

การประเมินความสามารถของต้นไม้ประดับในการดักจับอนุภาค

ขนาดเล็กในอาคาร

Assessment of the Ability of Houseplants to Trap Indoor Particulate Matter

ธนากร รัตนพันธุ์^{*1}, มณีรัตน์ องค์กรวรรณี¹ และ สิริมา ปัญญาเมธิกุล²

Thanakorn Rattanapun^{*1}, Maneerat Ongwandee¹ and Sirima Panyametheekul²

¹สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

¹Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.

²Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

*E-mail: rattanapun_bank@hotmail.com, Tel: +668 7637 2788

บทคัดย่อ

ต้นไม้ประดับสามารถช่วยลดมลพิษในอาคารได้ แต่ยังไม่มีการวัดความสามารถของต้นไม้ในการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กในอาคารด้วยวิธีที่เป็นมาตรฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของต้นไม้ประดับในอาคารในการดักจับอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) ด้วยห้องทดสอบขนาดใหญ่ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของต้นไม้ คือ พื้นที่ผิวใบ และ ลักษณะใบ ต้นไม้ที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มต้นไม้ประดิษฐ์ ประกอบด้วย ต้นเฟิร์น และต้นสาวน้อยประแป้ง และกลุ่มต้นไม้จริง ประกอบด้วย ต้นพลูด่าง ต้นฤๅษีผสม และต้นเข็มสามสี ทำการวัดความสามารถในการดักจับ PM_{2.5} โดยใช้ห้องทดสอบขนาด 8 ลบ.ม. ที่มีพื้นที่ผิวภายในห้องเป็นอะลูมิเนียม อนุภาคขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลองได้จากการเผาไหม้ธูป โดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของ PM_{2.5} อยู่ในช่วง 240–250 มก./ลบ.ม. วัดความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลมาพยากรณ์สัมประสิทธิ์การสูญหายของ PM_{2.5} จากการตกทับถมบนพื้นผิวใบ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการสมดุลมวลของ PM_{2.5} ในอากาศภายในห้องทดสอบ ผลการทดลองพบว่า พื้นที่ใบของต้นเฟิร์นประดิษฐ์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของ PM_{2.5} ที่เพิ่มขึ้น โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเท่ากับ 0.919 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 เมื่อวัดสัมประสิทธิ์การสูญหายของ PM_{2.5} ของต้นไม้ทั้ง 5 ชนิด ที่มีพื้นที่ใบทั้งหมดเท่ากัน คือ 5 ตร.ม. ได้ค่าดังนี้ ต้นเฟิร์นประดิษฐ์ 0.07 ต่อชั่วโมง ต้นสาวน้อยประแป้ง 0.06 ต่อชั่วโมง ต้นพลูด่าง 0.06 ต่อชั่วโมง ต้นฤๅษีผสม 0.04 ต่อชั่วโมง และต้นเข็มสามสี 0.05 ต่อชั่วโมง โดยต้นฤๅษีผสมซึ่งมีลักษณะใบหยักมีขนสามารถดักจับ PM_{2.5} ได้สูงสุดในช่วง 3 ชั่วโมงแรก แต่ความสามารถกลับลดลงเวลาผ่านไปเนื่องจากผลของการคายน้ำที่ผิวใบโดยตรง

ABSTRACT

Houseplants can reduce indoor pollutants. However, there have been no studies conducted on determining the ability of houseplants to remove particulate matter by a standardized method. Thus, the objectives of this study were to assess the ability of houseplants to trap particulate matter less than 2.5 micron ($PM_{2.5}$) using a large-scale chamber. Studied factors included leaf surface area and leaf characteristics. Selected plants in this study can be divided into two groups. Group 1 – artificial plants included Boston fern and Dieffenbachia. Group 2 – real plants included Golden pothos (*Epothymum aureum*), Painted nettle (*Solenostemon scutellarioides*) and Rainbow tree (*Dracaena cincta*). Experiments were conducted in an 8-m³ test chamber with aluminum inner walls. The tested $PM_{2.5}$ was generated by burning an incense stick to obtain an initial concentration of 240-250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Loss rate coefficients for $PM_{2.5}$ accumulation on leaf surfaces were determined by fitting time-dependent concentrations to a mass balance model using a nonlinear regression method. Data were obtained from each experiment conducted for 24 hour. Results show that leaf surface area of the artificial Boston fern was linearly correlated with a loss rate coefficient. A Pearson correlation coefficient was 0.919 at the significant level of 0.05. When testing the plant abilities at the same total leaf area of 5 m², the predicted loss rate coefficients for individual tested plants are as follows: artificial Boston fern 0.07 per hour, artificial Dieffenbachia 0.07 per hour, Golden pothos 0.06 per hour, Painted nettle 0.04 per hour and Rainbow tree 0.05 per hour. The painted nettle which has wrinkle and hairy leaves exhibited the highest $PM_{2.5}$ collection capability, but it declined over time due to direct transpiration through the leaf surface.

1. บทนำ

คุณภาพอากาศภายในอาคาร (indoor air quality) ที่ไม่ดีจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้คนที่อาศัยอยู่ในอาคาร ข้อมูลดังกล่าวได้รับการสนับสนุนจากผลการศึกษารูปแบบการดำเนินชีวิตของคนเมืองในประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าคนเมืองใช้เวลาเฉลี่ยในแต่ละวันอาศัยอยู่ในอาคารถึงร้อยละ 87 โดยอยู่นอกอาคารหรือพื้นที่โล่งแจ้งเพียงร้อยละ 6 เท่านั้น [1] เช่นเดียวกับประเทศไทย สำนักงานสถิติแห่งชาติ [2] ได้สำรวจคนที่ทำงานในสำนักงานพบว่า ใช้เวลาเฉลี่ยในที่ทำงาน 8.8 ชั่วโมง/วัน และอยู่ที่พักอาศัย เฉลี่ย 12.1 ชั่วโมง/วัน หรือคิดเป็นเวลาทั้งหมดที่อาศัยในอาคารถึงร้อยละ 87 ดังนั้นการได้รับสารมลพิษของผู้คนในเขตเมืองจึงเกิดขึ้นภายในอาคารเป็นหลัก

อนุภาคขนาดเล็ก (particulate matter) เป็นหนึ่งในสารมลพิษอากาศที่มีผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในอาคาร [3] เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) และ 10 ไมครอน (PM_{10}) สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบทางเดินหายใจได้ลึก เป็นสาเหตุของการเจ็บป่วยที่เกิดขึ้นกับระบบทางเดินหายใจ [4] เกณฑ์มาตรฐานโดยประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ

กำหนดระดับ $PM_{2.5}$ เฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง ต้องมีค่าไม่เกิน 50 มคก./ลบ.ม. และ PM_{10} เฉลี่ยในเวลา 24 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 120 มคก./ลบ.ม. [5,6] โดยทั่วไปการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กภายในอาคารทั่วไปที่ไม่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมจะจัดการให้มีระบบระบายอากาศที่เหมาะสม เช่น ติดตั้งช่องลม หรือพัดลมดูดอากาศเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้สะดวก และอาจมีการใช้เครื่องฟอกอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ภายในอาคารบ้านเรือน ยังนิยมปลูกต้นไม้ประดับตกแต่งสถานที่ให้มีความน่าอยู่ ซึ่งรวมถึงการตกแต่งด้วยต้นไม้ดอกไม้ประดิษฐ์ โดยปัจจุบันประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกต้นไม้ดอกไม้ประดิษฐ์ อันดับ 1 ในกลุ่มอาเซียน และติดอันดับในกลุ่มผู้ส่งออก 10 อันดับแรกของโลก มีมูลค่าการส่งออกปีละประมาณ 3,000 ล้านบาท [7]

งานวิจัยที่ผ่านมาของรวิ เสรษฐภักดี และคณะ [8] ศึกษาการใช้ต้นไม้ชนิดต่างๆ ที่ปลูกริมถนนในกรุงเทพมหานครเพื่อช่วยลดมลพิษอากาศ พบว่าพืชที่มีดัชนีพื้นที่ใบมากและมีเรือนยอดที่บ่งชี้ให้มีการกระจายแสงในเรือนยอดได้ดี เช่น ชมพูพันธุ์ทิพย์ ชงโค พุดซ้อน อินทนิลน้ำ พิกุลเทียนกิ่ง ชบา โกศล คำเงาะ และประดู่ จึงมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงได้ดี ช่วยดูดซับ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ งานวิจัยของ Lohr และ Pearson-Mims [9] ได้ศึกษาการสะสมของอนุภาคขนาดเล็กบนพื้นผิวจากการตกทับถมในแนวระนาบ โดยใช้วิธีชั่งน้ำหนักฝุ่นที่ตกทับถมบนจานทดลองที่วางในห้องคอมพิวเตอร์ และห้องทำงาน พบว่า น้ำหนักจานทดลองที่วางไว้ในห้องคอมพิวเตอร์ และห้องทำงานที่มีต้นไม้มีค่าสูงกว่าห้องที่ไม่มีต้นไม้ ร้อยละ 15 และ 21 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าห้องที่มีต้นไม้ สามารถลดปริมาณฝุ่นที่ตกทับถมภายในห้องได้ และงานวิจัยของ Hwang และคณะ [10] ได้ศึกษาการกำจัดอนุภาคขนาดเล็กโดยต้นไม้ใบ ที่มีลักษณะแตกต่างกัน จำนวน 5 ชนิด โดยใช้อนุภาคเขม่าที่ผลิตจากเตาที่ใช้อะเซทิลีนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับจำลองอนุภาคเขม่าจากการจราจร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วในการตก (deposition velocity) สู่ใบที่มีลักษณะเล็กเรียวยาวเป็นแท่งมีค่าสูงกว่ากว่าใบที่มีลักษณะแบนกว้าง และความขรุขระของผิวใบ เช่น เส้นใบ เส้นแขนงใบ และเส้นกลางใบ มีผลต่อความเร็วในการตกของอนุภาคเขม่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีการวัดความสามารถของต้นไม้ประดับในอาคารและต้นไม้ประดิษฐ์ในการดักจับอนุภาคขนาดเล็ก

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา (1) ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใบของต้นไม้ประดิษฐ์ต่อการดักจับอนุภาคขนาดเล็ก และ (2) ผลของลักษณะใบต่อความสามารถในการดักจับอนุภาคขนาดเล็ก

2. วิธีการวิจัย

2.1 ต้นไม้ที่ใช้ในการทดลอง





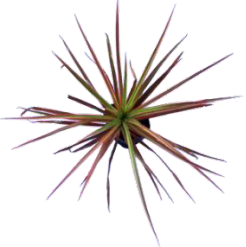
ต้นไม้ที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ต้นไม้จริง และต้นไม้ประดิษฐ์ ซึ่งเป็นต้นไม้ที่นิยมปลูก

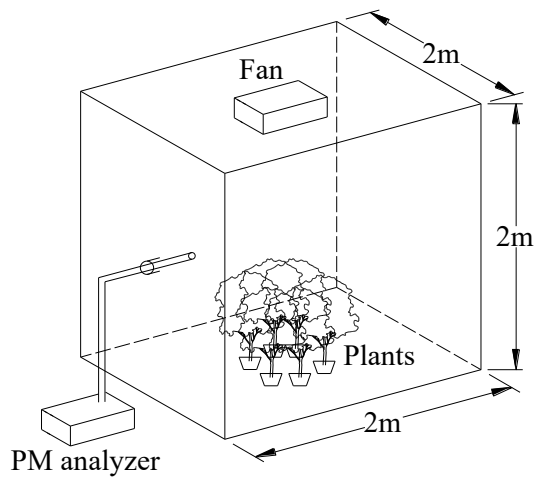
หรือประดับภายในอาคาร โดยมีลักษณะใบของต้นไม้แสดงดังตารางที่ 1

2.2 ห้องทดสอบ

การทดสอบนี้ใช้ห้องทดสอบขนาด 2×2×2 ลบ.ม. ทำจากวัสดุมีผิวผนังด้านในเป็นอะลูมิเนียมโดยผนังด้านข้างเจาะช่องสำหรับสอดสายเก็บตัวอย่างอากาศ ซึ่งตำแหน่งที่ติดตั้งท่อเก็บตัวอย่างอากาศอยู่ห่างจากต้นไม้ประมาณ 0.3 ม. และอยู่เหนือพื้นห้อง 0.5 ม. วางต้นไม้ที่จะทดสอบไว้บริเวณกลางห้อง ใช้อะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil) ห่อกระถางเพื่อป้องกันดินฟุ้งกระจายขณะทำการทดลอง ดังรูปที่ 1 เริ่มต้นการทดลองโดยจุดธูปในห้องทดสอบให้มีความเข้มข้นของ PM_{2.5} อยู่ในช่วง 240-250 มก./ลบ.ม. วัดด้วยเครื่องวัดอนุภาคแขวนลอยในอากาศแบบเลเซอร์ (Dust Trak II Model, TSI Inc., USA) โดยเครื่องบันทึกค่าความเข้มข้นอนุภาคอย่างต่อเนื่องอัตโนมัติทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 24 ชม. และบนเพดานห้องติดตั้งพัดลมขนาดเล็กเพื่อช่วยให้อากาศภายในผสมผสานกันอย่างทั่วถึง และควบคุมให้ความเร็วลมภายในห้องไม่เกิน 0.3 ม./วินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมภายในอาคารโดยทั่วไป ห้องทดสอบเป็นแบบปิด และติดตั้งในบริเวณที่มีอัตราการระบายอากาศสูงเพื่อป้องกันการสะสมของมลพิษภายนอกห้องทดสอบ การควบคุมสภาพแวดล้อมของห้องทดสอบเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของ ASTM D5116-06 [11] โดยควบคุมอุณหภูมิของห้อง 25-26°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50-70 ในการศึกษาทำการทดสอบต้นไม้ทีละชนิด โดยจำนวนต้นไม้ที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวใบที่กำหนด การพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ใช้โปรแกรมสถิติ NLREG® version 6.3 (Phillip H. Sherwood, USA)

ตารางที่ 1 ลักษณะใบของต้นไม้ที่ใช้ในการทดลอง

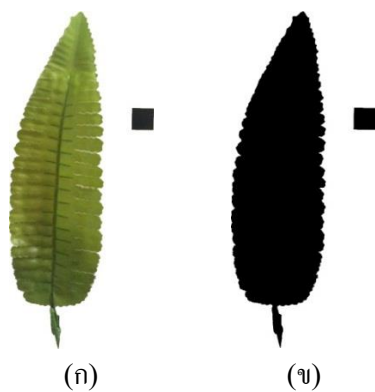
กลุ่ม	ชื่อต้นไม้	ลักษณะของใบ	รูปภาพ
ต้นไม้ประดิษฐ์	ต้นเฟิร์นประดิษฐ์ (Artificial Boston Fern)	ผลิตจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ถักเป็นใบ คล้ายผ้าบางๆ เป็นใบเดี่ยว มีลักษณะปลายใบแหลม ขอบใบหยัก เว้าเป็นเส้นแนวขวาง มีรูปทรงคล้ายขนนก สีเขียวเหมือนกันทั้งใบ	
	ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์ (Artificial Dieffenbachia)	ผลิตจากโพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) อัดขึ้นรูป ใบเดี่ยว มีลักษณะหนา โคนใบมน ปลายใบแหลม แผ่นใบ และขอบใบเรียบ สีเขียวเข้มมีลายสีขาว	
ต้นไม้จริง	ต้นพลูด่าง (Golden Pothos) ชื่อวิทยาศาสตร์: <i>Epipremnum aureum</i> (Lind. & Andre') Bunting	เป็นใบเดี่ยว ทางออกบริเวณข้อ 2 ใบ อยู่ตรงข้ามกัน ใบมีลักษณะโคนใบมน โคนใบส่วนกลางเว้า ปลายใบแหลม มีรูปทรงคล้ายรูปหัวใจ แผ่นใบ และขอบใบเรียบ ใบมีลักษณะหนา และอวบน้ำ มีสีเขียวหรือหลายสีแกมกัน ได้แก่ สีเขียวอ่อน สีเขียวอ่อนออกทอง สีเขียวแก่ สีเหลือง และสีขาว	
	ต้นฤๅษีผสม (Painted nettle) ชื่อวิทยาศาสตร์: <i>Solenostemon scutellarioides</i> (L.) Codd.	เป็นใบเดี่ยว การจัดเรียงใบแบบเรียงตรงข้าม ใบเป็นรูปไข่ มีลักษณะปลายใบแหลม โคนใบมน ขอบใบหยัก เว้า และมีขน สีใบมีความหลากหลายเนื่องจากการผสมกันระหว่างสีเขียว ครีมน้ำแดง ม่วง และชมพู [12]	
	เข็มสามสี (Rainbow tree) ชื่อวิทยาศาสตร์: <i>Dracaena cincta</i> Bak. cv. Tricolor	เป็นใบเดี่ยว เรียงเวียนสลับ แตกใบที่ตรงส่วนยอดของลำต้น ปลายใบแหลม โคนเรียวยาว แผ่นใบมีสามสีเป็นแถบไปตามความยาวของใบโดยสีแดงอยู่ขอบนอก สีครีมหรือเหลืองอ่อนอยู่ถัดเข้ามาและสีเขียวอยู่ข้างในตรงกลางใบ	



รูปที่ 1 ห้องทดสอบ และการติดตั้งอุปกรณ์

2.3 การหาพื้นที่ใบ

การหาพื้นที่ใบใช้โปรแกรม MATLAB R2015A version 8.5.0.197613 โดยมีขั้นตอนดังนี้ ถ่ายภาพใบที่ต้องการในแนวระนาบเคียงคู่กับกระดาษที่ใช้เป็นพื้นที่อ้างอิง 1 ตร.ซม. โดยถ่ายภาพทั้งสองที่ระดับความสูงเท่ากันและให้พื้นหลังเป็นสีขาว จากนั้นนำข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้โค้ดคำสั่งคำนวณหาพื้นที่ผิวใบ ซึ่งจะเปลี่ยนภาพถ่ายสีเป็นภาพขาว-ดำ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การหาพื้นที่ใบ (ก) ตัวอย่างภาพถ่ายใบที่ต้องการหาพื้นที่และภาพพื้นที่อ้างอิง และ (ข) ภาพถ่ายที่เปลี่ยนเป็นภาพ ขาว-ดำ

จากนั้น โค้ดคำสั่งจะหาจำนวนพิกเซล (pixels) สีดำของภาพใบไม้ และภาพพื้นที่อ้างอิง เนื่องจากการส่อง

กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (stereo microscope) พบว่ามีอนุภาคเกาะติดบนใบไม้ทั้ง 2 ด้าน ดังนั้นการคำนวณพื้นที่ใบจึงคำนวณทั้ง 2 ด้าน ตามสมการ (1) โดยทำซ้ำ 10 ครั้ง ส่วนพื้นที่ใบทั้งหมดของหนึ่งต้นหาจากการคูณด้วยจำนวนใบทั้งหมดบนต้น โดยทำซ้ำ 4 ครั้งควบคุมอายุของต้นไม้ที่ในการทดลองแต่ละชนิดเพื่อให้ได้ขนาดของต้นที่ใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง ดังนั้นต้นพลูด่างมีอายุประมาณ 3 เดือน ต้นฤๅษีผสม และต้นเข็มสามสี มีอายุประมาณ 6 เดือน จำนวนพื้นที่ใบของต้นไม้ทั้ง 5 ชนิดดังตารางที่ 2

$$\left(\frac{pixels_{leaf}}{pixels_{refer}} \times refer \right) \times 2 \quad (1)$$

โดยที่

$pixels_{leaf}$ คือ จำนวนพิกเซลของพื้นที่ใบ

$pixels_{refer}$ คือ จำนวนพิกเซลของพื้นที่อ้างอิง

$refer$ คือ พื้นที่อ้างอิง (ตร.ซม./ใบ)

ตารางที่ 2 พื้นที่ใบทั้งหมดต่อ 1 ต้นของต้นไม้ทั้ง 5 ชนิด

ต้นไม้	จำนวนใบทั้งหมดบนต้น (ใบ/ต้น)	พื้นที่ใบทั้ง 2 ด้าน (ตร.ม./ต้น)
ต้นเฟิร์นประดิษฐ์	21 ± 0	0.18 ± 0.01
ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์	9 ± 0	0.39 ± 0.01
ต้นพลูด่าง	27 ± 5.1	0.20 ± 0.05
ต้นฤๅษีผสม	40 ± 9.1	0.20 ± 0.08
ต้นเข็มสามสี	35 ± 3.5	0.11 ± 0.01

พื้นที่ใบทั้งหมดต่อต้นของต้นไม้ที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ต้นเฟิร์นประดิษฐ์ ต้นพลูด่าง และต้นฤๅษีผสม มีพื้นที่ใบต่อต้นใกล้เคียงกัน ในขณะที่ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์มีพื้นที่ใบมากที่สุดซึ่งมากกว่าพื้นที่ใบของต้นเข็มสามสีถึง 3.5 เท่า ต้นเข็มสามสีมีใบเรียวยาวแต่มีจำนวนใบต่อต้นใกล้เคียงกับต้นพลูด่าง และต้นฤๅษีผสม

2.4 การศึกษาผลของพื้นที่ใบต่อความสามารถในการดักจับ PM_{2.5}

การทดลองนี้เลือกทดสอบกับต้นเฟิร์นประดิษฐ์ที่มีขนาดใบเท่ากันทุกใบและมีจำนวนใบต่อดันเท่ากัน ซึ่งช่วยให้สามารถแปรเปลี่ยนพื้นที่ใบที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งได้อย่างแน่นอน ทำการทดลองโดยใช้พื้นที่ใบทั้งหมดของต้นเฟิร์นประดิษฐ์ 4 ค่า คือ 0, 2.9, 6.5 และ 8.9 ตร.ม. ซึ่งเทียบเท่ากับจำนวนต้นเฟิร์น 0, 16, 36 และ 49 ต้น ตามลำดับ โดยปักต้นเฟิร์นประดิษฐ์ลงบนแผ่นโฟมที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ที่ความสูงจากพื้นห้องประมาณ 0.3 ม. ทำการทดลองซ้ำรอบละ 2 ครั้ง

2.5 การศึกษาผลของลักษณะใบต่อความสามารถในการดักจับ PM_{2.5}

การทดลองนี้เปรียบเทียบต้นไม้มทั้ง 5 ชนิดที่แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีลักษณะผิวใบและรูปร่างใบแตกต่างกัน

โดยทำการทดลองกับต้นไม้ที่ละชนิด และควบคุมให้พื้นที่ใบทั้งหมด (2 ด้าน) มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 5 ตร.ม. ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่ใบต่อปริมาตรอากาศในห้องทดสอบ (total leaf area to air volume ratio) ที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงอนุภาคขนาดเล็กภายในห้องทดสอบจากการดักจับด้วยต้นไม้เมื่อเทียบกับห้องทดสอบที่ไม่มีต้นไม้ จำนวนต้นของต้นไม้แต่ละชนิดที่ทดสอบมีจำนวนแตกต่างกันเนื่องจากพื้นที่ใบต่อต้นไม่เท่ากัน ทำการจัดวางต้นไม้ในทำการทดลองให้มีความสูงจากพื้นห้องประมาณ 0.3 ม. โดยต้นไม้ประดิษฐ์ถูกปักบนแผ่นโฟมที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ในขณะที่ต้นไม้จริงวางบนพื้นห้องยกเว้นต้นพลูด่างที่มีความสูงประมาณ 0.2 ม. จึงรองด้วยแผ่น โฟมที่ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ตั้งรูปที่ 3 ต้นไม้แต่ละชนิดทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 การจัดวางต้นไม้ในห้องทดสอบ (ก) ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์ และ (ข) ต้นพลูด่าง

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าพารามิเตอร์

2.6.1 อัตราการรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (λ)

ในงานวิจัยนี้วัดอัตราการรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (λ) ด้วยวิธีที่เรียกว่า tracer gas decay method ตามข้อกำหนดของ ASTM E741 [13] โดยใช้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นก๊าซทำรอย การลดลงของระดับ CO ในอากาศภายในห้องทดสอบมาจากการรั่วซึมของอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

สมดุลมวลของก๊าซทำรอยดังสมการ (2) กรณีความเข้มข้นภายนอกห้องมีค่าเท่ากับศูนย์

$$V \frac{dC}{dt} = -QC_i \quad (2)$$

แก้สมการ (2) จะได้

$$C_t = C_0 e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (3)$$

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้นของ CO ที่เวลาใด ๆ

(มก./ลบ.ม.)

C_0 คือ ความเข้มข้นของ CO ที่เวลาเริ่มต้น

(มก./ลบ.ม.)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศเข้าออกห้องทดสอบ

(ลบ.ม./ชม.)

V คือ ปริมาตรห้องทดสอบ (ลบ.ม.)

t คือ เวลา (ชม.)

เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซทำรอยที่ลดลงตามเวลาเนื่องจากการรั่วซึมของห้อง มาพยากรณ์อัตราการรั่วซึมของห้องด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear regression analysis) ตามสมการ (4) โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ NLREG[®] version 6.3 (Advanced) (Phillip H. Sherwood, USA) ได้ λ มีค่าเท่ากับ 0.05 ± 0.007 ต่อชั่วโมง

2.6.2 สัมประสิทธิ์การสูญหายของ PM_{2.5} จากการตกทับถมบนพื้นผิวในห้องทดสอบ (k_{loss})

การสูญหายของอนุภาคขนาดเล็กออกจากอากาศภายในห้องทดสอบ นอกเหนือจากการรั่วซึมของห้องทดสอบที่พาอนุภาคออกไปแล้ว ยังมีกลไกตามธรรมชาติอื่นร่วมด้วย คือ การตกทับถมของอนุภาคบนพื้นผิวของห้องทดสอบ ซึ่งสามารถแสดงด้วยสัมประสิทธิ์การสูญหาย หรือ k_{loss} สามารถหาได้โดยเริ่มต้นให้ห้องทดสอบมีอนุภาค PM_{2.5} อยู่ในระดับ 240-250 มก./ลบ.ม. และภายในห้องทดสอบไม่มีต้นไม้อื่นๆ จากนั้นบันทึกความเข้มข้นที่ลดลงตามเวลา กรณีที่ความเข้มข้น PM_{2.5} ภายนอกห้องทดสอบมีค่าน้อยมาก สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยสมการสมดุลมวลสมการ (5)

$$V \frac{dC_t}{dt} = -QC_t - k_{loss} C_t V \quad (5)$$

แก้สมการ (5) จะได้

$$C_t = (C_0 - C_b) e^{-(\lambda + k_{loss})t} + C_b \quad (6)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่เวลาใด ๆ

(มก./ลบ.ม.)

C_0 คือ ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่เวลาเริ่มต้น

(มก./ลบ.ม.)

C_b คือ ความเข้มข้น ภูมิหลังของ PM_{2.5} (background concentration) เป็นค่าที่วัดเมื่ออัตราการแทรกซึมของ PM_{2.5} จากภายนอกเข้าสู่ห้องทดสอบเท่ากับ อัตราการสูญหายของ PM_{2.5} จากอากาศในห้องทดสอบเนื่องจากการตกทับถมที่พื้นผิวห้อง ดังนั้นความเข้มข้น PM_{2.5} ภายในห้องทดสอบจะลดลงจนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าที่ใช้ในแบบจำลองได้จากการวัดความเข้มข้น PM_{2.5} เมื่อเวลาผ่านไปจนความเข้มข้นในห้องทดสอบคงที่แล้ว (มก./ลบ.ม.)

λ คือ อัตราการรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (ต่อชั่วโมง) ได้จากการประเมินในข้อ 2.6.1

เมื่อนำชุดข้อมูล (data set) ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ในอากาศภายในห้องทดสอบที่ไม่มีต้นไม้อื่นๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่าน วัดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงตามสมการ (6) เพื่อพยากรณ์สัมประสิทธิ์การสูญหาย โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ NLREG[®] ได้ k_{loss} ของ PM_{2.5} เนื่องจากการรั่วซึมของห้อง และการตกทับถมที่ผิวห้อง เท่ากับ 0.03 ต่อชั่วโมง

2.6.3 สัมประสิทธิ์การสูญหายของ PM_{2.5} จากการตกทับถมบนพื้นผิวใบ (k_{tree})

การสูญหายของอนุภาคขนาดเล็กจากการกำจัดโดยใช้ต้นไม้ สามารถแสดงด้วยสัมประสิทธิ์การสูญหาย หรือ k_{tree} ซึ่งวัดได้ด้วยการทดลองแบบเดียวกับการหา k_{loss} แต่ใส่ต้นไม้ที่ต้องการทดสอบในห้อง กรณีที่ความเข้มข้น PM_{2.5} ภายนอกห้องทดสอบมีค่าน้อยมาก สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยสมการสมดุลมวลสมการ (7)

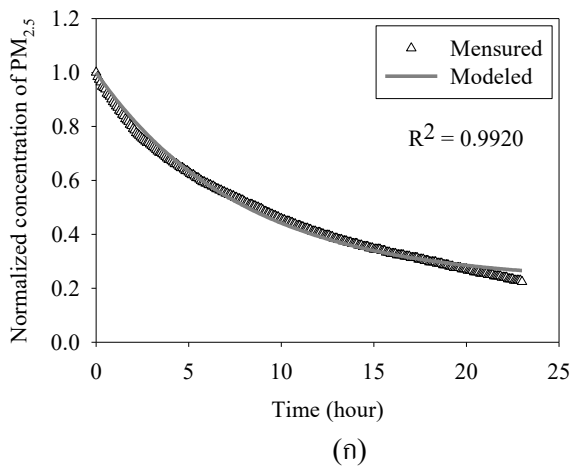
$$V \frac{dC_t}{dt} = -QC_t - k_{loss} C_t V - k_{tree} C_t V \quad (7)$$

เทอมที่ 1 ทางขวาของสมการ (7) แสดงการกำจัด PM_{2.5} ด้วยการรั่วซึมของห้องทดสอบ เทอมที่ 2 แทนการกำจัดด้วยการตกทับถมบนพื้นผิวของห้องทดสอบ และ

เทอมสุดท้ายแทนการกำจัดด้วยผิวใบ เมื่อแก้สมการ (7) จะได้

$$C_t = (C_0 - C_b)e^{[-(\lambda+k_{loss}+k_{tree})t]} + C_b \quad (8)$$

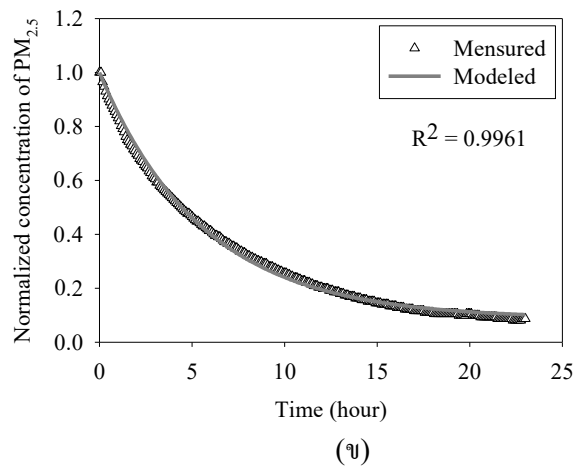
k_{tree} ของต้นไม้ในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ สามารถหาได้โดยนำชุดข้อมูลความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในอากาศภายในห้องทดสอบที่มีต้นไม้ซึ่งลดลงตามเวลาที่ผ่านไป เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงตามสมการ (8) โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ NLREG® เพื่อพยากรณ์ค่าพารามิเตอร์ หมายเหตุ ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งสำหรับต้นไม้แต่ละชนิด เพื่อหา ค่าเฉลี่ย ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณด้วยวิธีการแพร่กระจายความผิดพลาด (error propagation)



3. ผลการทดลอง

3.1 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

รูปที่ 4 แสดงความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หลังการนอร์มัลไลซ์ (normalization) หรือคำนวณเทียบต่อความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้น ตัวอย่างกรณี (ก) ไม่มีต้นไม้ในห้องทดสอบ และ (ข) มีต้นไม้ประดับประดา ซึ่งวัดได้จากการทดลอง และได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองสมการ (8) พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองมีความแนบสนิทดีกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มีค่า R^2 (proportion of variance explained) ที่ได้จากการทดลองอยู่ระหว่าง 0.97–0.99 และมีค่า Prob(t) เท่ากับ 0.00001 บ่งชี้ว่ามีโอกาสเพียง 1 ใน 100,000 ที่พารามิเตอร์ที่ทำนายจะเป็นศูนย์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ k_{tree} ที่พยากรณ์ด้วยแบบจำลองนี้แสดงในตารางที่ 3

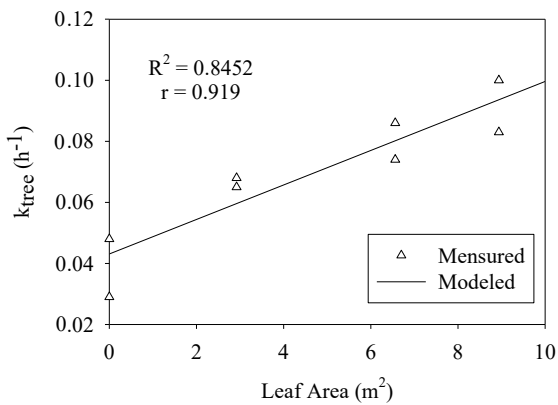


รูปที่ 4 ความเข้มข้นนอร์มัลไลซ์ของ $PM_{2.5}$ ที่วัดในการทดลองและที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณี (ก) ไม่มีต้นไม้ภายในห้องทดสอบ และ (ข) มีต้นไม้ประดับประดา

3.2 ผลของพื้นที่ใบต่อความสามารถในการดักจับ $PM_{2.5}$

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างจำนวนต้นไม้ประดับประดา กับ k_{tree} มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, r) เท่ากับ 0.919 ทดสอบที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในระดับสูง

โดยเห็นได้ว่า k_{tree} มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนพื้นที่ใบที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีพื้นที่ใบในห้องทดสอบ 2.9 ตร.ม. สามารถกำจัด $PM_{2.5}$ ออกจากอากาศได้เร็วกว่าเมื่อไม่มีต้นไม้ถึง 1.8 เท่า และเมื่อเพิ่มพื้นที่ใบเป็น 8.9 ตร.ม. ค่า k_{tree} เพิ่มขึ้น 2.5 เท่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง จำนวนต้นไม้ ปริมาตรอากาศ กับ k_{tree}

จากข้อมูลความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสร้างสมการการถดถอยเชิงเส้นตรงได้ ดังสมการ (9) และมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8452

$$y = 5.6 \times 10^{-3}x + 0.04 \quad (9)$$

โดยที่

y คือ ค่า k_{tree} ของต้นไม้ปริมาตรอากาศในการดักจับ $PM_{2.5}$ (ต่อชั่วโมง)

x คือ พื้นที่ใบทั้งหมด (ตร.ม.)

เมื่อเทียบความสามารถของต้นไม้กับเครื่องฟอกอากาศที่ใช้แผ่นกรองแบบ True HEPA กำลังไฟ 90 วัตต์ ค่า CADR (clean air delivery rate) สำหรับ $PM_{2.5}$ ที่วัดด้วยระบบและห้องทดสอบเดียวกันเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 66.2 ลบ.ม./ชม. [14] หรือคิดเป็นอัตราการสูญหายของ $PM_{2.5}$ ต่อชั่วโมง ที่ปริมาตรห้อง 8 ลบ.ม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องฟอกอากาศสามารถกำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้เร็วกว่า 100 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้ต้นไม้ปริมาตรที่มีพื้นที่ใบรวม 5 ตร.ม. หรือกล่าวได้ว่าต้องใช้ต้นไม้ปริมาตรถึง 8,200 ต้นจึงจะสามารถกำจัดอนุภาคขนาดเล็กได้เร็วเท่ากับการใช้เครื่องฟอกอากาศ ซึ่งจำนวนต้นไม้ที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการ (9) $(66.2 - 0.04) / ((5.6 \times 10^{-3}) \times 8) / 0.18$ ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่า ต้นไม้ประดับยังไม่สามารถกำจัด

อนุภาคขนาดเล็กได้อย่างรวดเร็วเท่าเครื่องฟอกอากาศที่ออกแบบมาโดยการใช้ปั๊มดูดอากาศให้ไหลผ่านแผ่นวัสดุกรองโดยตรง

3.3 ผลของลักษณะใบต่อความสามารถในการดักจับ $PM_{2.5}$

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของ $PM_{2.5}$ จากการตกทับถมบนพื้นผิวใบ ของต้นไม้ที่ทดสอบทั้ง 5 ชนิด โดยมีพื้นที่ใบทั้งหมดใกล้เคียงกันประมาณ 5 ตร.ม. โดยค่า k_{tree} ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยใช้ชุดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ที่วัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ตามสมการ (8) มาพยากรณ์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดโดยใช้เงื่อนไขว่า ผลรวมความผิดพลาด (sum of squared error) ระหว่างชุดข้อมูลความเข้มข้นที่วัดจริงจากการทดลอง กับ ชุดข้อมูลความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ (8) ต้องมีค่าต่ำที่สุด (least-squares) หมายถึงค่า k_{tree} ของต้นไม้ปริมาตรที่แสดงในตารางได้จากการพยากรณ์ด้วยสมการ (9)

ค่า k_{tree} ของต้นไม้ปริมาตรที่ได้จากการทำนายด้วยชุดข้อมูล 24 ชั่วโมงมีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 44×10^{-3} ต่อชั่วโมง เนื่องจากต้นไม้ปริมาตรมีการคายน้ำสูงโดยสังเกตได้จากละอองน้ำที่ติดตามผนังห้องหลังสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งภายใต้แสงที่น้อยต้นไม้ส่วนใหญ่จะไม่สามารถคายน้ำได้เพราะปากใบปิด แต่ต้นไม้ปริมาตรสามารถคายน้ำที่ผิวใบได้โดยตรงถึงแม้ปากใบจะปิด การควบคุมการคายน้ำของต้นไม้ปริมาตรจึงไม่สามารถทำได้ [15] โดยน้ำที่ปกคลุมผิวใบของต้นไม้ปริมาตรสามารถเปลี่ยนพื้นผิวใบที่ขรุขระให้ราบเรียบขึ้น มีผลให้การถ่ายเทมวล (mass transfer) ของอนุภาคขนาดเล็กลดลง จากการทดสอบผลของความชื้นภายในห้องทดสอบที่ไม่มีต้นไม้ พบว่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความสามารถในการดักจับของ $PM_{2.5}$ เมื่อทำนายค่า k_{tree} โดยใช้ชุดข้อมูลในช่วงหลัง 3 ชั่วโมง (3-24 ชั่วโมง) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงซึ่งแสดงว่าต้นไม้ปริมาตรไม่สามารถดักจับ $PM_{2.5}$ ได้เลย แต่เมื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์จากชุดข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความ

เข้มข้นในช่วง 3 ชั่วโมงแรก จะได้ค่า k_{tree} เท่ากับ 78×10^{-3} ต่อชั่วโมง งานวิจัยของ Freer-Smith และคณะ [16] ชี้ให้เห็นว่า ใบที่มีลักษณะข่นและมีขนจะมีประสิทธิภาพดักจับอนุภาคขนาดเล็กได้ดี อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ก็กลับพบว่าต้นฤๅษีผสมลักษณะผิวใบมีขนกลับมีประสิทธิภาพดักจับน้อยกว่า ซึ่งเกิดจากผลของการคายน้ำของผิวใบ

งานวิจัยของ Tiwary และคณะ [17] กล่าวว่า ต้นสนที่มีลักษณะของใบเล็กเรียวยาวเป็นแท่งดักจับอนุภาคขนาดเล็กได้ดี เพราะลักษณะใบส่งผลให้ชั้นขอบเขตของของไหลที่อยู่ติดกับผิวใบ (boundary layer) ลดแคบลง กว่าใบที่มีลักษณะแผ่กว้าง อย่างไรก็ตามต้นเข็มสามสีกลับมี k_{tree} น้อยกว่าต้นพลูด่าง ประมาณร้อยละ 13 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะใบของต้นเข็มสามสี ยังไม่เล็กเรียวยาวที่จะช่วยลดชั้นขอบเขตในการถ่ายเทมวลอนุภาคขนาดเล็กมาที่ผิวใบด้วยกลไกการแพร่ ต้นเฟิร์นประดิษฐ์ มีค่า k_{tree} มากที่สุด โดยมากกว่าต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์ ร้อยละ 14 อาจมาจากลักษณะใบของต้นเฟิร์นประดิษฐ์ที่มีลักษณะผิวใบข่นขอบใบหยัก จึงมีประสิทธิภาพมากกว่าต้นสาวน้อยประแป้ง ที่มีลักษณะใบเรียบและหนา

เมื่อพิจารณาความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบที่มีต้นไม้หลังสิ้นสุดการทดลอง 24 ชั่วโมง พบ ความเข้มข้น เฉลี่ยช่วง 2 ชั่วโมงสุดท้าย มีค่าอยู่ในช่วง 18-28 มกค./ลบ.ม. ซึ่งไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานโดยประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดระดับ $PM_{2.5}$ ไม่เกิน 50 มกค./ลบ.ม. [5] ในขณะที่ความเข้มข้นสุดท้ายในห้องทดสอบที่ไม่มีต้นไม้ มีค่าเท่ากับ 46 มกค./ลบ.ม.

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การสูญหายของ $PM_{2.5}$ จากการตกทับถมบนพื้นผิวใบ (k_{tree}) ของต้นไม้ที่ทดสอบ

ต้นไม้	พื้นที่ใบทั้งหมด (ตร.ม.)	จำนวนต้น	k_{tree} ($\times 10^{-3}$ ต่อ ชั่วโมง)
ต้นเฟิร์นประดิษฐ์	4.91	27	70*

ต้นไม้	พื้นที่ใบทั้งหมด (ตร.ม.)	จำนวนต้น	k_{tree} ($\times 10^{-3}$ ต่อ ชั่วโมง)
ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์	5.46	14	60 ± 1.01
ต้นพลูด่าง	4.70	24	60 ± 0.98
ต้นฤๅษีผสม	4.85	25	44 ± 1.19
ต้นเข็มสามสี	5.26	47	52 ± 0.89

หมายเหตุ: *ค่าสัมประสิทธิ์ได้จากการพยากรณ์ด้วยสมการ (9)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองความสามารถในการดักจับอนุภาคขนาดเล็ก พบว่า พื้นที่ใบที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถในการดักจับ $PM_{2.5}$ เพิ่มขึ้น โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ และลักษณะของใบมีผลต่อความสามารถในการดักจับอนุภาคขนาดเล็ก โดยใบของต้นเฟิร์นประดิษฐ์ที่มีผิวใบข่นมีความสามารถดักจับมากกว่าใบเรียบแผ่กว้าง นอกจากนี้การคายน้ำของต้นไม้ได้แก่ ต้นฤๅษีผสม มีผลทำให้ความสามารถในการดักจับลดลงจนเป็นศูนย์ แต่ทั้งนี้การทดสอบทำในห้องทดลองที่มีลักษณะปิดจึงอาจมีผลต่อการคายน้ำของต้นไม้ค่อนข้างมาก สัมประสิทธิ์การสูญหายของ $PM_{2.5}$ จากการตกทับถมบนพื้นผิวใบของต้นเฟิร์นประดิษฐ์ ต้นสาวน้อยประแป้งประดิษฐ์ และต้นพลูด่าง มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.06-0.07 ต่อชั่วโมง ในขณะที่ต้นฤๅษีผสมและต้นเข็มสามสีมีค่าต่ำกว่าประมาณ 0.04-0.05 ต่อชั่วโมง

การปลูกไม้ประดับภายในอาคารนั้นนอกจากจะใช้เพื่อการตกแต่งแล้ว ต้นไม้ประดับยังมีความสามารถในการดักจับ $PM_{2.5}$ ได้ แต่ต้องใช้เวลาในการลดความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เมื่อเทียบกับการใช้เครื่องฟอกอากาศ ดังนั้นการใช้ต้นไม้ประดับดักจับฝุ่นละอองภายในอาคารจึงเป็นเพียงมาตรการเสริมร่วมกับการใช้วิธีการควบคุมอื่น เช่น การควบคุมมลพิษที่แหล่งกำเนิด เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ บุคลากรที่เกี่ยวข้องของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม นิสิตบัณฑิตศึกษา ของสถาบันวิจัยวลัยรุกขเวช มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้อง

จุลทรรศน์ วัสดุและอุปกรณ์การวิจัยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนพัฒนามหาวิทยาลัย “ทุนภูมิพล” มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปี พ.ศ. 2558 รวมถึง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jenkins, P.L., Phillips, T.J., Mulberg, E.J. and Hui, S.P. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment*, 1992; 26A: 2141-2148.
- [2] สรุปผลการสำรวจที่สำคัญ การสำรวจการใช้เวลาของประชากร. สำนักงานสถิติแห่งชาติ, กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2552.
- [3] ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 94. กระทรวงมหาดไทย, 2520.
- [4] Burroughs, H. E. and Hansen, S. J. Managing indoor air quality. 4th edition, Georgia: The Fairmont, 2008.
- [5] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 36 (2553) เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในบรรยากาศโดยทั่วไป. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535, ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนพิเศษ 37ง, วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2553.
- [6] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (2538) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535, ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 52ง, วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2538.
- [7] ดอกไม้ และ ดอกไม้ ประดิษฐ์. ชีววิทยเกษตรกรรม. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.farmkaset.org/contentsNET/default.aspx?content=00292#>
- [8] รวี เสธฐักดิ์, สามัคคี บุญยะวัฒน์ และ สุชาดา ศรีเพ็ญ. การวิจัยการใช้พืชเพื่อลดมลสารในอากาศ. ๕ ทรงเป็นร่มเกล้าชาวเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
- [9] Lohr, V.I. and Pearson-Mims, C.H. Particulate matter accumulation on horizontal surfaces in interiors: Influence of foliage plants. Department of Horticulture and Landscape Architecture, Washington State University, Pullman, WA 99164-6414, USA, 1995.
- [10] Hwang, H.J., Yook, S.J. and Ahn, K.H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric environment*, 2011; 45(38): 6987-6994.
- [11] ASTM. Standard Guide for Small-Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emissions from Indoor Materials/ Products. American Society for Testing and Materials, USA, ASTM D5116-06, 2006.
- [12] ธัญญา เศษศิลป์พิทักษ์. เขียนเรื่องดอกไม้ไว้อ่านเล่น เล่มที่ 3. กรุงเทพฯ: บ้านและสวน, 2545.
- [13] ASTM. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. American Society for Testing and Materials, USA, ASTM E741, 2009.
- [14] อาติธา เกรื่อวรรณ และ มณีรัตน์ องค์กรวรรณี. การประเมินเครื่องฟอกอากาศแบบเชิงพาณิชย์ในด้านศักยภาพการทำความสะอาด และสร้างมลพิษอากาศ. *วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อม*, 2555; 3: 28-33.

- [15] Rajapakse, N.C., Kelly, J.W. and Reed, D.W. Transpiration and water use of floricultural plants under low light conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1988; 113(6): 910-914.
- [16] Freer-Smith, P.H. , Beckett, K.P. , and Taylor, G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* X *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and X *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005; 133(1): 157–67.
- [17] Tiwary, A., Sinnett, D., Peachey, C., Chalabi, Z., Vardoulakis, S., Fletcher, T., Leonardi, G., Grundy, C., Azapagic, A. and Hutchings, T. An integrated tool to assess the role of new planting in PM10 capture and the human health benefits: A case study in London. *Environmental Pollution*, 2009; 157: 2645–53.