งานของผู้คน ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนพฤติกรรมพื้นฐานของฝุ่นในบริบทเมืองกึ่งปิด และสามารถใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการประเมินและพัฒนาแนวทางการออกแบบผังพืชพรรณเพื่อลดการสัมผัสมลพิษในพื้นที่เสี่ยงได้อย่างเป็นรูปธรรม

## การเลือกชนิดพืชพรรณ

การเลือกชนิดพืชพรรณสำหรับการทดลองระบบพืชพรรณแนวตั้งในพื้นที่ภายนอกอาคารมีความสำคัญ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการลดฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> พืชที่นำมาใช้จำเป็นต้องสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย ทนต่อแสงแดดและสภาพแวดล้อมเมือง รวมถึงมีคุณสมบัติด้านโครงสร้างใบที่เอื้อต่อการดักจับฝุ่นละออง สามารถพิจารณาได้จากค่าดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index: LAI) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการดักจับฝุ่นละออง เนื่องจากเป็นตัวกำหนดพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคในอากาศกับพืชพรรณ ประสิทธิภาพดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างความสามารถในการดักจับและการไหลเวียนของอากาศ (Barwise & Kumar, 2020) งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกพืชที่มีลักษณะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน เพื่อสะท้อนศักยภาพของพืชพรรณในระบบผนังสีเขียวภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

พืชที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้สามารถจัดกลุ่มตามช่วงค่า LAI ได้เป็น 3 ระดับ โดยกลุ่มค่า LAI สูง ได้แก่ ถั่วแขก และเฟิร์นบอสตัน พิไลเดนดรอน ต้นทางมังกร ไอบีบอสตัน (LAI 4.6–6.65) กลุ่มค่า LAI ปานกลาง ได้แก่ สร้อยอินทนิล และมะลูลี (LAI 3–3.5) และกลุ่มค่า LAI ต่ำ ได้แก่ จัสมินใบด่าง พุดต่าง วานหอยแครงต่าง และลิ้นมังกร (LAI 1.8–2.5) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผนังพืชพรรณ (Ghafari et al., 2020; Pérez et al., 2022; Vox et al., 2018) พืชที่เลือกใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองประกอบด้วย ถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris*) สร้อยอินทนิล (*Thunbergia grandiflora*) และจัสมินใบด่าง (*Pandorea jasminoides* 'Variegata') ซึ่งมีค่า LAI แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยถั่วแขกเป็นพืชล้มลุกที่เจริญเติบโตเร็ว มีค่า LAI สูงประมาณ 6.65 สร้อยอินทนิลเป็นไม้เลื้อยเนื้อแข็งที่นิยมใช้ในพื้นที่ภายนอกของประเทศไทย มีค่า LAI ระดับปานกลางประมาณ 3.5 ขณะที่จัสมินใบด่างเป็นไม้เลื้อยประดับที่ดูแลง่าย มีค่า LAI ประมาณ 2.5 ซึ่งแม้จะต่ำกว่าพืชอีกสองชนิดที่เลือก แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการใช้งานจริง การเลือกพืชทั้งสามชนิดนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณที่มีความแตกต่างด้านความหนาแน่นของใบ ซึ่งมีผลต่อการกระจายตัวและการสะสมของฝุ่นละอองภายใต้ลักษณะพืชที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน (Barwise & Kumar, 2020) ทั้งนี้ ค่า LAI ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งใช้วิธีการวัดแบบทางอ้อม โดยเป็นการประมาณค่า LAI จากการวัดปริมาณแสง

ที่ผ่านใบพืช แทนการวัดพื้นที่ใบโดยตรง (Bréda, 2003) แม้วิธีดังกล่าวอาจให้ค่าที่แตกต่างกันตามสภาพการวัดและชนิดของเครื่องมือ จึงเหมาะสำหรับการใช้เปรียบเทียบในเชิงแนวโน้มมากกว่าในเชิงปริมาณโดยตรง (Jonckheere et al., 2004) (ดูตาราง 2)

ตาราง 2 ข้อมูลพืชพรรณประกอบผนังพืชพรรณที่เลือกใช้

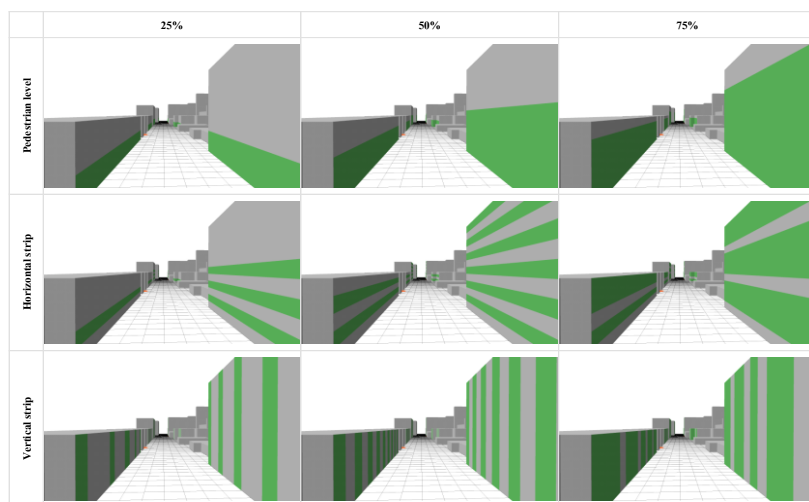
| ชื่อพืช (วิทยาศาสตร์)                  | ชื่อไทย      | ค่า LAI         | วิธีวัด         | หมายเหตุการใช้ในไทย | แหล่งข้อมูล           |
|----------------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| <i>Phaseolus vulgaris</i>              | ถั่วแขก      | 6.1–7.2 (~6.65) | Li-Cor LAI-2200 | แสงแดดจัด           | (Šuklje et al., 2019) |
| <i>Thunbergia grandiflora</i>          | สร้อยอินทนิล | ~3.5            | Ceptometer      | แดดจัด              | (Ghafar et al., 2020) |
| <i>Pandorea jasminoides Variegated</i> | จัสมีนใบด่าง | 1.5–3.5 (~2.5)  | Ceptometer      | แสงแดดรำไร          | (Vox et al., 2018)    |

ที่มา : ผู้วิจัย

### การกำหนดรูปแบบสมมุติสำหรับการประเมินสัดส่วนที่เหมาะสมของผนังพืชพรรณ

การออกแบบผนังพืชพรรณในบริบทพื้นที่เมืองถือเป็นมาตรการเชิงสถาปัตยกรรมที่มีศักยภาพในการปรับปรุงสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยเฉพาะในพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นสูง ทั้งในด้านการช่วยกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กในระดับคนเดิน (Cui et al., 2022) งานวิจัยนี้จึงกำหนดรูปแบบสมมุติของแบบจำลอง (model scenario) การติดตั้งระบบผนังพืชพรรณบริเวณหน้าอาคารที่ติดกับแนวสัญจรหลัก เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ควบคู่กับการพิจารณาความเหมาะสมด้านกายภาพของพื้นที่ใช้งานและความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

รูปแบบการติดตั้งผนังพืชพรรณถูกแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะหลัก ได้แก่ การติดตั้งตลอดแนวในระดับคนเดิน (pedestrian level) การติดตั้งในลักษณะแถบแนวนอนตามแนวชั้นอาคาร (horizontal strip) และการติดตั้งในแนวตั้งเว้นช่วง (vertical strip) โดยแต่ละรูปแบบถูกกำหนดระดับความครอบคลุมพื้นที่ผนัง 3 ระดับ ได้แก่ 25%, 50% และ 75% ของพื้นที่หน้าอาคาร โดยช่วง 25–50% เพิ่มจำนวนแนวเส้นเพื่อสะท้อนผลของรูปแบบการจัดวาง (Cui et al., 2022) ขณะที่ช่วง 50–75% เพิ่มความหนาของพืชพรรณเพื่อสังเกตผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในระดับคนเดินมากขึ้น (Perini et al., 2011) และชนิดพืชพรรณ ทั้ง 3 ชนิด คือ ถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris*) สร้อยอินทนิล (*Thunbergia grandiflora*) และจัสมีนใบด่าง (*Pandorea jasminoides Variegated*) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบว่า รูปแบบและสัดส่วนใดให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการลด PM<sub>2.5</sub> ภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมเดียวกัน (ดูภาพ 2 และตาราง 2)



ภาพ 2 การจำลองสัดส่วนการติดตั้งผนังพืชพรรณในแต่ละรูปแบบ

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

## การกำหนดตัวแปรในงานวิจัย

ตาราง 3 ข้อมูลรายละเอียดกรณีศึกษาจำแนกตามชนิดพืชพรรณและการติดตั้ง

| CASE  | ชื่อพืชไทย/สามัญ                     | ชื่อพืช (วิทยาศาสตร์)                  | ค่า LAI | ลักษณะการติดตั้ง |
|-------|--------------------------------------|----------------------------------------|---------|------------------|
| CB-PD | ถั่วแขก (Common bean)                | <i>Phaseolus vulgaris</i>              | 6.65    | Pedestrian Level |
| BT-PD | สร้อยอินทนิล (Blue trumpet vine)     | <i>Thunbergia grandiflora</i>          | 3.5     | Pedestrian Level |
| VB-PD | จัสมีนใบด่าง (Variegated bower vine) | <i>Pandorea jasminoides Variegated</i> | 2.5     | Pedestrian Level |
| CB-HS | ถั่วแขก (Common bean)                | <i>Phaseolus vulgaris</i>              | 6.65    | Horizontal Strip |
| BT-HS | สร้อยอินทนิล (Blue trumpet vine)     | <i>Thunbergia grandiflora</i>          | 3.5     | Horizontal Strip |
| VB-HS | จัสมีนใบด่าง (Variegated bower vine) | <i>Pandorea jasminoides Variegated</i> | 2.5     | Horizontal Strip |
| CB-VS | ถั่วแขก (Common bean)                | <i>Phaseolus vulgaris</i>              | 6.65    | Vertical Strip   |
| BT-VS | สร้อยอินทนิล (Blue trumpet vine)     | <i>Thunbergia grandiflora</i>          | 3.5     | Vertical Strip   |
| VB-VS | จัสมีนใบด่าง (Variegated bower vine) | <i>Pandorea jasminoides Variegated</i> | 2.5     | Vertical Strip   |

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

การศึกษานี้กำหนดตัวแปรต้นเป็นรูปแบบการติดตั้งผนังพืชพรรณในพื้นที่ศึกษา 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีการติดตั้งผนังพืชพรรณกรณีติดตั้งตลอดแนวในระดับคนเดิน กรณีติดตั้งในแนวนอนตามแนวชั้นอาคาร และกรณีติดตั้งในแนวตั้งตามระยะพื้นที่ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกันต่อคุณภาพอากาศ โดยมีจุดวัด 3 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่ง 1 บริเวณหน้าตึกวิศวกรรมอุตสาหการ ตำแหน่ง 2 บริเวณหน้าร้านสตราบ์คส์คณะบริการธุรกิจ และตำแหน่ง 3 บริเวณหน้าตึกสำนักบริการคอมพิวเตอร์ (ดูภาพ 1)

ตัวแปรตามคือระดับมลพิษทางอากาศในพื้นที่ศึกษา โดยพิจารณาจากความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub> รวมถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนตัวแปรควบคุมกำหนดให้ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่คงที่ และควบคุมคุณภาพอากาศเดิมของพื้นที่ก่อนการติดตั้งผนังพืชพรรณ ได้แก่ ค่าเริ่มต้นของ PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> และ CO<sub>2</sub> รวมถึงค่าดัชนีพื้นที่ใบพืช (LAI) ในแบบจำลอง ENVI-met เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนผลของการติดตั้งผนังพืชพรรณได้อย่างชัดเจน

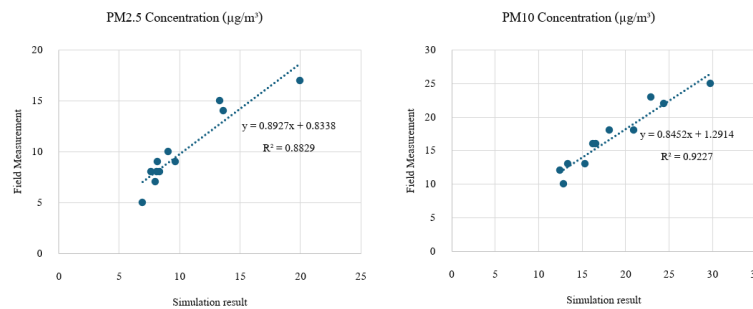
## การปรับเทียบแบบจำลอง (Model calibration)

**ขั้นตอนที่ 1 เก็บข้อมูลภาคสนาม** เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับเทียบแบบจำลอง ENVI-met ให้สะท้อนสภาพจริงของพื้นที่ศึกษาอย่างถูกต้องที่สุด โดยได้ทำการติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพอากาศสำหรับ PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub> รวมถึงอุปกรณ์วัดสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ เครื่องวัดความเร็วลม ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และรังสีดวงอาทิตย์ ณ บริเวณป้อมรักษาความปลอดภัย ประตูทางด่วน 1 และพื้นที่อาคารจอดรถประตูทางด่วน 1 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การเก็บข้อมูลดำเนินการทุก 15 นาที เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนความผันแปรตามช่วงเวลาของวัน ทั้งในด้านสภาพภูมิอากาศและระดับฝุ่นละออง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงพลวัตของลมและมลพิษทางอากาศ

**ขั้นตอนที่ 2 ขึ้นแบบจำลองเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนาม** พื้นที่จำลองถูกกำหนดขนาด 110 x 75 x 40 กริด (550 x 375 x 120 เมตร) ด้วยความละเอียดกริด 5 x 5 x 3 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) จากการจำลอง ENVI-met ครั้งแรกพบว่าค่าฝุ่น PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub> มีความแตกต่างจากค่าที่วัดจริงประมาณ 10 เท่า แสดงว่า model ตั้งต้นยังไม่เหมาะสมต่อบริบทของพื้นที่จริงในกรุงเทพมหานคร โดยพบว่า ค่า Emission Factor ของโปรแกรม ENVI-met สำหรับ PM<sub>10</sub> ตั้งต้นเป็น 0.004 g/km/vehicle จากงานวิจัยด้านการปล่อยมลพิษจากรถยนต์ส่วนบุคคลในเขตเมือง พบว่า ค่าเฉลี่ยควรอยู่ที่ประมาณ 0.06 g/km/vehicle (Ferm & Sjöberg, 2015) ทำให้ค่าผลจำลองต่ำกว่าความเป็นจริงอย่างมีนัยสำคัญ

**ขั้นตอนที่ 3 การปรับข้อมูลพารามิเตอร์ด้านสภาพอากาศ** โดยเปลี่ยนรูปแบบจากการใช้ข้อมูลทั่วไปของโปรแกรมเป็นข้อมูลไฟล์ EPW ในโหมด Full forcing เพื่อให้การจำลองสภาพภูมิอากาศรายชั่วโมงสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง โดยเฉพาะตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายตัวของมลพิษ เช่น ความเร็วลม ทิศทางลม และอุณหภูมิ ซึ่งการปรับเทียบดังกล่าวทำให้ผลจำลองรอบที่สองมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าจริงมากขึ้น แต่ยังพบความคลาดเคลื่อนในเชิงรูปแบบรายชั่วโมง จึงได้ดำเนินการปรับข้อมูลการปล่อยมลพิษรายชั่วโมงให้มีทิศทางเดียวกับลักษณะการจราจรจริงในพื้นที่ศึกษา

**ขั้นตอนสุดท้ายประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง** โดยประเมินด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน ซึ่งผลการประเมิน PM<sub>2.5</sub> หลังการปรับเทียบพบว่า แบบจำลองมีค่า RMSE เท่ากับ 1.30 และค่า MAPE เท่ากับ 9.74% โดยมีค่า  $R^2 = 0.883$  แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ค่อนข้างสูงระหว่างค่าจำลองและค่าที่วัดจริง อยู่ในระดับที่โมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริงได้ดี และผลการประเมิน PM<sub>10</sub> พบค่า RMSE เท่ากับ 2.18 ค่า MAPE เท่ากับ 8.21% และค่า  $R^2 = 0.922$  ซึ่งจัดอยู่ในระดับความสอดคล้องที่ดี สะท้อนว่าการปรับเทียบแบบจำลองในด้านการปรับพารามิเตอร์ข้อมูลสภาพอากาศมีผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญ (ดูภาพ 3)



ภาพ 3 กราฟแสดงผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

## ผลการทดลอง

### ผลการจำลองผลกระทบของผังพืชพรรณต่อฝุ่น PM<sub>2.5</sub>

ตาราง 4 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราการลดลงเฉลี่ยช่วงเวลา 8.00–18.00 น. ของค่าฝุ่น PM<sub>2.5</sub> ณ 3 จุดวัด (หน่วย : ร้อยละจากสถานการณ์ปกติ)

| CASE  | PM <sub>2.5</sub> Concentration (µg/m³) |       |       |                |      |      |                |       |       |
|-------|-----------------------------------------|-------|-------|----------------|------|------|----------------|-------|-------|
|       | Position 1                              |       |       | Position 2     |      |      | Position 3     |       |       |
|       | Coverage Ratio                          |       |       | Coverage Ratio |      |      | Coverage Ratio |       |       |
|       | 25                                      | 50    | 75    | 25             | 50   | 75   | 25             | 50    | 75    |
| CB-PD | 0.88                                    | 4.03  | 2.63  | 0.71           | 3.02 | 1.61 | 3.37           | 7.64  | 5.24  |
| BT-PD | 3.77                                    | 7.81  | 6.61  | 3.19           | 5.01 | 3.96 | 7.80           | 12.69 | 10.31 |
| VB-PD | 10.55                                   | 2.59  | 11.19 | 7.45           | 2.72 | 7.28 | 18.35          | 7.13  | 18.88 |
| CB-HS | 5.94                                    | 5.31  | 5.49  | 4.08           | 3.33 | 3.18 | 10.55          | 9.10  | 9.04  |
| BT-HS | 6.73                                    | 2.35  | 11.65 | 4.36           | 1.78 | 7.45 | 11.16          | 5.72  | 19.93 |
| VB-HS | 11.04                                   | 2.58  | 11.62 | 7.64           | 2.84 | 7.47 | 19.74          | 7.71  | 19.92 |
| CB-VS | 4.96                                    | 5.07  | 4.97  | 3.42           | 3.24 | 3.12 | 8.98           | 8.62  | 8.39  |
| BT-VS | 11.17                                   | 11.36 | 11.44 | 7.68           | 7.50 | 7.42 | 19.93          | 19.63 | 19.55 |
| VB-VS | 11.16                                   | 11.38 | 11.43 | 7.69           | 7.52 | 7.44 | 19.94          | 19.71 | 19.58 |

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

จากตาราง 4 พบว่า ทุกกรณีของการติดตั้งผังพืชพรรณสามารถช่วยลดความเข้มข้นของ PM<sub>2.5</sub> ได้ในช่วงประมาณร้อยละ 0.7–19.9 เมื่อเทียบกับสถานการณ์ปกติที่ยังไม่มีการติดตั้งผังพืชพรรณ โดยประสิทธิภาพการลดฝุ่นแตกต่างกันตามชนิดพืชพรรณ และรูปแบบการติดตั้งอย่างชัดเจน ในภาพรวม รูปแบบการติดตั้งแนวตั้งเว้นช่วง (VS) ให้ประสิทธิภาพสูงและสม่ำเสมอที่สุดในทุกตำแหน่งวัด โดยเฉพาะกรณีสร้อยอินทนิล (BT) และจัสมินใบต่าง (VB) ที่มีค่าการลดฝุ่นสูงสุดเกือบทุกสัดส่วนการปกคลุม และเมื่อพิจารณาตามตำแหน่ง พบว่า ตำแหน่งที่ 3 ให้ค่าการลดฝุ่นสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมาคือตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ตามลำดับ สะท้อนถึงอิทธิพลของทิศทางลมและลักษณะพื้นที่ต่อประสิทธิภาพของผังพืชพรรณ โดยพืชชนิดสร้อยอินทนิล (BT) และจัสมินใบต่าง (VB) ให้ผลการลดฝุ่นได้ดีกว่าแก้วแขก (CB) อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับรูปแบบแนวตั้งเว้นช่วง (VS) ที่ให้ค่าการลดฝุ่นสูงที่สุดในงานทดลองนี้

### ผลการจำลองผลกระทบของผืนพืชพรรณต่อฝุ่น PM10

ตาราง 5 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราการลดลงเฉลี่ยช่วงเวลา 8.00–18.00 น. ของค่าฝุ่น PM10 ณ 3 จุดวัด (หน่วย : ร้อยละจากสถานการณ์ปกติ)

| CASE  | PM10 Concentration (µg/m <sup>3</sup> ) |      |      |                |      |      |                |       |       |
|-------|-----------------------------------------|------|------|----------------|------|------|----------------|-------|-------|
|       | Position 1                              |      |      | Position 2     |      |      | Position 3     |       |       |
|       | Coverage Ratio                          |      |      | Coverage Ratio |      |      | Coverage Ratio |       |       |
|       | 25                                      | 50   | 75   | 25             | 50   | 75   | 25             | 50    | 75    |
| CB-PD | 1.01                                    | 3.51 | 2.45 | 0.75           | 2.57 | 1.41 | 3.48           | 6.85  | 4.92  |
| BT-PD | 3.27                                    | 6.42 | 5.53 | 2.70           | 4.15 | 3.31 | 6.98           | 10.92 | 9.00  |
| VB-PD | 8.80                                    | 2.60 | 9.37 | 6.37           | 2.64 | 6.22 | 16.41          | 7.19  | 16.58 |
| CB-HS | 4.54                                    | 4.51 | 4.68 | 3.27           | 2.83 | 2.71 | 8.81           | 8.06  | 8.01  |
| BT-HS | 5.60                                    | 1.91 | 9.73 | 3.66           | 1.47 | 6.39 | 9.43           | 5.04  | 17.47 |
| VB-HS | 9.18                                    | 2.59 | 9.70 | 6.54           | 2.77 | 6.40 | 17.33          | 7.72  | 17.47 |
| CB-VS | 4.22                                    | 4.34 | 4.27 | 2.92           | 2.76 | 2.66 | 7.97           | 7.67  | 7.48  |
| BT-VS | 9.49                                    | 9.57 | 9.53 | 6.58           | 6.42 | 6.35 | 17.51          | 17.24 | 17.16 |
| VB-VS | 9.30                                    | 9.90 | 9.56 | 6.59           | 6.44 | 6.37 | 17.51          | 17.30 | 17.19 |

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

จากตาราง 5 พบว่า แนวโน้มของ PM10 สอดคล้องกับ PM2.5 ทุกกรณีของการติดตั้งผืนพืชพรรณสามารถช่วยลดความเข้มข้นของ PM10 ได้ในช่วงประมาณร้อยละ 0.7–17.5 เมื่อเทียบกับสถานการณ์ปกติที่ยังไม่มีการติดตั้งผืนพืชพรรณ ในภาพรวมยังคงเป็นรูปแบบการติดตั้งแนวตั้งเป็นช่วง (VS) ให้ประสิทธิภาพสูงและสม่ำเสมอที่สุดในทุกตำแหน่งวัด โดยเฉพาะกรณีสร้อยอินทนิล (BT) และจัสมินใบด่าง (VB) ที่มีค่าการลดฝุ่นสูงสุดเกือบทุกสัดส่วนการปกคลุม และเมื่อพิจารณาตามตำแหน่ง พบว่า ตำแหน่งที่ 3 ให้ค่าการลดฝุ่นสูงที่สุดในทุกกรณี รองลงมาคือตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 ตามลำดับ สะท้อนถึงอิทธิพลของทิศทางลมและลักษณะพื้นที่ต่อประสิทธิภาพของผืนพืชพรรณ โดยพืชชนิดสร้อยอินทนิล (BT) และจัสมินใบด่าง (VB) ให้ผลการลดฝุ่นได้ดีกว่ากล้วยแขก (CB) อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับรูปแบบแนวตั้งเป็นช่วง (VS) ที่ให้ค่าการลดฝุ่นสูงที่สุดในงานทดลองนี้

### ผลการจำลองผลกระทบของผืนพืชพรรณต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

ตาราง 6 แสดงผลเปรียบเทียบอัตราการลดลงเฉลี่ยช่วงเวลา 8.00–18.00 น. ของค่าก๊าซ CO<sub>2</sub> ณ 3 จุดวัด (หน่วย : ร้อยละจากสถานการณ์ปกติ)

| CASE  | CO <sub>2</sub> Concentration (ppm) |      |      |                |      |      |                |      |      |
|-------|-------------------------------------|------|------|----------------|------|------|----------------|------|------|
|       | Position 1                          |      |      | Position 2     |      |      | Position 3     |      |      |
|       | Coverage Ratio                      |      |      | Coverage Ratio |      |      | Coverage Ratio |      |      |
|       | 25                                  | 50   | 75   | 25             | 50   | 75   | 25             | 50   | 75   |
| CB-PD | 0.03                                | 0.04 | 0.05 | 0.01           | 0.05 | 0.03 | 0.06           | 0.10 | 0.08 |
| BT-PD | 0.03                                | 0.06 | 0.06 | 0.04           | 0.08 | 0.07 | 0.10           | 0.14 | 0.12 |
| VB-PD | 0.07                                | 0.03 | 0.09 | 0.11           | 0.04 | 0.12 | 0.20           | 0.11 | 0.20 |
| CB-HS | 0.04                                | 0.05 | 0.06 | 0.07           | 0.05 | 0.05 | 0.12           | 0.12 | 0.12 |
| BT-HS | 0.05                                | 0.03 | 0.09 | 0.06           | 0.04 | 0.12 | 0.13           | 0.08 | 0.22 |
| VB-HS | 0.08                                | 0.03 | 0.09 | 0.12           | 0.04 | 0.12 | 0.22           | 0.12 | 0.22 |
| CB-VS | 0.04                                | 0.05 | 0.05 | 0.05           | 0.05 | 0.05 | 0.12           | 0.12 | 0.11 |
| BT-VS | 0.08                                | 0.09 | 0.09 | 0.12           | 0.12 | 0.12 | 0.22           | 0.22 | 0.21 |
| VB-VS | 0.08                                | 0.09 | 0.09 | 0.15           | 0.12 | 0.12 | 0.22           | 0.22 | 0.22 |

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

จากตาราง 6 พบว่า การติดตั้งผืนพืชพรรณมีแนวโน้มช่วยลดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสถานการณ์ปกติ โดยค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำและไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชนิดพืชพรรณ รูปแบบการติดตั้ง และสัดส่วนการปกคลุมในแต่ละกรณี ดังนั้นผลของผืนพืชพรรณในงานวิจัยนี้จึงไม่ส่งผลต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ และไม่ใช่ว่าปัจจัยหลักที่สะท้อนประสิทธิภาพของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการลดฝุ่นละออง PM2.5 และ PM10 ที่แสดงผลได้ชัดเจนกว่า

## สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณในการลดระดับ PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> และคาร์บอนไดออกไซด์ บริเวณพื้นที่หน้าอาคาร พบว่า การติดตั้งพืชพรรณในสัดส่วนพื้นที่ที่มากขึ้นช่วยให้ระดับมลพิษมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้ง ซึ่งพบการลดลงของค่า PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub> อย่างต่อเนื่องในทุกสัดส่วนพื้นที่ที่มีการติดตั้ง ทั้งนี้ ชนิดพืชพรรณที่นำมาทดลอง ได้แก่ ถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris*) สร้อยอินทนิล (*Thunbergia grandiflora*) และจัสมินใบด่าง (*Pandorea jasminoides Variegated*) ต่างแสดงศักยภาพในการลดมลพิษในระดับที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการติดตั้งแนวตั้งแนวตั้ง (vertical strip) ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในทุกตำแหน่งวัด และมีความสม่ำเสมอสูงที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับพืชสร้อยอินทนิล (*Thunbergia grandiflora*) และจัสมินใบด่าง (*Pandorea jasminoides Variegated*) ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกันและอยู่ในกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถช่วยลด PM<sub>2.5</sub> และ PM<sub>10</sub> ได้ประมาณ 17–20% จากกรณีที่ไม่มีการติดตั้งผนังพืชพรรณ ขณะที่พืชพรรณชนิดถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris*) แม้ให้ผลลดน้อยกว่า แต่ยังคงส่งผลเชิงบวกต่อการปรับปรุงคุณภาพอากาศในทิศทางเดียวกัน

ในด้านการลดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า แต่ละกรณีให้ผลใกล้เคียงกันทั้งหมด โดยไม่สามารถแยกความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างชนิดพืชพรรณหรือรูปแบบการติดตั้งได้อย่างชัดเจน กล่าวคือไม่มีกรณีใดที่โดดเด่นหรือด้อยกว่ากันอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนว่าผนังพืชพรรณในลักษณะการติดตั้งที่ศึกษาไม่ได้ส่งผลต่อการลดคาร์บอนไดออกไซด์อย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทั้งหมดร่วมกัน ทั้งชนิดพืชพรรณ วิธีการติดตั้ง และสัดส่วนพื้นที่ปกคลุม พบว่า พืชพรรณชนิดจัสมินใบด่าง (*Pandorea jasminoides Variegated*) และสร้อยอินทนิล (*Thunbergia grandiflora*) ภายใต้การติดตั้งแบบแนวตั้งแนวตั้ง (vertical strip) ในสัดส่วนพื้นที่ปกคลุม 25% เป็นรูปแบบที่ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด โดยให้ผลการลดฝุ่นได้เด่นชัดและมีความสม่ำเสมอในหลายตำแหน่งวัด เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่น

โดยสรุป การติดตั้งผนังพืชพรรณสามารถพิจารณาเป็นมาตรการเชิงพื้นที่ที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพอากาศในบริเวณหน้าอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การเลือกชนิดพืชควรพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการลดมลพิษและความคุ้มค่าในการดูแลรักษา เพื่อให้การใช้งานจริงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างยั่งยืนและตอบโจทย์บริบทพื้นที่ในระยะยาว

## อภิปรายผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ในรูปแบบการติดตั้งแบบแนวตั้งแนวตั้ง (vertical strip) สัดส่วนพื้นที่ปกคลุมของผนังพืชพรรณที่ระดับ 25% ให้ค่าการลดฝุ่นต่ำที่สุดในหลายกรณี ซึ่งเป็นผลที่แตกต่างจากสมมติฐานทั่วไปที่มักคาดว่า การเพิ่มพื้นที่พืชพรรณจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดมลพิษอย่างเป็นเชิงเส้น (Ghafar et al., 2020) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลทิศทางลมระหว่าง การจำลอง (ดูภาพ 4) พบว่า ช่วงเวลาส่วนใหญ่ของวันลมพัดจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ถึงตะวันตก (ประมาณ 230–280 องศา) ในลักษณะปะทะหน้าอาคารค่อนข้างตั้งฉาก ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนอากาศบริเวณผิวอาคารอย่างต่อเนื่อง และช่วยพัดพาผลพิษออกจากพื้นที่ศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวอาคารในพื้นที่ศึกษาทำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างแหล่งกำเนิดมลพิษภายนอกกับพื้นที่ภายใน ซึ่งอาจมีส่วนช่วยลดหรือเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองเข้าสู่พื้นที่ ภายใต้เงื่อนไขนี้สัดส่วนพื้นที่ปกคลุม 25% มีช่องเปิดที่เหมาะสมต่อการไหลของลมผ่านแนวพืช ทำให้สามารถเกิดทั้งกระบวนการดักจับฝุ่นโดยพื้นผิวใบ และกระบวนการพัดพาและเจือจางมลพิษไปพร้อมกัน ขณะที่การเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ปกคลุมเป็น 50% และ 75% ทำให้โครงสร้างพืชพรรณมีความทึบมากขึ้น ลดการผ่านของลม และมีแนวโน้มก่อให้เกิดตำแหน่งสะสมของฝุ่นใกล้ผิวอาคาร ส่งผลให้ค่าการลดฝุ่นไม่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่ต่ำกว่า



ภาพ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมช่วงเวลา 18.00 น.

ที่มา : ผู้วิจัย, 2568

ในช่วงเวลาประมาณ 18.00 น. รูปแบบการกระจายตัวของมลพิษเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากทิศทางลมเปลี่ยนเป็นทิศตะวันออกเฉียงใต้ (ประมาณ 140 องศา) ซึ่งมีความสอดคล้องกับแนวถนนทางม้าลายและแนวเส้นทางสัญจรหลักภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลักษณะการไหลของลมในทิศดังกล่าวส่งผลให้มลพิษจากการจราจรถูกพัดเคลื่อนที่ไปตามแนวถนนและเข้าสู่พื้นที่หน้าอาคารโดยตรง แทนที่จะถูกพัดตัดผ่านพื้นที่และเจือจางออกไปเหมือนในช่วงเวลาอื่น นอกจากนี้ การไหลของลมที่ขนานกับแนวอาคารและการเรียงตัวของอาคารอย่างต่อเนื่องในพื้นที่ศึกษา มีแนวโน้มก่อให้เกิดบริเวณลมอ่อนและการหมุนวนของอากาศ (recirculation zone) ใกล้ผิวอาคาร โดยเฉพาะในระดับความสูงใกล้กับระดับคนเดิน ซึ่งเอื้อต่อการสะสมของฝุ่นละอองและลดประสิทธิภาพของกลไกการพัดพาออกจากพื้นที่ เมื่อประกอบกับการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมมนุษย์และปริมาณการจราจรในช่วงหัวค่ำ ทำให้ความเข้มข้นของมลพิษที่เข้าสู่ระบบการจำลองสูงขึ้นจนบดบังผลของการลดฝุ่นจากผนังพืชพรรณบางรูปแบบ เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างชนิดพืช พบว่า ค่า LAI เพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายประสิทธิภาพการลดฝุ่นได้อย่างครบถ้วน โดยพืชที่มีค่า LAI สูงและทรงพุ่มทึบ เช่น ถั่วแขก อาจขัดขวางการไหลของอากาศและก่อให้เกิดการสะสมฝุ่นภายในชั้นพืช ขณะที่พืชที่มีโครงสร้างพุ่มโปร่งกว่า เช่น จัสมินใบด่างและสร้อยอินทนิล เอื้อต่อการไหลผ่านของลมและช่วยพัดพามลพิษออกจากผิวอาคารได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ได้ค่าการลดฝุ่นที่สม่ำเสมอมากกว่า โดยภาพรวมผลการศึกษานี้สะท้อนว่าประสิทธิภาพของผนังพืชพรรณในการลดมลพิษในบริบทเมืองขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างทิศทางลม ความสม่ำเสมอของการไหลของอากาศ และรูปแบบการติดตั้ง มากกว่าปริมาณพื้นที่ปกคลุมของพืช หรือค่า LAI เพียงอย่างเดียว (Cui et al., 2022) โดยรูปแบบการติดตั้งผนังพืชพรรณแบบแนวตั้งเว้นช่องแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตอบสนองต่อสภาพลมที่เปลี่ยนแปลงได้ดีที่สุดในพื้นที่ศึกษา

ในเชิงการจัดการสิ่งแวดล้อมและการดูแลสุขภาพ ในการเลือกใช้จัสมินใบด่าง หรือสร้อยอินทนิล ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแสงแดดจัด โดยควรมีการตัดแต่งอย่างสม่ำเสมอเพื่อควบคุมความหนาแน่นของพุ่มใบไม่ให้ทึบตันเกินไป อันอาจส่งผลต่อการไหลเวียนอากาศ รวมถึงควรมีระบบให้น้ำเพื่อบำรุงรักษาของพืชในระยะยาว (Perini et al., 2011)

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง ENVI-met โดยไม่มีการติดตั้งผนังพืชพรรณจริงในพื้นที่ศึกษา ทำให้ยังไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการดักจับฝุ่นละอองของพืชในสภาพจริงได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะปัจจัยด้านลักษณะทางกายภาพของพืช เช่น ขนาด รูปทรง และผิวใบ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพพุ่มตามเวลา ซึ่งอาจส่งผลต่อการไหลของอากาศและการสะสมของฝุ่นละอองใกล้ผิวอาคาร ขณะที่แนวทางการศึกษาในอนาคต ควรมีการติดตั้งผนังพืชพรรณจริงและตรวจวัดคุณภาพอากาศภายใต้สภาพการจราจรและทิศทางลมจริง โดยเน้นช่วงที่มีปัญหาฝุ่นรุนแรง เช่น เดือนมกราคมถึงมีนาคม พร้อมทั้งติดตามผลในระยะยาว เพื่อประเมินความเสถียรของประสิทธิภาพการลดมลพิษและยืนยันผลจากแบบจำลองให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เหมาะสม

## บรรณานุกรม

ข้อมูลพันธุ์ไม้ : ระบบฐานข้อมูลเกษตรดิจิทัล. (ม.ป.ป.). <https://data.addrun.org/plant/>

- Barwise, Y., & Kumar, P. (2020). Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: A practical review for appropriate plant species selection. *npj Climate and Atmospheric Science*, 3(1), 12. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3>
- Bréda, N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54(392), 2403–2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>
- Borna, M., & Yeganeh, M. (2024). Analysis of the impact of growing green walls based on the reduction of PM2.5 particles in the resilient central urban fabric. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1443554>
- Choomanee, P., Bualert, S., Thongyen, T., Salao, S., Szymanski, W. W., & Rungratanaubon, T. (2020). Vertical variation of carbonaceous aerosols with in the PM2.5 fraction in Bangkok, Thailand. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(1), 43-52. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0192>
- Ciacchi, C., Banti, N., Di Naso, V., & Bazzocchi, F. (2023). Green strategies for improving urban microclimate and air quality: A case study of an Italian industrial district and facility. *Building and Environment*, 244, 110762. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110762>
- Cui, D., Zhang, Y., Li, X., Yuan, L., Mak, C. M., & Kwok, K. (2022). Effects of different vertical façade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons. *Urban Forestry & Urban Greening*, 72, 127582. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127582>
- Ferm, M., & Sjöberg, K. (2015). Concentrations and emission factors for PM2.5 and PM10 from road traffic in Sweden. *Atmospheric Environment*, 119, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.037>
- Gardenia. (n.d.). *Thunbergia grandiflora* (Blue trumpet vine). <https://www.gardenia.net/plant/thunbergia-grandiflora>
- Ghafar, A. A., Said, I., Fauzi, A. M., Shai-in, Jaafar, B., & Said, I. B. (2020). Comparison of leaf area index from four plant species on vertical greenery system in Pasir Gudang, Malaysia. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 28(2), 735-748. <http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/38310/>
- Guo, Y., Xiao, Q., Ling, C., Teng, M., Wang, P., Xiao, Z., & Wu, C. (2023). The right tree for the right street canyons: An approach of tree species selection for mitigating air pollution. *Building and Environment*, 245, 110886. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110886>
- Han, L., Zhou, W., Li, W., & Qian, Y. (2017). Global population exposed to fine particulate pollution by population increase and pollution expansion. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(10), 1221–1226. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0506-8>
- Heshani, A. L. S., & Winijkul, E. (2022). Numerical simulations of the effects of green infrastructure on PM2.5 dispersion in an urban park in Bangkok, Thailand. *Heliyon*, 8(9), e10475. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10475>

- Jareemit, D., Liu, J., & Srivanit, M. (2023). Modeling the effects of urban form on ventilation patterns and traffic-related PM2.5 pollution in a central business area of Bangkok. *Building and Environment*, 244, 110756. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110756>
- Jin, M. Y., Zhang, L. Y., Peng, Z. R., He, H. D., Kumar, P., & Gallagher, J. (2024). The impact of dynamic traffic and wind conditions on green infrastructure performance to improve local air quality. *Science of The Total Environment*, 917, 170211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170211>
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 19–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Kaveh, S., Habibi, A., Nikkar, M., & Aflaki, A. (2024). Optimizing green infrastructure strategies for microclimate regulation and air quality improvement in urban environments: A case study. *Nature-Based Solutions*, 6, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100167>
- Khalili, S., Kumar, P., & Jones, L. (2024). Evaluating the benefits of urban green infrastructure: Methods, indicators, and gaps. *Heliyon*, 10(19), e38446. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38446>
- Li, Y., & Jing, X. (2025). *Optimization design of tree array space in pedestrian street based on PM2.5 distribution*. In B. J., He, D., Prasad, L., Yan, A., Cheshmehzangi, & G., Pignatta, (Eds.), *International Conference on Urban Climate, Sustainability and Urban Design* (pp. 590-602). Springer.
- Liu, X., Shi, X. Q., Peng, Z. R., & He, H. D. (2023). Quantifying the effects of urban fabric and vegetation combination pattern to mitigate particle pollution in near-road areas using machine learning. *Sustainable Cities and Society*, 93, 104524. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104524>
- Liu, Z., Cheng, W., Jim, C. Y., Morakinyo, T. E., Shi, Y., & Ng, E. (2021). Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment*, 200, 107939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>
- Mobarhan, M., Yeganeh, M., Motie, M. B., & Ahmadi, S. (2024). Assessing the efficacy of green walls versus street green lanes in mitigating air pollution: A critical evaluation. *Environmental and Sustainability Indicators*, 24, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100475>
- NC State Extension. (n.d.). *Phaseolus vulgaris*. <https://plants.ces.ncsu.edu/plants/phaseolus-vulgaris/>
- Pérez, G., Coma, J., Chàfer, M., & Cabeza, L. F. (2022). Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade. *Building and Environment*, 207, 108497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108497>
- Perini, K., Ottel  , M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287–2294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Rodrigues, V., Augusto, B., Oliveira, K., Ascenso, A., Rafael, S., Nascimento, D., & Miranda, A. I. (2024). Setting up a CFD model to evaluate the impact of green infrastructures on local air quality. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(10), 2151-2167. <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01567-6>

- Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E., & Ding, W. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation*, 12(2), 183-194. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, 30(7), 101262. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101262>
- Šuklje, T., Hamdy, M., Arkar, C., Hensen, J. L. M., & Medved, S. (2019). An inverse modeling approach for the thermal response modeling of green façades. *Applied Energy*, 235(1), 1447-1456. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.066>
- Tripathi, D. P., & Nema, A. K. (2023). Seasonal variation of biochemical parameters and air pollution tolerance index (APTI) of selected plant species in Delhi city, and detailed meta-analysis from Indian metropolitan cities. *Atmospheric Environment*, 309, 119862. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119862>
- Valappil, A. K., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R. W., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71-86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- Vallero, D. A. (2020). 27 - Energy and the Environment. In T. M. Letcher (Ed.), *Future energy* (3<sup>rd</sup> ed., pp. 583-609). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00027-X>
- Viecco, M., Jorquera, H., Sharma, A., Bustamante, W., Fernando, H. J. S., & Vera, S. (2021). Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*, 204, 108120. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108120>
- Vitaliano, S., Cascone, S., & D’Urso, P. R. (2024). Mitigating built environment air pollution by green systems: An in-depth review. *Applied Sciences*, 14(15), 6487.
- Vox, G., Blanco, I., & Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129(1), 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Wang, P., Wong, Y. H., Tan, C. Y., Li, S., & Chong, W. T. (2022). Vertical greening systems: Technological benefits, progresses and prospects. *Sustainability*, 14(20), 12997. <https://doi.org/10.3390/su142012997>
- Wu, J., Luo, K., Wang, Y., & Wang, Z. (2021). Urban road greenbelt configuration: The perspective of PM2.5 removal and air quality regulation. *Environment International*, 157, 106786. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106786>
- Xue, W., Lin, Y., Sun, Z., Long, Y., Chen, D., & Yin, S. (2025). Effects of leaf trait variability on PM retention: A systematic review. *Atmosphere*, 16(2), 170. <https://doi.org/10.3390/atmos16020170>
- Yates. (n.d.). *How to grow pandorea*. <https://www.yates.com.au/how-to-grow/pandorea/>