

แนวทางการกำหนดเรขาคณิตของเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้ต่อการไหลเวียนของอากาศ
และการลดการสะสมมลพิษในอากาศของพื้นที่หุบเขาถนนของเมืองกรุงเทพมหานคร
ประรินทร์ บุตรดี

A Guideline for urban geometry with tree planting and effect on ventilation and reduce air pollution
concentration of urban street canyon in Bangkok

Parin Buddee

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ศิลปะและการออกแบบ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Faculty of Architecture, Art and Design, Naresuan University

Corresponding author. E-mail address: parinb@nu.ac.th

received: January 23,2023; revised: March 10,2023; accepted: August 12,2023

บทคัดย่อ

ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM) หรือฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ที่เกิดจากการจราจรในพื้นที่เมืองเป็นมลพิษทางอากาศ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้พื้นที่บริเวณถนน ซึ่งแนวทางการลดมลพิษทางอากาศในพื้นที่เมืองคือการเพิ่มการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ และการปลูกต้นไม้บริเวณถนนที่มีการจราจร แต่การระบายอากาศในพื้นที่เมืองเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากกระแสลมถูกสกัดกั้นด้วยอาคาร ซึ่งความหนาแน่นของเมืองพิจารณาจากเรขาคณิตของเมืองและทำการศึกษา ผ่านพื้นที่หุบเขาถนนของเมือง งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการหาแนวทางกำหนดเรขาคณิตของเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้ที่จะส่งผลต่อการไหลเวียนของอากาศและการช่วยลดการสะสม PM 2.5 ในพื้นที่หุบเขาถนนของเมือง โดยจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรม Envi-met ของพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมืองกรุงเทพมหานคร 2 พื้นที่ ที่มีแนวถนนแนวถนนหันทางด้านทิศตะวันออก - ตะวันตก เพื่อให้ทิศทางลมพัดตั้งฉากกับแนวถนน และทดสอบการจัดเรียงต้นไม้ในพื้นที่ดังกล่าว โดยกำหนดขอบเขตพื้นที่ กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 300 x 300 x 150 เมตร ซึ่งเป็นขอบเขตพื้นที่ที่สามารถประเมินสภาพแวดล้อมในระดับย่านที่ได้รับอิทธิพลจากอาคารข้างเคียงได้ ผลการทดสอบพบว่า อัตราส่วนความสูงของอาคารต่อความกว้างของถนน (Height to width ratio : H/W) และ ค่าระยะของความหยาบ (Roughness length : Z_0) ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วลม หากอาคารฝั่งที่รับลมมีความสูงกว่าอาคารฝั่งที่อยู่ใต้ลมจะทำให้ค่าความเร็วลมในพื้นที่หุบเขาถนนสูงขึ้นและสามารถลดค่าการสะสม PM 2.5 ได้ส่วนการใช้ต้นไม้ที่มีค่า LAI น้อย มีลำต้นสูง ปลูกตามแนวถนนด้วยระยะห่างระหว่างต้นไม้ 15 เมตร จะไม่ทำให้ค่าความเร็วลมบริเวณใต้ต้นไม้ลดลง โดยการจัดเรียงของต้นไม้แบบ 2 แถว กับ จัดเรียงกึ่งกลางถนนสามารถลดค่าการสะสม PM 2.5 ได้เท่ากัน

คำสำคัญ: ฝุ่นละอองขนาดเล็ก เรขาคณิตของเมือง หุบเขาถนนของเมือง การจัดเรียงต้นไม้

ABSTRACT

Particulate matter (PM), particularly PM 2.5, is a significant air pollutant generated by urban traffic, posing serious health risks to pedestrians. Reducing PM 2.5 concentrations in urban areas requires strategies such as enhancing natural ventilation and planting trees along streets. But urban ventilation is often hindered by building induced airflow obstruction. Urban geometry indicated Urban density and study on urban street canyon. This study investigates the role of urban geometry and tree planting in mitigating PM 2.5 concentrations in urban street canyons. The simulation studies run with Envi-met software for two urban street canyon models in Bangkok metropolitan, focusing on the east-west road orientation to align the wind direction

perpendicular to the street axis and tree arrangement in this area. The simulation area, with dimensions of $300 \times 300 \times 150$ meters, represents a neighborhood-scale environment influenced by surrounding buildings. The results reveal that the height-to-width (H/W) ratio and Roughness length (Z_0) are not related to wind speed. However, higher windward buildings relative to leeward ones enhance wind speed and reduce PM_{2.5} concentrations. The study also reveals that planting tall trees with low density leave index at 15 meters intervals along the street preserves wind flow while reducing PM_{2.5} levels. Tree arrangements in either double rows or along the street center yield comparable reductions in PM_{2.5} concentrations.

Keyword: Particulate Matter, Urban Geometry, Urban Street Canyon, Tree Arrangement

ที่มาและความสำคัญ

มลพิษทางอากาศในพื้นที่เมืองส่วนใหญ่เกิดจากการจราจรบนถนน โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particle Matter : PM) หรือฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากควันเสียของรถยนต์ นอกจากนี้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นทำให้เกิดฝุ่น PM ได้ ส่งผลกระทบต่อปัญหาสุขภาพของผู้ที่ใช้พื้นที่บริเวณถนนในเมือง (Ehrnsperger & Klemm, 2022; Jin et al., 2014; Kleeman et al., 2000; Kulmala, 2015) โดยฝุ่น PM 2.5 สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจผ่านการหายใจ ทำให้เกิดการเจ็บป่วยเกี่ยวกับระบบหายใจ ระบบหัวใจ และ หลอดเลือด รวมถึงมะเร็งปอด (World Health Organization, 2012) ซึ่งแนวทางการลดมลพิษทางอากาศในพื้นที่เมืองคือการเพิ่มการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติจากการไหลเวียนของกระแสลมจะสามารถช่วยเจือจาง และ พัดพามลพิษทางอากาศออกไปได้ แต่การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติในพื้นที่เมืองเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากกระแสลมถูกสกัดกั้นด้วยอาคาร (Balczó et al., 2009)

ความหนาแน่นของเมืองพิจารณาได้จากเรขาคณิตของเมือง (Urban geometry) ที่เป็นปัจจัยที่บ่งชี้ถึงความหนาแน่นของกลุ่มอาคาร (United States Environmental, 2008) จากลักษณะการวางผังเมืองที่ถูกกำหนดด้วยผังการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการพัฒนาของเมืองทางแนวดิ่งที่ทำให้เกิดอาคารสูงเพิ่มขึ้น ที่วางในพื้นที่เมืองจึงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกลุ่มอาคาร และสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อการไหลเวียนของอากาศในพื้นที่เมือง (Kubota et al., 2008; Yang et al., 2020) โดยเฉพาะภายในบริเวณหุบเขาถนนของเมือง (Urban street canyon : USC) ที่มีปัจจัยด้านการหันทิศทางของหุบเขาถนน (Orientation) และ เรขาคณิตของหุบเขาถนน (Canyon geometry) ที่แสดงออกด้วยอัตราส่วนความสูงของอาคารต่อความกว้างของถนน (Height to width ratio : H/W) ปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของทิศทางของลมที่ปะทะกับหุบเขาถนนของเมือง (Oke, 1987) โดยปัจจัยด้านการหันทิศทางของแนวดิ่ง และ เรขาคณิตของหุบเขาถนนจะทำให้ความเร็วลมลดลงเนื่องจากถูกสกัดกั้นด้วยอาคาร และ ทางสัญจรที่มีความซับซ้อน เมื่อความเร็วลมถูกจำกัดจะทำให้ขาดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และ เกิดการสะสมของมลพิษ (Wong & Jusuf, 2013) โดยเฉพาะทิศทางลมจากภายนอกที่พัดตั้งฉากกับแนวอาคาร หากมีความเร็วลมร่วมกับหุบเขาถนนที่มีค่า H/W เหมาะสม หรือ ผนังของอาคารฝั่งที่รับลม (Windward wall) มีความสูงมากกว่าที่ทำให้ลมปะทะแล้วสามารถพัดเข้าสู่พื้นที่หุบเขาถนนได้ จะสามารถเกิดกระแสลมแบบหมุนวน (Vortex-flow) ภายในพื้นที่หุบเขาถนน จะยังทำให้เกิดการสะสมของมลพิษทางอากาศมากขึ้นกับผนังฝั่งท้ายลม (Leeward wall) บริเวณใกล้พื้นถนนภายในพื้นที่หุบเขาถนนได้ (Li et al., 2020; Nazridoust & Ahmadi, 2006; Oke, 1987) ทั้งนี้ รูปแบบการไหลเวียนของอากาศภายในหุบเขาถนนก็ขึ้นอยู่กับกระแสลมปั่นป่วน (Turbulence) จากภายนอกหุบเขาถนนด้วย (Salizzoni et al., 2009)

การปลูกต้นไม้บริเวณถนนที่มีการจราจรเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้อากาศดีขึ้นได้จากการดักจับฝุ่น PM ด้วยใบไม้ อีกทั้งยังช่วยชะลอการพัดพาของฝุ่น PM ในอากาศได้ (Morakinyo & Lam, 2016a) นอกจากนี้ใบของอนุภาคน้ำยังถูกดูดซับเข้าไปในใบ ซึ่งอนุภาคที่เป็นมลพิษดังกล่าวรวมไปถึง SO₂ NO_x คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ โอโซนที่ระดับพื้นดิน (O₃) (United States Environmental, 2008) ซึ่งการปลูกต้นไม้บริเวณถนนจะต้องมีความหนาแน่นที่เพียงพอต่อการดักจับอนุภาคของมลพิษทางอากาศ สามารถพิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของพื้นที่ใบ (Leaf Area Density : LAD) (Deshmukh et al., 2019) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index : LAI) (Morakinyo & Lam, 2016b) และการเพิ่มพื้นที่ต้นไม้ปกคลุมให้มีความหนาแน่นสูงจะยิ่งช่วยลดการสะสมของฝุ่น PM ได้ดี (Wang et al., 2020) แต่ในกรณีของพื้นที่ภายในหุบเขาถนนของเมืองพบว่า การปลูกต้นไม้จะเป็นตัวสกัดกั้นการไหลเวียนของอากาศ ทำให้ความเร็วลมลดลง และ เกิดการสะสมของ

มลพิษทางอากาศได้ (Kai & Joachim, 2001) โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของต้นไม้ที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศในพื้นที่หุบเขาถนน พบว่าปัจจัยด้านการหันทิศทางของแนวถนน และ H/W ของหุบเขาถนน ร่วมกับการปลูกต้นไม้มีความสัมพันธ์กับการสะสมของฝุ่น PM ที่ความสูงระดับผู้ใช้ทางเท้า โดยต้นไม้ที่มีทรงพุ่มกว้างจะเป็นตัวสกัดกั้นการไหลเวียนของอากาศจนเกิดการสะสมของฝุ่น PM ได้มากกว่าต้นไม้ที่มีทรงพุ่มสูง (Miao et al., 2022) รวมถึงการเพิ่มพื้นที่ต้นไม้ปกคลุมจะยิ่งทำให้เกิดการสะสมมลพิษมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผนังฝั่งท้ายลมของพื้นที่หุบเขาถนน (Fellini et al., 2022; Gromke & Ruck, 2009; Kai & Joachim, 2001) ในบางกรณี ปัจจัยด้านความสูงของพุ่มไม้ก็ส่งผลต่อรูปแบบการสะสมมลพิษบริเวณผนัง รวมถึงการเว้นระยะของการปลูกต้นไม้ให้ห่างขึ้นก็จะยิ่งช่วยลดการสะสมของมลพิษได้เช่นกัน (Gromke & Ruck, 2007)

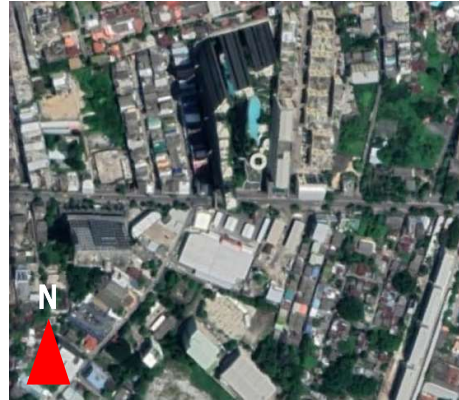
ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลเวียนของอากาศ และการสะสมของมลพิษทางอากาศในพื้นที่หุบเขาถนน รวมถึงการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาถนนของเมืองที่ส่งผลต่อมลพิษทางอากาศในพื้นที่หุบเขาถนน โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การศึกษาผ่านการจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือ Computational fluid dynamics (CFD) เป็นที่นิยมใช้สำหรับการคาดการณ์มลพิษทางอากาศจากการจำลองการปล่อยมลพิษจากการจราจรในพื้นที่เมือง โดยสามารถกำหนดแหล่งกำเนิดตามแนวนอนได้ (Nazridoust & Ahmadi, 2006; Wang et al., 2020) ซึ่งโปรแกรม ENVI-met เป็นโปรแกรมที่มีพื้นฐานมาจาก CFD และ เป็นโปรแกรมจำลองสภาพแวดล้อมด้วยการสร้างกระบวนการในชั้นบรรยากาศที่ส่งผลต่อภูมิอากาศจุลภาคบนพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) สามารถวิเคราะห์ภูมิอากาศจากการจำลองพื้นที่เมืองที่มีความซับซ้อน เช่น รูปทรงของอาคาร รวมไปถึงปัจจัยของต้นไม้ (Bruse, 2013) และ สามารถจำลองการแพร่กระจาย และการสะสมของอนุภาคที่เป็นตัวแทนของมลพิษทางอากาศได้ (Morakinyo & Lam, 2016a)

งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดมุ่งหมายในการหาแนวทางกำหนดเรขาคณิตของเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาถนน ที่จะส่งผลต่อการไหลเวียนของอากาศ และการช่วยลดการสะสมฝุ่น PM 2.5 ในพื้นที่หุบเขาถนนของเมือง โดยเลือกพื้นที่เมืองกรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่กรณีศึกษา เนื่องจากเป็นเมืองที่มีกลุ่มอาคารหนาแน่น ซึ่งการกำหนดเรขาคณิตของเมืองสามารถพิจารณาจากอัตราส่วนพื้นที่อาคารรวมต่อพื้นที่ดิน (Floor area ratio : FAR) โดยในกระบวนการศึกษาจะทำการคัดเลือกตัวแทนพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นตามผังเมืองรวมกรุงเทพมหานครจำนวน 2 พื้นที่กรณีศึกษา ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยเลือกพื้นที่หุบเขาถนนที่แนวถนนหันทิศทางตะวันออก - ตะวันตก เพื่อให้ทิศทางลมพัดตั้งฉากกับแนวอาคาร เป็นปัจจัยที่ทำให้กระแสลมพัดเข้าสู่พื้นที่หุบเขาถนนเพื่อสร้างกระแสลมแบบหมุนวนในหุบเขาถนน แล้วทำการจำลองการปลูกต้นไม้ในพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมือง โดยการปลูกต้นไม้ที่มีค่า LAI น้อย เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้ (Morakinyo & Lam, 2016b) ทำการจัดเรียงต้นไม้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การจัดเรียงแบบ 2 แถวตามแนวถนน และ การจัดเรียงตามแนวทแยงถนน เว้นระยะห่างระหว่างต้นไม้ 15 เมตร ทำการจำลองสภาพแวดล้อม และเก็บค่าข้อมูลด้วยโปรแกรม ENVI-met v. 5 โดยเก็บข้อมูลความเร็วลม และการสะสมของมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ฝุ่น PM 2.5 จากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อมูลแล้ววิเคราะห์ผลของค่าข้อมูล โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเสนอแนวทางการกำหนดเรขาคณิตของเมืองร่วมกับการปลูกต้นไม้ที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศ และการลดการสะสมมลพิษทางอากาศ

ระเบียบวิธีวิจัย

การเลือกพื้นที่กรณีศึกษา

พื้นที่กรณีศึกษากรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศไทย มีกฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2556 เป็นกฎหมายที่ประกาศให้ใช้บังคับผังเมืองรวมในเขตกรุงเทพมหานคร เป็นมาตรการที่กำหนดการใช้ประโยชน์ที่ดิน กำหนดความสูงของอาคาร และกำหนดที่ว่างโดยรอบของอาคาร ซึ่งตัวบ่งชี้พื้นฐานวิทยาของเมืองกรุงเทพมหานครถูกกำหนดด้วยแผนผังการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับการวางผังเมืองที่จำแนกประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยการกำหนดอัตราส่วนพื้นที่อาคารรวมต่อพื้นที่ดิน (Floor Area Ratio : FAR) อัตราส่วนของที่ว่างต่อพื้นที่อาคารรวม (Open space ratio : OSR) และ ระยะร่นรอบอาคารของที่ดินแต่ละประเภท โดยงานวิจัยชิ้นนี้มีเกณฑ์การเลือกพื้นที่กรณีศึกษาพิจารณาจากแนวถนนสายหลักที่ให้แนวถนนหันทางด้านทิศตะวันออก - ตะวันตก เพื่อให้ทิศทางลมพัดตั้งฉากกับแนวอาคาร และไม่มีปัจจัยของโครงสร้างทางรถไฟตัดตลอดแนวถนน โดยคัดเลือกพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นสูง (สีแดง) 2 พื้นที่กรณีศึกษาที่มีค่า FAR และ OSR แตกต่างกัน ประกอบด้วยบริเวณถนนเพชรบุรีซึ่งอยู่ในเขตประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน พ.๕-๑ (ภาพที่ 1ก) และ บริเวณถนนอุดมสุขซึ่งอยู่ในเขตประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน พ.๓-๔๑ (ภาพที่ 1 ข)



1ก



1ข

ภาพ 1 ภาพถ่ายทางอากาศจาก Google map และ ภาพถ่ายแสดงพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนน
บริเวณถนนเพชรบุรี (1ก) และ บริเวณถนนอุดมสุข (1ข) ถ่ายเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ.2564

เรขาคณิตของหุบเขาถนนของพื้นที่การศึกษา

อัตราส่วนความสูงของอาคารต่อความกว้างของถนน (H/W)

การหาค่า H/W ใช้วิธีโครงข่ายสามเหลี่ยมที่ไม่เท่ากัน (Samsonov et al., 2015) ซึ่งเหมาะสำหรับการหา H/W ของพื้นที่หุบเขาถนนที่มีความซับซ้อน และอาคารทั้งสองฝั่งไม่สมมาตรกัน โดยหาจากเส้นกรอบอาคารตามแนวนอน ทำการสร้างรูปสามเหลี่ยมด้วยเส้นที่เชื่อมต่อกันจากมุม หรือ ผนังของอาคาร จากอีกฝั่งหนึ่งไปยังฝั่งตรงกันข้าม กำหนดให้รูปสามเหลี่ยมมีอย่างน้อย 1 จุดเชื่อมกับเส้นกรอบอาคาร หาคความกว้างของหุบเขาถนนจากค่าความสูงของสามเหลี่ยมแต่ละรูป (Triangle Altitude) ที่ตั้งฉากกับเส้นด้านที่ไม่ได้ตัดผ่านแนวนอน (ภาพที่ 2) ซึ่งความสูงของสามเหลี่ยมสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$w_i = \frac{2S_i}{a_i} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ S_i คือ พื้นที่สามเหลี่ยม i และ a คือ ความยาวของสามเหลี่ยมด้านที่ตั้งฉากกับความสูง หลังจากนั้น สามารถทำการหาค่ากลางของความกว้างภายในหุบเขาถนน (W) ได้ดังนี้

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n S_i w_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ n คือ จำนวนของสามเหลี่ยมภายในหุบเขาถนน สามารถหาค่ากลางของความสูงภายในหุบเขาถนน (H) ได้ดังนี้

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n P_i h_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ n คือ จำนวนอาคารภายในหุบเขาถนน ส่วน h_i คือ ความสูงของอาคาร i_{th} และ P_i คือระยะเส้นกรอบของอาคาร i_{th} สำหรับเส้นกรอบของหุบเขาถนนจะต้องอ้างอิงจากเส้นกรอบของกลุ่มอาคาร (ภาพที่ 2) ทำให้สามารถหาอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของหุบเขาถนน (R) ได้ดังนี้

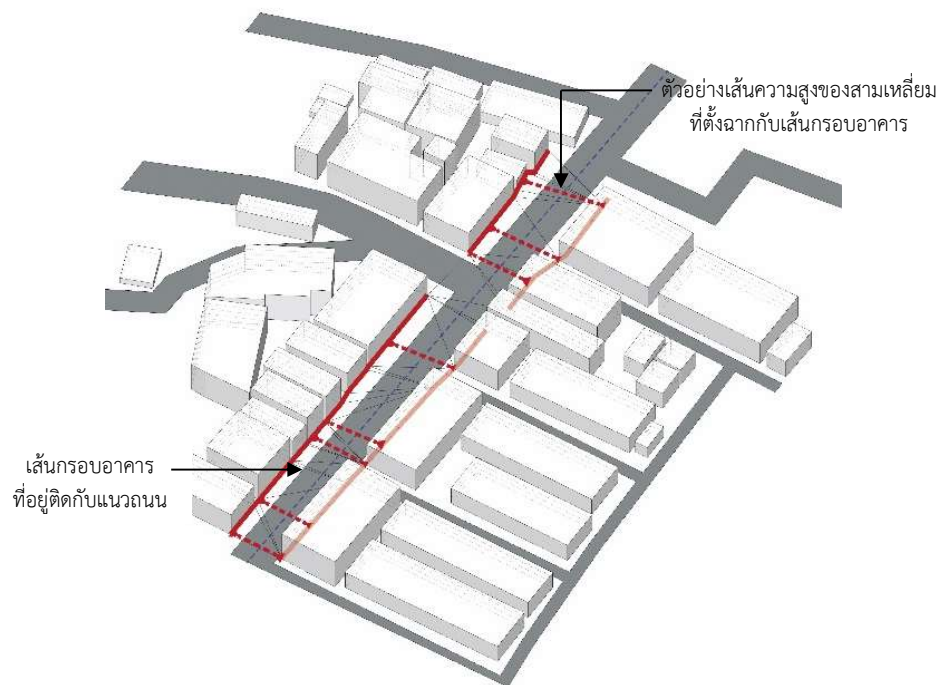
$$R = \frac{H}{W} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4}$$

ตัวบ่งชี้ความหนาแน่นของพื้นที่เมือง

สามารถหาค่าความหนาแน่นของพื้นที่เมืองได้จากค่าระยะของความหยาบ (Roughness length : Z_0) ของพื้นที่หุบเขาถนนของเมือง (Nakata-Osaki et al., 2018) โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$Z_0 = 0.5H(A^*/A') \dots\dots\dots \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ Z_0 คือ ค่าระยะของความหยาบ (m) H คือ ค่าเฉลี่ยความสูงของอาคารตามแนวหุบเขาถนน A^* คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวทางแนวตั้งของอาคารที่อยู่ตามแนวหุบเขาถนน และ A' คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่อาคารปกคลุมพื้นที่ดินของอาคารแต่ละหลังตามแนวหุบเขาถนนของเมือง



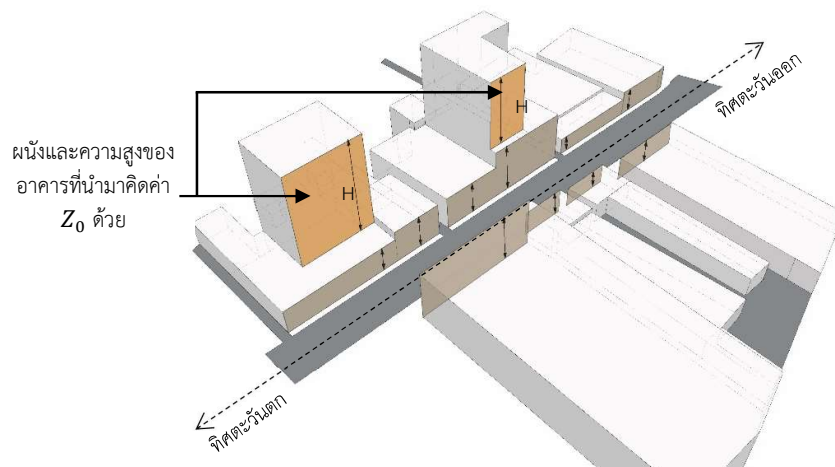
ภาพ 2 แสดงเส้นความสูงของสามเหลี่ยม และ เส้นรอบอาคาร เพื่อการหาค่าความกว้าง และ ความสูงของหุบเขาถนนของเมือง

สรุปเรขาคณิตของพื้นที่ที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมือง

จากการหาค่า H/W ของพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนน และ การหาค่าความหนาแน่นของพื้นที่เมืองจากค่า Z_0 สามารถสรุปเรขาคณิตของพื้นที่ที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมืองทั้งสองพื้นที่ได้ดังตารางที่ 1 โดยค่า H/W ตามแนวหุบเขาถนนเพชรบุรี และ ถนนอุดมสุขมีค่าเท่ากับ 0.7 และ 0.4 ตามลำดับ ส่วนค่า Z_0 ของบริเวณหุบเขาถนนเพชรบุรี และ ถนนอุดมสุข มีค่าเท่ากับ 5.12 และ 3.06 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีค่าแตกต่างกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า H/W เนื่องจากพื้นที่กรณีศึกษาถนนเพชรบุรี มีพื้นที่ผิวของผนังอาคารทางแนวตั้งที่ไม่ได้อยู่ติดกับแนวถนน จึงนำพื้นที่ผิวทางแนวตั้ง และ ความสูงของอาคารดังกล่าวมาคิดค่า Z_0 ด้วย (ภาพที่ 3) ทำให้พื้นที่ผนังของอาคารฝั่งที่รับลมมีพื้นที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อกระแสลมที่พัดปะทะกับผนังอาคารดังกล่าวได้ (Li et al., 2020)

ตาราง 1 เรขาคณิตของหุบเขาถนนของพื้นที่กรณีศึกษาตามแนวถนนสายหลัก

พื้นที่	ทิศทาง	การใช้ประโยชน์ที่ดิน	FAR / OSR	ความกว้างถนน (เมตร)	Z_0	H/W
ถ.เพชรบุรี	NW-SE(20°)	พ.๕-๑ (สีแดง)	10 / 3	23	5.12	0.7
ถ.อุดมสุข	NW-SE (2°)	พ.๓-๔๑ (สีแดง)	7 / 4.5	16	3.06	0.4



ภาพ 3 หุ่นจำลอง 3 มิติ เรขาคณิตของเมือง ของพื้นที่กรณีศึกษาถนนเพชรบุรี แสดงพื้นผิวทางแนวตั้งตามแนวนอน

การปลูกต้นไม้ในพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมือง

การคัดเลือกพันธุ์ไม้

ในการกำหนดพันธุ์ไม้ และ รูปแบบการปลูกต้นไม้ที่ส่งผลต่อการไหลเวียนของอากาศในพื้นที่หุบเขาถนนของเมืองต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านสัณฐานวิทยาของต้นไม้ ได้แก่ ขนาด ความสูงของลำต้น รูปทรงของพุ่มไม้ ความหนาแน่นของพุ่มใบซึ่งพิจารณาจากค่า LAI ที่ความสัมพันธ์กับค่า LAD ร่วมกับการกำหนดพื้นที่ต้นไม้ปกคลุม และการจัดเรียงของต้นไม้ตามแนวนอน ซึ่งการปลูกต้นไม้ที่มีความหนาแน่นของพุ่มใบน้อย มีลำต้นสูง และการปลูกให้พื้นที่ต้นไม้ปกคลุมน้อย จะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้ โดยเฉพาะในพื้นที่หุบเขาถนนที่มีความแคบหรือในพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่นสูง (Morakinyo et al., 2017) นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวยังส่งผลต่อภูมิอากาศจุลภาคภายในพื้นที่หุบเขาถนนด้วย (Morakinyo & Lam, 2016b) ทั้งนี้ พิจารณพันธุ์ไม้ตามมาตรฐานพื้นที่สีเขียวในเมืองในประเทศไทยโดยสำนักงานนโยบาย และ แผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2557) โดยพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของพื้นที่สีเขียว ได้แก่ พื้นที่สีเขียวบริเวณทางสัญจรทางบก ได้กำหนดให้มีลักษณะพันธุ์ไม้ที่ไม่สูงเกินไป ทรงพุ่มไม่แผ่กว้างมากเกินไป ไม่มีผลขนาดใหญ่ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้สัญจร ควรมีระบบรากลึก ไม่ทำลายพื้นผิวจราจร เป็นพันธุ์ไม้ที่ทนต่อมลพิษทางอากาศ และ ฝุ่นละออง ทนต่อความร้อน ทนต่อความแล้ง และ ไม่ผลัดใบ รวมถึงควรเลือกพันธุ์ไม้โตเร็วที่มีศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือเพิ่มก๊าซออกซิเจน โดยใช้พันธุ์ไม้เพียงชนิดเดียวตลอดทั้งแนวนอน หากปลูกต้นไม้หลายระดับให้ใช้พันธุ์ไม้ไม่เกิน 3 ชนิด เพื่อสะดวกในการดูแลรักษา จากมาตรการดังกล่าวทำให้สามารถคัดเลือกพันธุ์ไม้ที่นิยมปลูกตามแนวทางสัญจรทางบกของกรุงเทพมหานครที่เป็นไม้ยืนต้น และมีคุณสมบัติสอดคล้องกับพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมกับการปลูกในพื้นที่หุบเขาถนนของเมือง ได้แก่ ประดู่อินเดีย (*Pterocarpus indicus* Willd.) เสลา (*Lagerstroemia loudonii* T. & B.) และ มะฮอกกานีใบใหญ่ (*Swietenia macrophylla* King) โดยสามารถแสดงสัณฐานวิทยาของต้นไม้ทั้งสามชนิดได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลในช่วงฤดูร้อน ทั้งนี้ ทำการเลือกต้นประดู่อินเดีย เนื่องจาก มีค่าความหนาแน่นของพุ่มใบน้อยที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่า LAI อีกทั้งเป็นต้นนิยมปลูกตามแนวนอนของเมืองกรุงเทพมหานคร (Thaiutsa et al., 2008) มีทรงพุ่มเป็นทรงกลม แผ่กว้าง มีลำต้นสูง และ มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว (เอี่ยมพร วิสมหมาย และคณะ, 2551) ทั้งนี้ควรเว้นระยะในการปลูกอย่างน้อย 5 เมตร ตามมาตรฐานที่กรุงเทพมหานครกำหนด

แนวทางการจัดเรียงพันธุ์ไม้ตามแนวนอนที่หุบเขาถนนของเมือง

การจัดเรียงของต้นไม้สามารถมีได้ 4 รูปแบบ คือ จัดเรียงตามแนวกึ่งกลางถนน (Centre) จัดเรียงแถวเดียวตามแนวนอน (Single-row) จัดเรียงแบบ 2 แถวตามแนวนอน (Double-row) และ จัดเรียงแบบผสมผสานกันทั้งหมด ทั้งนี้ ในพื้นที่กรณีศึกษาที่เลือกทำการทดสอบ สามารถปลูกต้นไม้ได้บริเวณทางเท้าตามแนวนอนทั้งสองฝั่ง (Double-row) ที่แสดงการปลูกต้นไม้ในพื้นที่กรณีศึกษาในปัจจุบัน ซึ่งพิจารณาจากความกว้างของเขตทางแล้ว สามารถปลูกบริเวณกึ่งกลางของถนนได้ (Centre) ดังนั้น จึงสามารถกำหนดการจัดเรียงต้นไม้ในพื้นที่กรณีศึกษาเพื่อทำการจำลองสภาพแวดล้อมกรณีที่มีการปลูกต้นไม้ได้สองวิธี คือการจัดเรียงแบบ 2 แถวตามแนวนอน และ การจัดเรียงตามแนวกึ่งกลางถนน

ตาราง 2 แสดงพันธุ์ไม้ และ สันฐานวิทยาของต้นไม้ที่เลือกใช้ในการศึกษา

ชนิดพันธุ์ไม้	เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น* (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางทรงพุ่ม * (เมตร)	ความสูง* (เมตร)	LAI* (m ² /m ²)
ประดู่อังสนา	167	6.6	15 - 20	1.03
เสลา	236	6.0	20	2.01
มะฮอกกานีใบใหญ่	278	6.6	20	2.04

ที่มา: (Thaiutsa et al., 2008)

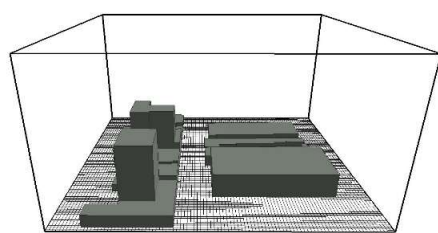
การจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรม ENVI-met

1. การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรม

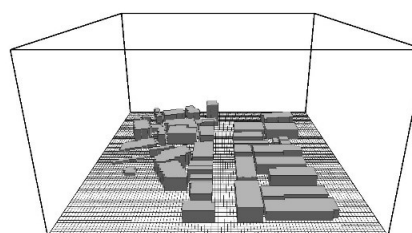
โปรแกรม Envi-met ได้มีการพัฒนาเพื่อให้การจำลองสภาพแวดล้อมมีความละเอียด และแม่นยำขึ้น โดยงานวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรม Envi-met Version 5.1 ซึ่งในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ยกตัวอย่างจากการเก็บค่าอุณหภูมิอากาศ โดยจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรม Envi-met เปรียบเทียบกับการวัดภาคสนามของพื้นที่บริเวณขานเมืองกรุงเทพมหานคร ในช่วงฤดูร้อน โดยพิจารณาความสอดคล้องทางสถิติ ได้แก่ The coefficient of determination (R^2), Root mean square error (RMSE) และ Index of agreement (d) พบว่า การปรับเทียบค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิอากาศเพิ่มร้อยละ 15 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างค่าอุณหภูมิอากาศจากการจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรมกับการวัดภาคสนาม โดยค่าความสอดคล้องทางสถิติ R^2 (0.85), RMSE (0.93), d (0.94) และ Sig. จากการคำนวณ Mean difference (0.09) ถือว่ามีความใกล้เคียงกันในเกณฑ์ที่ดี (พิชามญชุ์ ลิ้มทองอิน และคณะ., 2560)

2. การสร้างหุ่นจำลองพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมือง

การจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่กรณีศึกษาอยู่ในขอบเขตพื้นที่ กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 300 x 300 x 150 เมตร ซึ่งเป็นขอบเขตพื้นที่ที่สามารถประเมินสภาพแวดล้อมในระดับย่านที่ได้รับอิทธิพลจากอาคารข้างเคียง และสามารถเลือกพิจารณาพื้นที่หุบเขาถนนได้หลายจุด (Chatzidimitriou & Yannas, 2017) โดยในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ความละเอียดของช่องตาราง (Grid resolution) เท่ากับ 3 เมตร เพื่อให้ได้ขอบเขตพื้นที่กว้างมากขึ้น มีความละเอียดลดลงแต่การพิจารณาพื้นที่หุบเขาถนนที่เลือกวัดค่าจะยังได้รับอิทธิพลจากอาคารข้างเคียงได้ กำหนดให้วัสดุพื้นผิวถนน และ ผังอาคารทุกด้านเป็นคอนกรีตเพื่อควบคุมปัจจัยด้านชนิดของวัสดุพื้นผิวให้เป็นวัสดุเดียวกัน โดยสามารถแสดงหุ่นจำลองจากโปรแกรม Envi-met ได้ดังภาพที่ 4



(4ก) ถนนเพชรบุรี



(4ข) ถนนอุดมสุข

ภาพ 4 หุ่นจำลอง 3 มิติ จากโปรแกรม Envi-met (4ก) บริเวณถนนเพชรบุรี (4ข) บริเวณถนนอุดมสุข

3. การสร้างหุ่นจำลองของต้นไม้

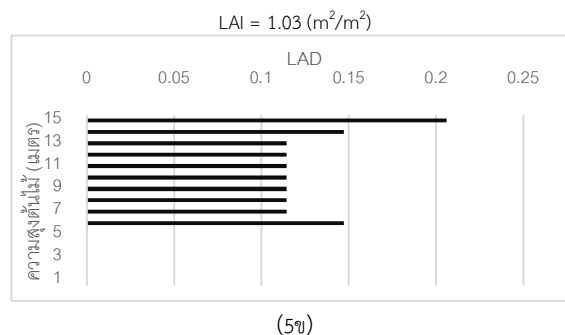
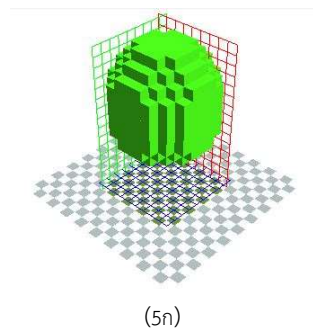
ต้นไม้ที่เลือกใช้ข้อมูลทางกายภาพตามลักษณะของต้นประดู่อังสนาที่มีค่า LAI ในช่วงฤดูร้อนเท่ากับ 1.03 m²/m² (Thaiutsa et al., 2008) และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LAI กับ LAD จากความสูงของลำต้นของต้นไม้แต่ละต้นได้ตั้งสมการที่ 6 (Lalic & Mihailovic, 2004) ทำให้สามารถสร้างหุ่นจำลองของต้นไม้ด้วยโปรแกรม Albero ใน Envi-met โดยกำหนดให้เป็นทรงพุ่มกลม แผ่กว้าง โดยให้ค่า LAD มีค่าสูงที่สุดบริเวณด้านล่างไปจนถึงกึ่งกลางของทรงพุ่ม ต้นไม้มีความสูง

15 เมตร และ กำหนดให้ความหนาแน่นของพื้นที่ใบเริ่มต้นที่ความสูง 5 เมตร เหนือพื้นดิน เพื่อให้เกิดการระบายอากาศบริเวณใต้ต้นไม้มากขึ้น ผลการสร้างหุ่นจำลองต้นประดู่จึงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5ก โดยการกระจายของค่า LAI ที่ระดับความสูงต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 5ข

$$LAI = \int_0^h LAD \cdot \Delta z \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ

- h คือ ความสูงของต้นไม้ (m)
- Δz คือ ขนาดของเส้นตาราง (Grid) ในแนวตั้ง (m)
- LAI คือ ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (Leaf Area Index) m^2/m^2
- LAD คือ ความหนาแน่นของพื้นที่ผิวใบ (Leaf Area Density) m^2/m^3

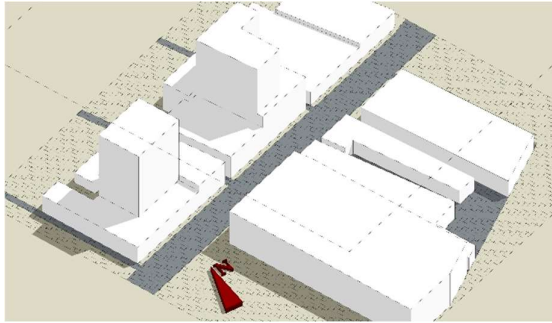


ความสูง	15 เมตร	ความสูงของทรงพุ่ม	5 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางทรงพุ่ม	9 เมตร	Leaf type	Deciduous Leaf

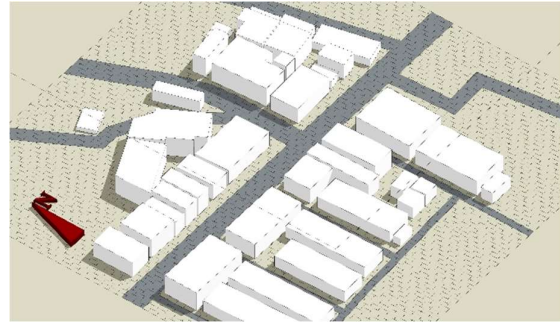
ภาพ 5 (ก) หุ่นจำลองของต้นไม้ที่สร้างโดย Albero (ข) การกระจายของค่า LAD ตามความสูงของต้นไม้

4. การกำหนดพื้นที่กรณีศึกษา

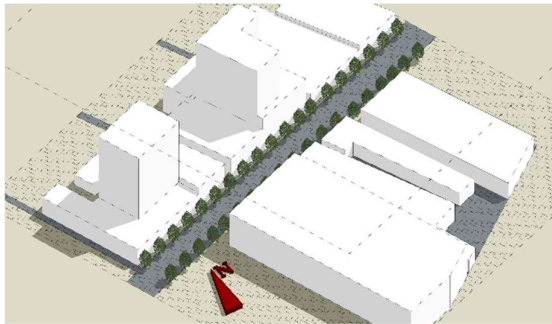
จากการสร้างหุ่นจำลอง 3 มิติของพื้นที่กรณีศึกษา และการสร้างหุ่นจำลองของต้นไม้ที่จัดเรียงในพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนของเมือง ทำให้สามารถกำหนดกรณีศึกษาเพื่อใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 พื้นที่กรณีศึกษา ได้แก่ บริเวณถนนเพชรบุรี และ บริเวณถนนอุดมสุข ประกอบด้วยกรณีศึกษาที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ กรณีศึกษาที่ทดลองจัดเรียงต้นไม้แบบ-สองแถวตามแนวถนน และการจัดเรียงต้นไม้ตามแนวกึ่งกลางถนน โดยในการจัดเรียงต้นไม้จะทำการเว้นระยะห่างประมาณ 15 เมตร เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้ดีขึ้นจากการลดอัตราส่วนพื้นที่ต้นไม้ปกคลุมต่อพื้นที่ดิน (Morakinyo & Lam, 2016b) และทำให้ระยะห่างของทรงพุ่มต้นไม้ไม่ทับซ้อนกัน โดยสามารถสรุปกรณีศึกษาได้ดังภาพที่ 6



(6ก) บริเวณถนนเพชรบุรี กรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้



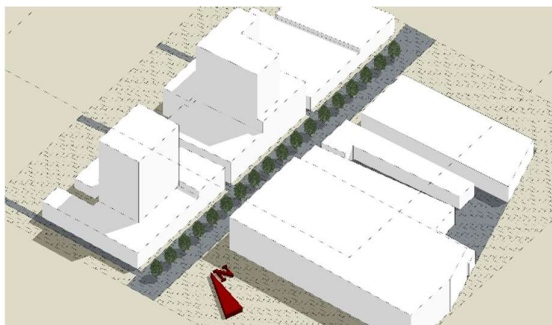
(6ง) บริเวณถนนอุตรมสุข กรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้



(6ข) บริเวณถนนเพชรบุรี กรณีจัดเรียงต้นไม้แบบสองแถวตามแนวนอน



(6จ) บริเวณถนนอุตรมสุข กรณีจัดเรียงต้นไม้แบบสองแถวตามแนวนอน



(6ค) บริเวณถนนเพชรบุรี กรณีจัดเรียงต้นไม้กึ่งกลางถนน



(6ด) บริเวณถนนอุตรมสุข กรณีจัดเรียงต้นไม้กึ่งกลางถนน

ภาพ 6 หุ่นจำลองกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณีศึกษา

5. ข้อมูลนำเข้าสำหรับการจำลองสภาพแวดล้อมและการวัดค่าข้อมูล

กำหนดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ตั้งอยู่ในเมืองกรุงเทพมหานคร และ ใช้ข้อมูลสภาพอากาศที่วัดจากสถานีอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพมหานคร (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์) เป็นข้อมูลย้อนหลัง 30 ปี (พ.ศ. 2534-2563) ทำให้สามารถได้ค่าเฉลี่ยข้อมูลที่น่าเชื่อถือเพื่อทำการจำลองสภาพแวดล้อมได้ดังตารางที่ 4 รวมถึงการกำหนดให้มีแหล่งกำเนิดมลพิษจากการจราจรบริเวณแนวนอนสายหลักซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นจากโปรแกรม Envi-met ที่กำหนดให้เป็นข้อมูลการสัญจรบนถนนภายในพื้นที่เมือง (Inner-urban road) โดยสรุปข้อมูลการจราจรและแหล่งกำเนิดมลพิษได้ดังตารางที่ 5 ทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวไม่ได้เป็นข้อมูลจากพื้นที่จริง เนื่องจากต้องการศึกษาแนวโน้มของการไหลเวียนของอากาศ และ การสะสมมลพิษจากปัจจัยของเรขาคณิตของหุบเขาถนน และ ปัจจัยของการปลูกต้นไม้ในพื้นที่กรณีศึกษาเท่านั้น

ตาราง 3 แสดงข้อมูลสภาพอากาศที่นำเข้าโปรแกรม Envi-met เพื่อใช้ในการจำลองสภาพแวดล้อม

วันที่	1 เมษายน	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศต่ำสุด	25.5°C
เวลาที่เริ่มทดสอบ	24:00	ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศสูงสุด	33.7°C
ระยะเวลาทดสอบ	24 ชั่วโมง	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด	45%
เมฆปกคลุม	0*	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด	87%
ทิศทางลม (degree)	187°	ความเร็วลมเฉลี่ย	5.14 m/s

*ค่าเริ่มต้นจากโปรแกรม Envi-met

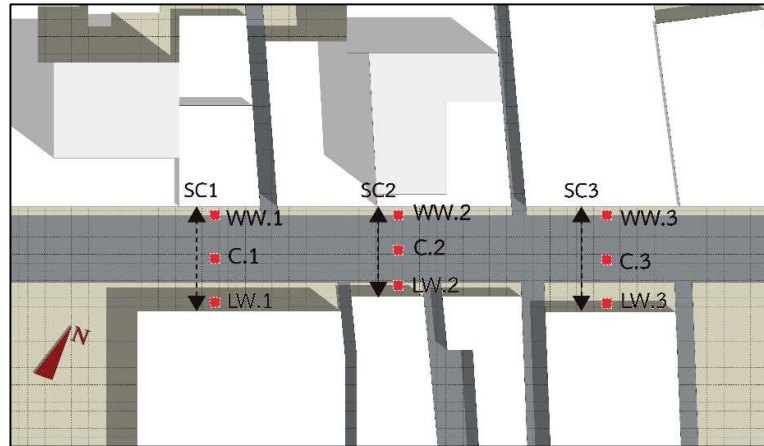
ตาราง 4 แสดงข้อมูลที่นำเข้าโปรแกรม Envi-met เพื่อใช้ในการจำลองสภาพแวดล้อม

ความหนาแน่นของการจราจร	จำนวนยานพาหนะต่อ 24 ชั่วโมง*	16,000 คัน
	จำนวนช่องจราจร	4 Lane
ช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นของการจราจรสูงสุด		16.00 – 17.00 น.
อัตราส่วนของชนิดยานพาหนะทั้งหมด (%)	รถยนต์โดยสาร* (Passenger cars)	88%
	รถยนต์ขนาดเล็ก* (Light Duty Vehicles)	5%
	รถยนต์ขนาดใหญ่* (Heavy Duty Vehicles)	2.5%
	รถจักรยานยนต์* (Motorcycles)	0.5%
	รถโดยสารสาธารณะ* (Urban Bus)	3%
	รถโดยสารขนาดใหญ่* (Coaches)	1%
แหล่งกำเนิดมลพิษ	Particle Matter (PM)	2.5 µm.
	ความสูงจากพื้น*	15 cm.
	Source geometry*	Line

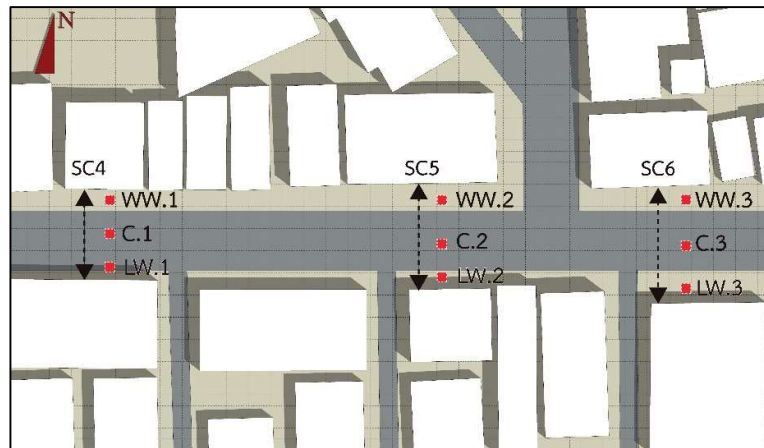
*ค่าเริ่มต้นจากโปรแกรม Envi-met

6. การวัดค่าข้อมูลในพื้นที่กรณีศึกษา

ทำการวัดค่าความเร็วลมภายในพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนน ที่อยู่ตามแนวนอนสายหลัก รวมถึงวัดค่ามลพิษทางอากาศ ได้แก่ ค่า PM2.5 ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดมลพิษของยานพาหนะตามแนวนอน ในการวัดค่าข้อมูลจะทำการเลือกหุบเขาถนนภายในบริเวณพื้นที่กรณีศึกษาทั้ง 2 พื้นที่ จำนวน 3 หุบเขาถนน ที่มีค่า H/W และ Z_0 ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 5) โดยกำหนดจุดเก็บค่าข้อมูล 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณผนังฝั่งที่รับลม (Windward Wall: WW) บริเวณกึ่งกลางถนน (Centre: C) และ บริเวณผนังฝั่งท้ายลม (Leeward Wall: LW) สามารถแสดงหุบเขาถนนที่เลือก และ จุดวัดค่าต่าง ๆ ได้ดังภาพที่ 7 โดยจุดเก็บค่าข้อมูลอยู่สูงจากพื้น 1.50 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ และ ทำการเก็บค่าข้อมูลทั้ง 6 กรณีศึกษา



(7ก) ผังบริเวณพื้นที่กรณีศึกษาบริเวณถนนเพชรบุรี



(7ข) ผังบริเวณพื้นที่กรณีศึกษาบริเวณถนนอุตรมสุข

ภาพ 7 แสดงหุบเขาถนนที่เลือกศึกษา 3 แห่ง จากพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาถนนบริเวณถนนเพชรบุรี (7ก) หุบเขาถนนภายในพื้นที่กรณีศึกษาบริเวณถนนอุตรมสุข (7ข) และ แสดงจุดเก็บค่าข้อมูล 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณผนังฝั่งรับลม (WW) กึ่งกลางถนน (C) และ บริเวณผนังฝั่งใต้ลม (LW)

ตาราง 5 กรณีศึกษาหุบเขาถนนของพื้นที่ถนนเพชรบุรี และ ถนนอุตรมสุข

กรณีศึกษา	H/W	ทิศของแนวถนน	Z_0
1. ถนนเพชรบุรี หุบเขาถนนที่ 1 (SC1)	0.8	NW 290° - SE 110° (E-W)	2.71
2. ถนนเพชรบุรี หุบเขาถนนที่ 2 (SC2)	0.8	NW 290° - SE 110° (E-W)	9.45
3. ถนนเพชรบุรี หุบเขาถนนที่ 3 (SC3)	0.4	NW 272° - SE 268° (E-W)	0.98
4. ถนนอุตรมสุข หุบเขาถนนที่ 4 (SC4)	0.6	NW 290° - SE 92° (E-W)	4.73
5. ถนนอุตรมสุข หุบเขาถนนที่ 5 (SC5)	0.4	NW 290° - SE 92° (E-W)	3.19
6. ถนนอุตรมสุข หุบเขาถนนที่ 6 (SC6)	0.3	NW 290° - SE 92° (E-W)	2.39

ผลการศึกษา และการอภิปรายผล

1. เปรียบเทียบค่าความเร็วลม กับ ค่าการสะสม PM2.5 ในพื้นที่การศึกษาหุบเขาดอน

ค่าเฉลี่ยของความเร็วลม และ การสะสม PM2.5 ของกรณีศึกษาหุบเขาดอนทั้ง 6 กรณีศึกษาแสดงได้ดังตารางที่ 6 พบว่า กรณีศึกษาหุบเขาดอน SC2 ในพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรี มีค่าเฉลี่ยความเร็วลมภายในหุบเขาดอนเท่ากับ 2.5 m/s ซึ่งมีค่าสูงที่สุด และมีค่าเฉลี่ยการสะสม PM2.5 เท่ากับ $0.25 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ส่วนกรณีศึกษาหุบเขาดอน SC1 ในพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรี จะมีค่าเฉลี่ยความเร็วลมภายในหุบเขาดอนเท่ากับ 0.33 m/s ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด และมีค่าเฉลี่ยการสะสม PM2.5 เท่ากับ $0.66 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาอื่น ๆ

จากค่าเฉลี่ยความเร็วลม และ การสะสม PM2.5 พบว่า ค่า Z_0 ที่แตกต่างกันของหุบเขาดอนแต่ละแห่งไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วลมภายในหุบเขาดอน ยกเว้นหุบเขาดอน SC2 ในพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรี ที่มีค่า Z_0 สูงที่สุด ที่ส่งผลให้ความเร็วลมมีค่าสูงกว่าหุบเขาดอนอื่น ๆ เนื่องจากอาคารฝั่งที่รับลม (WW) มีความสูงมากกว่าอาคารฝั่งที่อยู่ใต้ลม (LW) ทำให้เกิดลมปะทะกับผนังฝั่งที่รับลมแล้วพัดเข้าสู่ภายในพื้นที่หุบเขาดอนได้มากกว่า (ภาพที่ 8ข) รวมถึงหุบเขาดอน SC5 ในพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุขที่อาคารฝั่งที่รับลม มีความสูงมากกว่าอาคารฝั่งที่อยู่ใต้ลมเล็กน้อย (ภาพที่ 8จ) สามารถทำให้ความเร็วลมภายในหุบเขาดอนมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหุบเขาดอนอื่น ๆ ในพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข ทั้งนี้ ค่าความเร็วลมจะส่งผลกับค่าการสะสม PM2.5 ภายในหุบเขาดอน หากความเร็วลมมีค่าสูง การสะสมของ PM2.5 จะมีค่าต่ำ ในขณะเดียวกัน หากมีค่าความเร็วลมต่ำ จะทำให้ค่าการสะสมของ PM2.5 สูงขึ้น (ตารางที่ 6)

ตาราง 6 แสดงผลการวัดค่าความเร็วลม และ ค่าการสะสม PM2.5 ของกรณีศึกษาหุบเขาดอนทั้ง 6 กรณีศึกษา

พื้นที่การศึกษา	เพชรบุรี				อุดมสุข	
กรณีศึกษาหุบเขาดอน	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
Z_0	2.71	9.45	0.98	4.73	3.19	2.39
ความเร็วลม (m/s)	0.33	2.50	0.87	0.53	1.00	0.40
การสะสม PM2.5 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	0.66	0.25	0.45	0.64	0.34	0.40

2. ค่าเฉลี่ยความเร็วลม และ การสะสมของ PM2.5

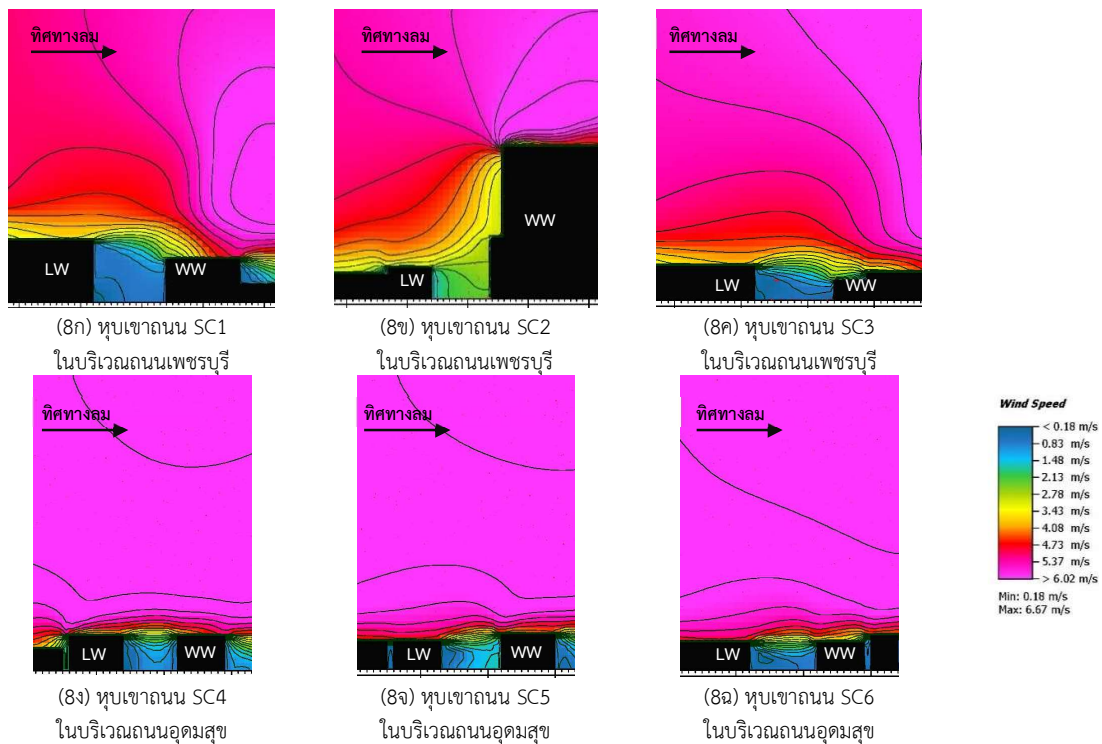
ค่าเฉลี่ยความเร็วลม และ การสะสม PM2.5 โดยรวมภายในพื้นที่กรณีศึกษาหุบเขาดอนทั้ง 2 พื้นที่ ประกอบด้วยพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรีที่ทำการเก็บค่าข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยของหุบเขาดอน SC1 SC2 และ SC3 กับพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุขที่ทำการเก็บข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยของหุบเขาดอน SC4 SC5 และ SC6 แล้วทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วลม และ การสะสม PM2.5 โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วลม

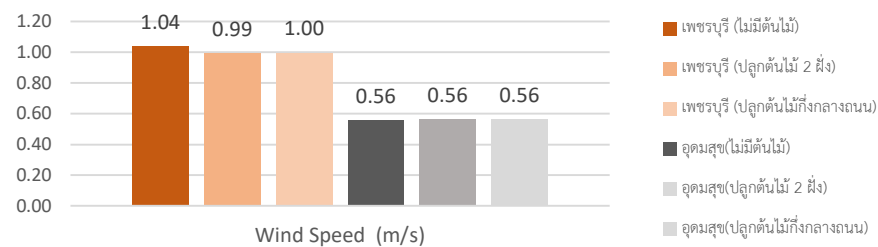
ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วลมทั้ง 6 กรณีศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 9 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรีกรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ กรณีปลูกต้นไม้ 2 ฟุต และกรณีปลูกต้นไม้กึ่งกลางถนน มีค่าเท่ากับ 1.04 m/s 0.99 m/s และ 1 m/s ตามลำดับ ส่วนพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข กรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ และ กรณีการปลูกต้นไม้ทั้ง 2 รูปแบบ จะมีค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากันทุกกรณี โดยมีค่าเท่ากับ 0.56 m/s ซึ่งค่าเฉลี่ยความเร็วลมของพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรีมีค่าสูงกว่าบริเวณถนนอุดมสุขประมาณ 0.45 m/s ทั้งนี้ หากเปรียบเทียบกับค่าความเร็วลมจากภายนอก (5.14 m/s) จะพบว่าค่าเฉลี่ยความเร็วลมโดยรวมภายในหุบเขาดอนของพื้นที่กรณีศึกษาทั้ง 2 แห่ง มีค่าลดลง

จากผลการเปรียบเทียบค่าข้อมูลพบว่า ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของบริเวณถนนเพชรบุรีมีค่าสูงกว่า จากความแตกต่างของค่า H/W และ Z_0 เนื่องจากพื้นที่กรณีศึกษาบริเวณถนนเพชรบุรีมีค่า Z_0 สูงกว่า โดยเฉพาะกรณีศึกษาหุบเขาดอน SC2 ที่มีค่า Z_0 เท่ากับ 9.45 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดจากการมีพื้นที่ของผนังอาคารฝั่งรับลม (WW) มากกว่า (ภาพที่ 10ก) ทำให้เกิดลมปะทะแล้วพัดเข้าสู่พื้นที่หุบเขาดอนได้มากกว่าจนทำให้มีความเร็วลมสูงขึ้นได้ และ ทำให้ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของบริเวณถนนเพชรบุรีมีค่าสูงกว่าพื้นที่กรณีศึกษาบริเวณถนนอุดมสุข โดยการเปรียบเทียบกรณีศึกษาการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาดอนพบว่า การปลูกต้นไม้ที่มีค่า LAI น้อย และมีลำต้นสูงจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง 1.50 เมตรเหนือพื้นดินภายในพื้นที่หุบเขา

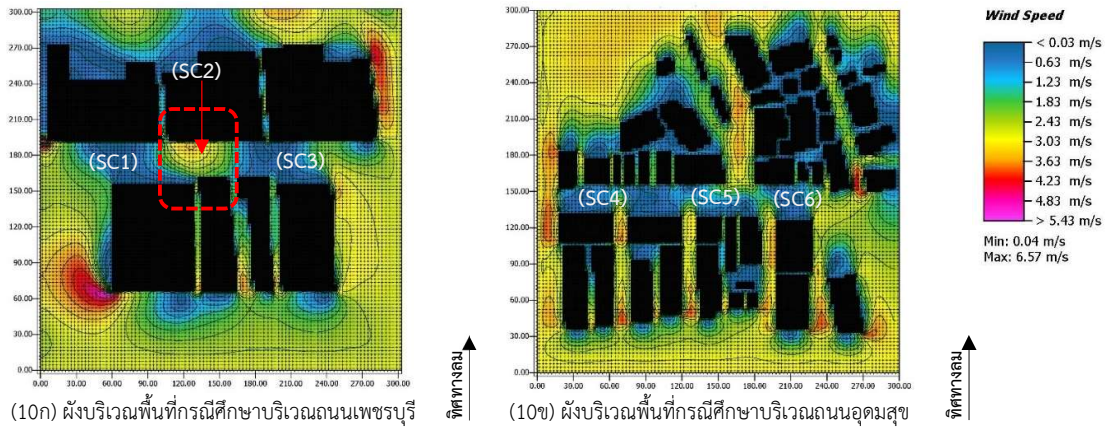
ถนน การปลูกต้นไม้ดังกล่าวยังสามารถช่วยให้การไหลเวียนของอากาศได้เหมือนกับกรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ โดยเฉพาะพื้นที่บริเวณถนนอุตรมสุขที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วลมเท่ากันทุกกรณี (ภาพที่ 9)



ภาพ 8 ภาพตัดทางแนวขวางแสดงค่าความเร็วลมภายในกรณีศึกษาหุบเขาด้านทั้ง 6 กรณีศึกษา



ภาพ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเร็วลมของกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณีศึกษา

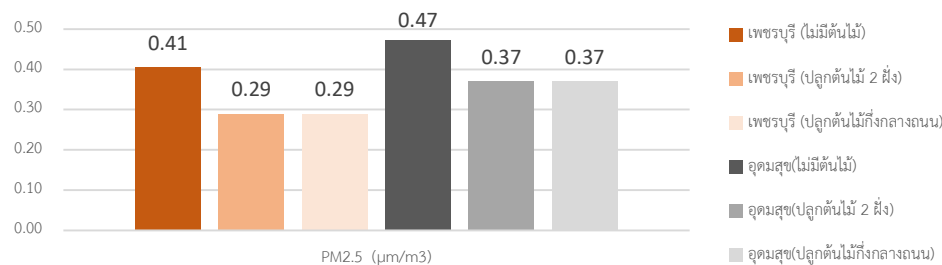


ภาพ 10 แสดงความเร็วลมของพื้นที่การศึกษา และ แสดงกรณีสึกษาหุบเขาถนนเพชรบุรี (9ก) และ ถนนอุดมสุข (9ข)

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการสะสม PM 2.5

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการสะสม PM2.5 ทั้ง 6 กรณีศึกษาแสดงได้ดังภาพที่ 11 พบว่าพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรีกรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้จะมีค่าเฉลี่ยการสะสม PM 2.5 เท่ากับ $0.41 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ในกรณีปลูกต้นไม้ 2 ฟัง และ กรณีปลูกต้นไม้กึ่งกลางถนนจะมีค่าเท่ากับ $0.29 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ส่วนพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข กรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้จะมีค่าเฉลี่ยการสะสม PM 2.5 เท่ากับ $0.47 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ในกรณีปลูกต้นไม้ 2 ฟัง และ กรณีปลูกต้นไม้กึ่งกลางถนนจะมีค่าเท่ากับ $0.37 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ซึ่งพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุขจะมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยการสะสม PM 2.5 มากกว่าบริเวณถนนเพชรบุรี

จากผลการเปรียบเทียบพบว่ากรณีศึกษาการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาถนนสามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ปลูกต้นไม้ แต่รูปแบบการจัดเรียงของต้นไม้ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการสะสม PM 2.5



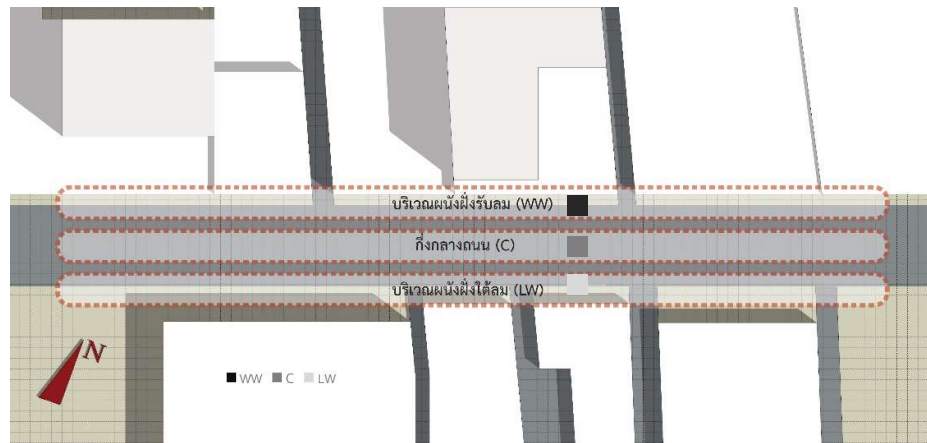
ภาพ 11 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการสะสม PM2.5 ของกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณีศึกษา

3. ค่าการสะสมของ PM 2.5 ภายในพื้นที่หุบเขาถนน

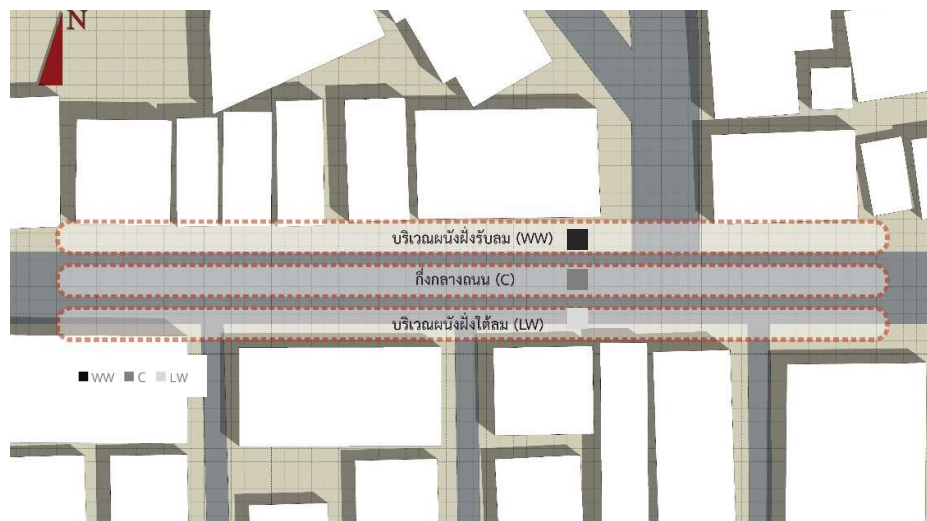
ศึกษาค่าการสะสมของ PM 2.5 โดยเก็บค่าเฉลี่ยตลอดทั้งแนวถนน แบ่งออกเป็น 3 พื้นที่ ได้แก่ บริเวณแนวผนังฝั่งรับลม (WW) แนวกึ่งกลางถนน (C) และ บริเวณแนวผนังฝั่งใต้ลม (LW) สามารถแสดงพื้นที่การเก็บค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM 2.5 ได้ดังภาพที่ 12 ของบริเวณถนนเพชรบุรี (ภาพที่ 12 ก) และถนนอุดมสุข (ภาพที่ 12 ข) โดยเปรียบเทียบกรณีศึกษาที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ 2 ฟัง และ กรณีปลูกต้นไม้กึ่งกลางถนน ผลการเก็บค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM 2.5 แสดงได้ดังภาพที่ 13 พบว่าบริเวณกึ่งกลางถนน (C) ในกรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้ของพื้นที่บริเวณถนนเพชรบุรีกับบริเวณถนนอุดมสุข มีค่าการสะสมของ PM2.5 เท่ากับ $0.53 \mu\text{m}/\text{m}^3$ และ $0.54 \mu\text{m}/\text{m}^3$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการสะสมของ PM 2.5 สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกกรณีศึกษา โดยในบริเวณถนนเพชรบุรี บริเวณผนังฝั่งรับลม (WW) จะมีค่าการสะสม PM 2.5 มากกว่าบริเวณผนังฝั่งใต้ลม (LW) (ภาพที่ 13 ก) แต่ในพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข จุดวัดค่าบริเวณผนังฝั่งรับลม (WW) กับผนังฝั่งใต้ลม (LW) มีค่าการสะสม PM 2.5 ใกล้เคียง

กัน (ภาพที่ 13ข) สำหรับกรณีศึกษาที่มีการปลูกต้นไม้ และ จัดเรียงต้นไม้ทั้ง 2 รูปแบบ สามารถช่วยลดค่าการสะสม PM 2.5 ลงได้

จากผลการวัดค่าในงานวิจัยชิ้นนี้จะพบว่า เราคาดคิดของหุบเขาถนนไม่ทำให้เกิดกระแสลมแบบหมุนวนภายในหุบเขาถนน ทำให้พื้นที่บริเวณกึ่งกลางถนนมีค่าการสะสม PM 2.5 สูงที่สุด โดยในพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุขจะมีแนวโน้มของค่าการสะสมของ PM 2.5 สูงกว่าบริเวณถนนเพชรบุรีเล็กน้อย สำหรับการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาถนนจะสามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ในภาพรวมได้ แต่รูปแบบการจัดเรียงของต้นไม้จะไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของค่าการสะสมของ PM 2.5

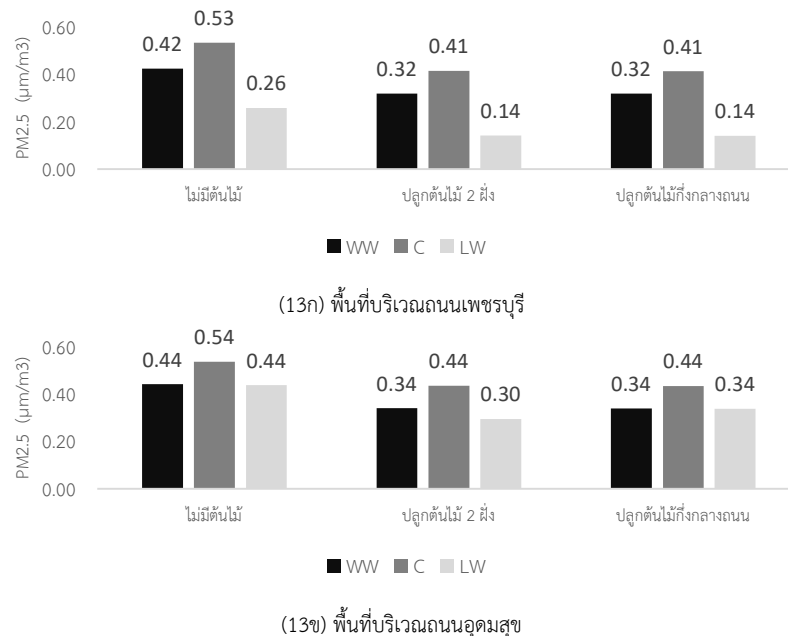


ภาพ 12 (ก) แสดงพื้นที่การเก็บค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM 2.5 ตลอดแนวถนน 3 พื้นที่ ของถนนเพชรบุรี



ภาพ 12 (ก) แสดงพื้นที่การเก็บค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM2.5 ตลอดแนวถนน 3 พื้นที่ ของถนนอุดมสุข

ภาพ 12 แสดงพื้นที่การเก็บค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM2.5 ตลอดแนวถนน 3 พื้นที่ ประกอบด้วย บริเวณแนวผนังฝั่งรับลม (WW) แนวกึ่งกลางถนน (C) และ บริเวณแนวผนังฝั่งใต้ลม (LW) ของบริเวณถนนเพชรบุรี (ภาพ 12ก) และถนนอุดมสุข (ภาพ 12ข)



ภาพ 13 ค่าเฉลี่ยการสะสมของ PM2.5 ตลอดแนวนถนน บริเวณผนังฝั่งรับลม (WW) กึ่งกลางถนน (C) และบริเวณผนังฝั่งใต้ลม (LW) ของถนนเพชรบุรี และถนนอุดมสุข

สรุปผลการศึกษา

เรขาคณิตของหุบเขาด้านกับการไหลเวียนของอากาศ และ การสะสม PM 2.5

ในงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมส่งผลกับค่าการสะสมของ PM 2.5 กล่าวคือ หากภายในพื้นที่หุบเขาด้านมีการไหลเวียนของอากาศที่ดีจนความเร็วลมมีค่าสูงขึ้นก็จะยิ่งช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ได้มากขึ้นเช่นกัน โดยเรขาคณิตของหุบเขาด้านที่แสดงออกด้วยค่า H/W ของหุบเขาด้าน และตัวบ่งชี้ความหนาแน่นของพื้นที่เมืองที่แสดงออกด้วยค่า Z_0 ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วลมในพื้นที่หุบเขาด้าน สำหรับกรณีที่ทิศทางลมจากภายนอกพัดตั้งฉากกับหุบเขาด้าน หากอาคารฝั่งรับลมมีความสูงกว่าอาคารฝั่งที่อยู่ใต้ลม จะทำให้เกิดลมปะทะกับผนังอาคารฝั่งที่รับลมแล้วพัดเข้าสู่พื้นที่หุบเขาด้านได้มากกว่าจนทำให้ค่าความเร็วลมสูงขึ้น (Oke, 1987) ยิ่งอาคารฝั่งที่รับลมมีความสูงเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเร็วลมสูงขึ้น จะยังสามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ที่เป็นมลพิษทางอากาศจากการจราจรภายในพื้นที่หุบเขาด้านได้ ทั้งนี้ หากมีความเร็วลมมากเกินไปอาจจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ทางเท้าบริเวณหุบเขาด้านนั้น ๆ ได้

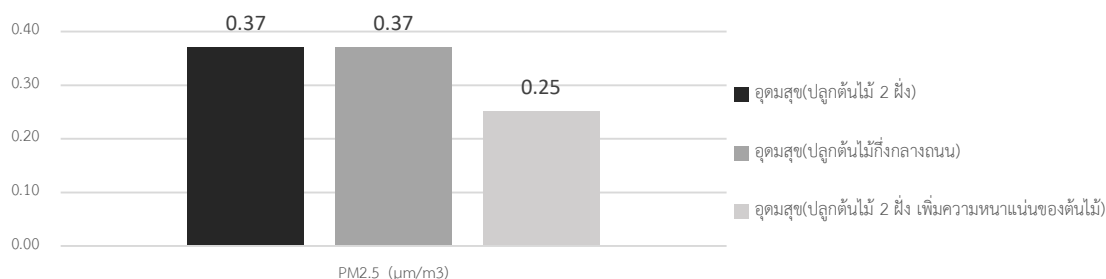
การสะสมของ PM 2.5 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะมีค่าการสะสมสูงที่สุดบริเวณกลางถนนในทุกกรณีศึกษา เนื่องจากกรณีศึกษาหุบเขาด้านที่เลือกทำการเก็บค่าข้อมูลแต่ละแห่งจะมีค่า H/W ไม่ถึง 1 ซึ่งถือว่าเป็นค่าปกติของพื้นที่หุบเขาด้านทั่วไปที่ไม่มีความหนาแน่นสูงนัก (Nazridoust & Ahmadi, 2006) ทำให้ไม่เกิดกระแสลมแบบหมุนวนจนมีการสะสมของ PM 2.5 ที่บริเวณผนังอาคารฝั่งใต้ลม

การปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาด้าน

การปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาด้านสามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ได้ (United states environmental, 2008) โดยพันธุ์ไม้ที่เลือกใช้ปลูกในพื้นที่หุบเขาด้านสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้คือต้นประดู่ทองนา ที่มีค่า LAI น้อย (1.01 m²/m²) และกำหนดให้ความหนาแน่นของพื้นที่ใบเริ่มต้นที่ความสูง 5 เมตร เหนือพื้นดิน พบว่าการปลูกต้นไม้ดังกล่าวสามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ได้ในทุกกรณีศึกษาที่มีการปลูกต้นไม้ และยังสามารถช่วยให้มีการไหลเวียนของอากาศบริเวณใต้ต้นไม้ได้ เทียบเท่ากับกรณีที่ไม่มีการปลูกต้นไม้โดยดูจากค่าเฉลี่ยความเร็วลมภายในหุบเขาด้านเปรียบเทียบกับทุกกรณีศึกษา ซึ่งกรณีศึกษาการจัดเรียงของต้นไม้ประกอบด้วยการจัดเรียงแบบ 2 แถวตามแนวนถนนกับการจัดเรียงต้นไม้ตามแนวกึ่งกลางถนน และเว้นระยะห่าง

ระหว่างต้นไม้ประมาณ 15 เมตร กรณีการจัดเรียงทั้ง 2 รูปแบบไม่ได้ส่งผลถึงความแตกต่างของค่าความเร็วลม และสามารถลดค่าการสะสมของ PM 2.5 ได้เท่ากัน

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบจำลองสภาพแวดล้อมกรณีศึกษาเพิ่มเติมของพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข โดยทำการทดสอบจัดเรียงต้นไม้แบบ 2 แถวตามแนวถนน เว้นระยะห่างระหว่างต้นไม้ประมาณ 10 เมตร และเพิ่มค่า LAI ให้มีค่าเท่ากับ $1.77 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ซึ่งเป็นค่า LAI ของต้นประดู่ในในช่วงฤดูฝน (Thaiutsa et al., 2008) ทำให้พื้นที่กรณีศึกษานี้มีความหนาแน่นของต้นไม้เพิ่มขึ้น จากนั้นทำการเก็บค่าข้อมูลเหมือนกับกรณีศึกษาอื่น ๆ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วลม กับค่าการสะสมของ PM 2.5 กับกรณีศึกษาการปลูกต้นไม้ในพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุขที่ทำการทดสอบก่อนหน้านี้ พบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของต้นไม้ดังกล่าว ทำให้การไหลเวียนของอากาศยังมีค่าเท่าเดิม โดยมีค่าความเร็วลมเท่ากับ 0.56 m/s แต่มีค่าการสะสมของ PM2.5 ลดลง โดยมีค่าเท่ากับ $0.25 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}^3$ (ภาพที่ 14) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การปลูกต้นไม้ที่มีค่า LAI ประมาณ $1.01 - 1.77 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ยังคงทำให้บริเวณใต้ต้นไม้มีการไหลเวียนของอากาศได้เทียบเท่ากับกรณีที่ไม่มีต้นไม้ แต่สามารถช่วยลดการสะสมของ PM 2.5 ที่เป็นมลพิษทางอากาศจากการจราจรได้มากขึ้น



ภาพ 14 เปรียบเทียบค่าการสะสม PM2.5 ของพื้นที่บริเวณถนนอุดมสุข เพิ่มเติมกรณีปลูกต้นไม้แบบ 2 แถวตามแนวถนนโดยเว้นระยะห่างต้นไม้ประมาณ 10 เมตร และเพิ่มค่า LAI ให้มีค่าเท่ากับ $1.77 \text{ m}^2/\text{m}^2$

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาผ่านการจำลองสภาพแวดล้อมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ข้อมูลจากสถานที่จริงเพื่อนำมาศึกษาแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ดังกล่าว หากมีข้อมูลของพื้นที่ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เช่น ค่าการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการจราจรที่อ้างอิงจากพื้นที่จริง และ ค่าความเร็วลมสูงสุดที่วัดได้จริง จะทำให้สามารถแสดงผลการศึกษาที่เห็นความแตกต่างจากการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงปัจจัยเรื่องต้นไม้ ที่สามารถเพิ่มค่า LAI เพื่อทดสอบการไหลเวียนของอากาศภายในพื้นที่หุบเขาถนนที่มีความแคบได้

ทั้งนี้ สามารถนำแนวทางการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่เมืองอื่น ๆ ได้ เมื่อมีการวางแผนการปลูกต้นไม้ในพื้นที่หุบเขาถนน เพื่อหาแนวทางในการลดการสะสมของมลพิษทางอากาศ รวมถึงการเพิ่มการไหลเวียนของอากาศในพื้นที่ดังกล่าว

เอกสารอ้างอิง

- Balczó, M. G. R., Bodo. (2009). Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. **Meteorologische Zeitschrift**, 18(2), 197-206. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0361>
- Bruse, M. (2013). *ENVI-met*. <http://www.model.envi-met.com>
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. **Sustainable Cities and Society**, 33, 85-101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.019>
- Deshmukh, P., Isakov, V., Venkatram, A., Yang, B., Zhang, K. M., Logan, R., & Baldauf, R. (2019). The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality. **Air Quality, Atmosphere & Health**, 12(3), 259-270. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0651-8>
- Ehrensperger, L., & Klemm, O. (2022). Air pollution in an urban street canyon: Novel insights from highly resolved traffic information and meteorology. **Atmospheric Environment: X**, 13. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100151>
- Fellini, S., Marro, M., Del Ponte, A. V., Barulli, M., Soulhac, L., Ridolfi, L., & Salizzoni, P. (2022). High resolution wind-tunnel investigation about the effect of street trees on pollutant concentration and street canyon ventilation. **Building and Environment**, 226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109763>
- Gromke, C., & Ruck, B. (2007). Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field. **Atmospheric Environment**, 41(16), 3287-3302. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.043>
- Gromke, C., & Ruck, B. (2009). On the Impact of Trees on Dispersion Processes of Traffic Emissions in Street Canyons. **Boundary-Layer Meteorology**, 131(1), 19-34. <https://doi.org/10.1007/s10546-008-9301-2>
- Jin, S., Guo, J., Wheeler, S., Kan, L., & Che, S. (2014). Evaluation of impacts of trees on PM2.5 dispersion in urban streets. **Atmospheric Environment**, 99, 277-287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.002>
- Kai, r., & Joachim, E. (2001). Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons. **Meteorologische Zeitschrift**, 10(4), 229-233. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2001/0010-0229>
- Kleeman, M. J., Schauer, J. J., & Cass, G. R. (2000). Size and Composition Distribution of Fine Particulate Matter Emitted from Motor Vehicles. **Environmental Science & Technology**, 34(7), 1132-1142. <https://doi.org/10.1021/es981276y>

- Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., & Mochida, A. (2008). Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. **Building and Environment**, 43(10), 1699-1708. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.015>
- Kulmala, M. (2015). Atmospheric chemistry: China's choking cocktail. **Nature**, 526(7574), 497-499. <https://doi.org/10.1038/526497a>
- Lalic, B., & Mihailovic, D. (2004). An Empirical Relation Describing Leaf-Area Density inside the Forest for Environmental Modeling. **Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL**, 43, 641-645. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043)
- Li, Z., Zhang, H., Wen, C.-Y., Yang, A.-S., & Juan, Y.-H. (2020). Effects of height-asymmetric street canyon configurations on outdoor air temperature and air quality. **Building and Environment**, 183. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107195>
- Miao, C., Li, P., Yu, S., Chen, W., & He, X. (2022). Does street canyon morphology shape particulate matter reduction capacity by street trees in real urban environments? **Urban Forestry & Urban Greening**, 78. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127762>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. **Building and Environment**, 115, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Morakinyo, T. E., & Lam, Y. F. (2016a). Simulation study of dispersion and removal of particulate matter from traffic by road-side vegetation barrier. **Environmental Science and Pollution Research**, 23(7), 6709-6722. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5839-y>
- Morakinyo, T. E., & Lam, Y. F. (2016b). Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. **Building and Environment**, 103, 262-275. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.025>
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L., & Rodrigues, D. S. (2018). THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS extension model to calculate urban heat island intensity based on urban geometry. **Computers, Environment and Urban Systems**, 67, 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007>
- Nazridoust, K., & Ahmadi, G. (2006). Airflow and pollutant transport in street canyons. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 94(6), 491-522. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.01.012>
- Oke, T. R. (1987). **Boundary Layer Climate**. Routledge.
- Salizzoni, P., Soulhac, L., & Mejean, P. (2009). Street canyon ventilation and atmospheric turbulence. **Atmospheric Environment**, 43(32), 5056-5067. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.045>

Samsonov, T. E., Konstantinov, P. I., & Varentsov, M. I. (2015). Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. *Urban Climate*, 13, 122-139.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.007>

Thaiutsa, B., Puangchit, L., Kjelgren, R., & Arunpraparut, W. (2008). Urban green space, street tree and heritage large tree assessment in Bangkok, Thailand. *Urban Forestry & Urban Greening*, 7(3), 219-229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.03.002>

Wang, X., Teng, M., Huang, C., Zhou, Z., Chen, X., & Xiang, Y. (2020). Canopy density effects on particulate matter attenuation coefficients in street canyons during summer in the Wuhan metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 240, 117739.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117739>

Wang, X., Yang, X., Wang, X., Zhao, J., Hu, S., & Lu, J. (2020). Effect of reversible lanes on the concentration field of road-traffic-generated fine particulate matter (PM_{2.5}). *Sustainable Cities and Society*, 62.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102389>

Wong, N. H., & Jusuf, S. K. (2013). Urban Heat Island and Mitigation Strategies at City and Building Level. *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment*, 3-32(3).

Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>

พิชามญช์ ลีทองอิน, ดารณี จารีมิตร, และ มานัส ศรีวนิช. (2560). การเปรียบเทียบและการตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างแบบจำลอง ภูมิอากาศจุลภาคภายนอกอาคารใน ENVI-met V4 กับการตรวจวัด ภาคสนาม: การศึกษาทดลองพื้นที่เขตพักอาศัยประเภทบ้านเดี่ยว. *Built Environment Research Associates Conference 2017*, 8, 78-85.

เอื้อมพร วิสมหมาย, ศศิยา ศิริพานิช, อลิศรา มีนะกนิษฐ และ ณัฏฐ พิชกรรม. (2551). พรรณไม้ในงานภูมิสถาปัตยกรรม 1. (พิมพ์ครั้งที่ 3). ม.ป.ท.