แบบจำลองระยะทางในการฟุ้งกระจายและความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ที่เกิดจากการเผาชีวมวล

A computational model for diffusion and concentration of $PM_{2.5}$ caused by biomass burning

วรชนันท์ ชูทอง[1*]
Warachanan Choothong[1*]

Received: 5 December 2021 ; **Revised**: 22 January 2022 ; **Accepted**: 3 March 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการฟุ้งกระจายสำหรับฝุ่นละอองอนุภาคขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) ที่เกิดจากการเผาเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่จังหวัดนครสวรรค์ ด้วยโมเดล NRC และ Gaussian Plume โดยใช้การทดสอบทั้งแนวดิ่ง และแนวระนาบ ในการทดสอบแนวดิ่ง จะทดสอบที่ระยะ 600 เมตร เหนือพื้นดินเหมือนกันทั้ง 2 โมเดล เนื่องจากเป็นระยะความสูงที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด แต่ตัวแปรสำหรับการทดสอบในแนวระนาบนั้น จะใช้ค่าตัวแปรที่ไม่เหมือนกัน เพื่อให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนในแต่ละโมเดล ในส่วนโมเดล NRC สามารถใช้ทดสอบกับแรงลมเบาได้เพียงอย่างเดียวนั้น กำหนดให้ใช้ตัวแปรระยะทางทดสอบ 2 ระยะ คือ 100 และ 1,000 เมตร โดยผลที่ได้สำหรับระยะ 100 เมตร ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 0.0815 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อระยะทางห่างออกไปเป็น 1,000 เมตร อัตราความเข้มข้นลดลงเหลือเพียง 0.0793 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับโมเดล Gaussian Plume สามารถใช้ทดสอบกับแรงลมได้หลายระดับ ประกอบด้วย เบา ปานกลาง และแรง ใช้ค่าตัวแปรทดสอบในแนวระนาบ 3 ระยะ ได้แก่ 5 10 และ 100 เมตร โดยผลที่ได้ สามารถจำแนกได้ดังนี้ ระดับลมเบา ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 0.1940 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 0.1183 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.0023 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมปานกลาง ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 3.1042×10^{-5} ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 0.0057 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.0013 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และระดับลมแรง ค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 0.00002 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 0.0030 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.0007 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: แบบจำลอง $PM_{2.5}$ การเผาชีวมวล เอ็นอาร์ซี เกาส์เซียนพลัม

Abstract

This research aims to create a simulation model for dispersion of Particulate Matter 2.5 ($PM_{2.5}$) from burning agricultural waste in Nakhon Sawan province by applying two different models, NRC and Gaussian Plume. The experiment with these models used both vertical and horizontal variables for testing. For vertical testing, both models performed at a distance of 600 meters above the ground because this parameter could give the best results. Horizontal testing, however, would use different variables to make a clear result between both models. The NRC model could only be tested with light wind ; nevertheless, two different distance variables were assigned to a model, 100 and 1,000 meters, for measurement. The concentration of dust for a distance of 100 meters was 0.0815 $\mu g/m^3$, and it was reduced to 0.0793 $\mu g/m^3$ at a distance of 1,000 meters. In contrast, the Gaussian Plume model could be examined with various wind levels, including light, moderate, and high wind using three distance parameters, 5, 10, and 100 meters. The results of dust density could be classified into three groups: 1) 0.1940 $\mu g/m^3$ 0.1183 $\mu g/m^3$ and 0.0023 $\mu g/m^3$ for light

[1] อาจารย์, สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000
[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน: Warachanan@nsru.ac.th
[1] Lecturer, Department of Computer and Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Nakhon Sawan, 60000
[*] Corresponding author: Warachanan@nsru.ac.th

wind speed, 2) $3.1042x10^{-5}$ µg/m^3 0.0057 µg/m^3 and 0.0013 µg/m^3 for moderate wind speed, and 3) 0.00002 µg/m^3 0.0030 µg/m^3 and 0.0007 µg/m^3 for high wind speed.

Keywords: Model, $PM_{2.5}$, Biomass Burning, NRC, Gaussian Plume

บทนำ

$PM_{2.5}$ (Particulate Matter 2.5) เป็นฝุ่นที่เมื่อวัดขนาดจากเส้นผ่านศูนย์กลางแล้ว จะมีขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน และสามารถพบได้จากการปนเปื้อนอยู่กับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ลอยปะปนอยู่กับไอน้ำ ควันและก๊าซ เป็นต้น (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเลย, 2562) หาก $PM_{2.5}$ มีมากเกินไปในอากาศย่อมสร้างผลกระทบต่าง ๆ ตามมา เช่น ผลกระทบต่อการท่องเที่ยว ช่วงปี พ.ศ. 2557 ถึงปี พ.ศ.2561 จำนวนนักท่องเที่ยวในจังหวัดเชียงใหม่ลดลง 106,060 คน กรุงเทพมหานครลดลง 659,368 คน (ธีรวัฒน์ น้ำคำ และเริงชัย ตันสุชาติ, 2564) เมื่อต้นปี 2564 กรุงเทพฯ และปริมณฑล ได้รับผลกระทบทางเศรษฐกิจในมุมมองของค่าเสียโอกาสด้านการท่องเที่ยว1,000-2,400 ล้านบาท ค่าเสียโอกาสด้านสุขภาพ 2,000-3,000 ล้านบาท (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2563) ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้อาการของโรคปอดอุดกั้นเรื้อรังกำเริบ หากได้รับ $PM_{2.5}$ 36-75 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มการกำเริบขึ้น 1.5 เท่า และหากได้รับ $PM_{2.5}$ มากกว่า 75 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มการกำเริบขึ้น 1.6 เท่า (กนก พิพัฒน์เวช และศิริพร อุปจักร, 2564) รวมไปถึงส่งผลต่อคุณภาพอากาศในหลาย ๆ จังหวัดอีกด้วย

สำหรับพื้นที่ในเขตภาคเหนือมีรายงานค่าฝุ่นละอองณ วันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2563 มีปริมาณ $PM_{2.5}$ เกินค่ามาตรฐานเฉลี่ยรายปี โดยจังหวัดนครสวรรค์อยู่ในเขตพื้นที่ใกล้เคียงที่มีค่า $PM_{2.5}$ เกินค่ามาตรฐานด้วยเช่นกัน (ส่วนแผนงาน สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง, 2563) เนื่องจากจังหวัดนครสวรรค์มีพืชเศรษฐกิจที่เป็นสาเหตุของการเกิดฝุ่นละอองในช่วงฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลิตผล คือ ข้าว และอ้อย โดยมีพื้นที่เพาะปลูกรวมกันมากถึง 3,276,023 ไร่ ฝุ่นละอองที่เกิดจากนาข้าวมีสาเหตุจากชาวนาเผาเศษฟางข้าวที่เหลือจากการนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อความรวดเร็วในการจัดเตรียมพื้นที่ปลูกข้าวในครั้งต่อไป ส่วนฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากการเผาไร่อ้อย เป็นเพราะสร้างความสะดวกในการเก็บผลผลิตลำต้นอ้อย เพื่อส่งให้กับโรงงานน้ำตาลภายในพื้นที่ของทางจังหวัด (สำนักงานจังหวัดนครสวรรค์, 2564)

จากปัญหาการเผาไหม้จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้สมการคณิตศาสตร์และแบบจำลองคอมพิวเตอร์มาใช้ในการพยากรณ์การฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง และหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ในพื้นที่จังหวัดนครสวรรค์ที่ระดับความสูงตั้งแต่ระดับพื้นดินสูงขึ้นไปจนถึงระดับ 1,500 เมตรเหนือพื้นดิน เพื่อให้ทราบผลกระทบของปริมาณ $PM_{2.5}$ ในอากาศต่อพื้นที่การเผา 1 ไร่ และนำการพยากรณ์นี้มาช่วยเป็นเครื่องมือสำคัญในการวางแผนป้องกัน ควบคุม และรับมือกับเหตุการณ์ดังกล่าวได้

แบบจำลองคุณภาพอากาศสำหรับการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย 2 แบบจำลอง ได้แก่ 1. NRC Model เป็นวิธีการที่เหมาะกับลมสงบ การคำนวณหาความเข้มข้นของสารมลพิษในอากาศขึ้นอยู่กับความสูงของควันที่เพิ่มขึ้น โดยมีพารามิเตอร์ที่อธิบายความรุนแรงของความผันผวนของความเร็วลมในแนวแกน x, y, z กำหนดเป็นค่าคงที่ และไม่ขึ้นกับความเสถียรของบรรยากาศ ความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ (Cuculeanu *et al.*, 2019a) 2. Gaussian Plume Model เป็นแบบจำลองที่สารมลพิษถูกปล่อยออกมาลักษณะต่อเนื่องเป็นทางยาวจากแหล่งกำเนิดแบบจุด โดยควันจะลอยตัวตามกระแสลม และแผ่ออกด้านข้างคล้ายรูปกรวย ความเข้มข้นของสารมลพิษจะมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของควัน ส่วนบริเวณขอบด้านข้างจะมีความเข้มข้นของสารมลพิษน้อยกว่า (Abdel- Rahman, 2008) โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้ Lotrecchiano *et al.*, (2020) ศึกษาวิจัยการกระจายตัวของสารก่อมลพิษ $PM_{2.5}$ โดยใช้ Gaussian Plume Dispersion Model พบว่าความเข้มข้นสูงสุดของสารก่อมลพิษที่คาดการณ์ไว้จะมีค่าสูงกว่าค่าข้อมูลที่บันทึกไว้ที่สถานีตรวจสอบ ซึ่งการมีสถานีตรวจวัดหลายแห่งในบริเวณใกล้เคียงกัน จะช่วยให้ตรวจสอบความถูกต้องได้ Yang *et al.*, (2020) ใช้ Gaussian Plume Model เพื่อทำนายการกระจายตัวของแอมโมเนีย และ PM ในโรงเรือนสัตว์ปีก ภายใต้สมมติฐานความเข้มข้นกระจายแบบปกติ ความเร็วลมและข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยามีค่าสม่ำเสมอ ความแรงและแหล่งกำเนิดคงที่ มีความเร็วลมมากพอที่จะทำให้ฟุ้งกระจายได้ และมวลของสารพิษคงที่ ซึ่งตรวจสอบด้วยการวัดภาคสนามได้ผลออกมาดีขึ้น Cuculeanu *et al.*, (2019a) พัฒนาและประเมินแบบจำลองการกระจายตัวสำหรับลมต่ำ และความสงบในบรรยากาศ ชื่อว่า ConDefa โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่ 1 พัฒนาแบบจำลองที่คำนึงถึงทั้งการฟุ้งกระจาย และการเคลื่อนตัวไปตามทิศทางลม การคำนวณความเข้มข้นในระดับลมต่ำ มี 2 เงื่อนไขสำหรับสภาวะ

ลมสงบ คือ ใช้อัลกอริธึมในการคำนวณผลกระทบ และใช้ NRC Model คำนวณความเข้มข้นที่ขึ้นอยู่กับความสูงของปล่องปล่อยควัน ส่วนที่ 2 ใช้แบบจำลอง ConDefa ประเมินผลการกระจายตัวของไอโซโทปในชั้นบรรยากาศเทียบกับความเข้มข้นที่วัดได้ พบว่าแบบจำลองสามารถให้ค่าประมาณที่เชื่อถือได้ Pandey & Sharan (2019) ใช้แบบจำลองการกระจายคุณภาพอากาศ AERMOD ในการวัดความเข้มข้นจากการทดลองการกระจายลมต่ำ โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ FASTALL, LOW-WIND1 และ LOW-WIND3 การวัดทางสถิติของทั้ง 3 กลุ่มพบว่าสอดคล้องกับการสังเกตและการวิเคราะห์เชิงปริมาณตาม ANOVA แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์จากทั้ง 3 กลุ่มของ AERMOD เทียบได้ในระดับนัยสำคัญ 5% Alemayehu & Hackett (2015) ศึกษาวิจัยความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โดยใช้แบบจำลองคุณภาพอากาศ AERMOD ที่อิงตามแบบจำลอง Gaussian Air Modeling พบว่า มีอย่างน้อย 19-26% ของความเข้มข้น $PM_{2.5}$ และ SO_2 ที่ปล่อยออกมาสู่ชั้นบรรยากาศถึงพื้นที่ศึกษา และตรวจวัดมลพิษได้น้อยกว่า 12 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน Abdel- Rahman (2008) ประเมินการกระจายของสารมลพิษทางอากาศโดยใช้ Gaussian Plume Model หาความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปล่อยจากระดับพื้นดิน ที่ระยะทางในแนวแกน x ที่แตกต่างกัน อิทธิพลหลักมาจากความเสถียรของบรรยากาศ ความเร็วลม ความสูงและอัตราการปล่อยสารมลพิษ ที่จะทำให้ความเข้มข้นที่ระดับพื้นดินสูง และลดลงจากเส้นกลาง

วิธีการศึกษา

การดำเนินการสำหรับการศึกษาครั้งนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1. การคำนวณอัตราการปล่อย $PM_{2.5}$ ในอากาศ 2. พยากรณ์ปริมาณของ $PM_{2.5}$ ที่ฟุ้งกระจายในอากาศ และ 3. ผลลัพธ์ของแบบจำลองระยะทางการฟุ้งกระจาย แสดงใน Figure 1

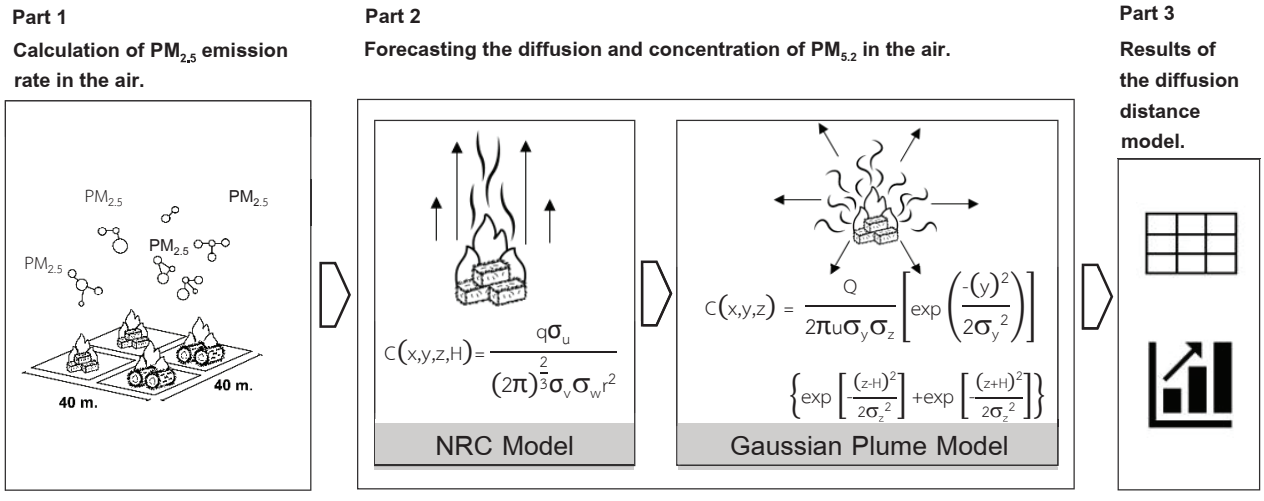


Figure 1 Conceptual framework of computational model for diffusion and concentration of $PM_{2.5}$ caused by biomass burning

ส่วน 1 การคำนวณอัตราการปล่อย $PM_{2.5}$ ในอากาศ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ อัตรามลพิษทางอากาศของ $PM_{2.5}$ นั้นคำนวณจากมวลของฟางข้าวแห้งในพื้นที่ขนาด 1 ไร่ (40 เมตร x 40 เมตร) แสดงในสมการ (1)

$$Q_{PM_{2.5}} = MxEF_{PM_{2.5}} \quad (1)$$

กำหนดให้:

$Q_{PM_{2.5}}$ คือ อัตราการปล่อยสารมลพิษของ $PM_{2.5}$ (มิลลิกรัมต่อวินาที)

M คือ มวลของฟางข้าวแห้ง (กรัม$_{มวลแห้ง}$ต่อไร่)

$EF_{PM_{2.5}}$ คือ ปัจจัยการปล่อยสารมลพิษของ $PM_{2.5}$(วินาทีต่อไร่)

ส่วน 2 พยากรณ์ปริมาณของ $PM_{2.5}$ ที่ฟุ้งกระจายในอากาศ ในส่วนนี้เป็นการคำนวณหาความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ที่แต่ละช่วงความสูง โดยแบ่งเป็นช่วง ช่วงละ 100 เมตร จากพื้นดิน จนถึงระยะความสูง 1,500 เมตรเหนือพื้นดิน เริ่มต้นการคำนวณหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่มีลักษณะควันลอยตัวขึ้นตรงๆ ด้วยวิธีการ NRC Model (The US Nuclear Regulatory Commission Model) และเมื่อมีการฟุ้งกระจายของ $PM_{2.5}$ จะคำนวณด้วยวิธีการ Gaussian Plume Model แสดงรายละเอียดดังนี้

วิธีการ NRC Model ใช้เพื่อหาการลอยขึ้นของฝุ่นละออง ด้วยการกำหนดให้ฝุ่นละอองนั้นลอยขึ้นตรงๆ จากพื้นดิน แล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นในแต่ละช่วง โดยกำหนดให้ค่าความเร็วลมนั้นคงที่ และตัดปัจจัยเรื่องความเสถียรภาพของบรรยากาศนั้นออกไป (Cuculeanu *et al.*, 2019b) แสดงในสมการ (2) และ (3)

$$C(x,y,z,H) = \frac{q\sigma_u}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_v\sigma_w r^2} \quad (2)$$

$$r^2 = x^2 + \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_w}\right)^2 (H-z_r)^2 \quad (3)$$

กำหนดให้:

C(x,y,z,H) คือ ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ ณ ตำแหน่ง x, y, z และ H (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

q คือ อัตราการปล่อยสารมลพิษทางอากาศ (มิลลิกรัมต่อวินาที)

σ_u คือ ความผันผวนกำลังสองของความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน x (เมตร)

σ_V คือ ความผันผวนกำลังสองของความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน y (เมตร)

σ_W คือ ความผันผวนกำลังสองของความเร็วลมเฉลี่ยในแนวแกน z (เมตร)

π คือ ค่าคงที่ 3.141

r^2 คือ ความรุนแรงของความผันผวน

x คือ ระยะทางในแนวแกน x (เมตร) จากแหล่งกำเนิดของผู้ที่ได้รับผลกระทบ

H คือ ความสูงของแหล่งกำเนิดสารมลพิษ (เมตร)

Z และ Z_r คือ ระยะทางในแนวแกน z (เมตร) หรือระยะความสูงจากพื้นดินของผู้ที่ได้รับผลกระทบซึ่งมีค่าเท่ากัน

จากสมการ (3) r^2 คำนวณจากระยะทางในแนวแกน x ที่ 100 เมตร และ 1,000 เมตร, σ_u มีค่าเท่ากับ 0.4 เมตรต่อวินาที, σ_v มีค่าเท่ากับ 0.4 เมตรต่อวินาที, σ_w มีค่าเท่ากับ 0.04 เมตรต่อวินาที, H กำหนดค่า เป็น 0 เมตรเนื่องจากเผาบนพื้นดิน และ Z_r โดยเริ่มที่ 0 เมตร และเพิ่มระยะความสูงช่วงละ 100 เมตรจากพื้นดินจนถึงระยะความสูง 1,500 เมตรเหนือพื้นดิน สอดคล้องกับ Algorithm1 การลอยตัวของสารมลพิษ แสดงใน Figure 2

Algorithm1 Pollutant Flotation

C(x,y,z,H) <- Concentration of Pollution in mg/m^3
For I = 0 To 1,500 <- Number of Each Individual Positions z
  Pollutants and Air Pollution Emissions. <- Gases_Emission_Rate
  Calculate the severity of the fluctuation of pollutants (r^2).
  Calculate the Concentration of Pollutant at Positions x, z and H.
  If (Calculation of Pollutant's Concentration is Complete)
    Next Positions z
  End If
End For

Variable	Description
Gases_Emission_Rate	Air pollution emission rate of $PM_{2.5}$

Figure 2 Algorithm1 Pollutant Flotation

วิธีการ Gaussian Plume Model วิธีการนี้คำนวณหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากปัจจัยความเร็วลม ระดับเสถียรภาพของบรรยากาศ ระยะความสูงของแหล่งกำเนิดและระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น (Yang *et al.*, 2020) กำหนดระยะทางในแนวแกน x เป็น 3 ระยะ คือ ระยะ 5 เมตร 10 เมตร และ 100 เมตร กำหนดระดับความเร็วลมเป็น 3 ระดับ คือ ระดับลมเบา ลักษณะควันลอยขึ้นตรง มีความเร็วลม 0.44 เมตรต่อวินาที ระดับลมปานกลาง ลักษณะฝุ่นฟุ้ง มีความเร็วลม 5.78 เมตรต่อวินาที และระดับลมแรง ลักษณะกิ่งไม้ใหญ่โยก มีความเร็วลม 11.11 เมตรต่อวินาที (Weather Forecast Office, n.d.) และใช้เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ B (Moderately Unstable) และระดับ D (Neutral) ซึ่งเป็นเสถียรภาพที่เลวร้ายที่สุดที่จะทำให้มลพิษทางอากาศสะสมปริมาณมากในแต่ละระดับความเร็วลมที่เลือกมาใช้ในวิธีการนี้ แสดงในสมการ (4) (5) (6) และ (7)

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\left[\exp\left(\frac{-(y)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \left\{\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]+\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (4)$$

$$\sigma_Y = 465.11628(x)\tan(TH) \quad (5)$$

$$TH = 0.017453293\,[c - d\ln(x)] \quad (6)$$

$$\sigma_z = ax^b \quad (7)$$

กำหนดให้:

C(x,y,z) คือ ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษ ณ ตำแหน่ง x, y และ z (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Q คือ อัตราการปล่อยสารมลพิษทางอากาศ (มิลลิกรัมต่อวินาที)

π คือ ค่าคงที่ 3.141

x คือ ระยะทางในแนวแกน x จากแหล่งกำเนิดของผู้ที่ได้รับผลกระทบในทิศทางใต้ลม (เมตร)

y คือ ระยะทางในแนวแกน y (เมตร) จากตำแหน่งที่ตั้งฉากกับแกน x

z คือ ระยะทางในแนวแกน z (เมตร) หรือระยะความสูงจากพื้นดินของผู้ที่ได้รับผลกระทบ

H คือ ความสูงของแหล่งกำเนิดสารมลพิษ (เมตร) กำหนดค่าเป็น 0 เมตรเนื่องจากเผาบนพื้นดิน

σ_Y คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน y (เมตร)

σ_Z คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายในแนวแกน z (เมตร)

TH คือ ค่าองศาที่ตั้งฉากกับแกน x มีหน่วยเป็นเรเดียน และ a, b, c, d คือ ค่าที่ได้จากการจัดรูปแบบตามระดับเสถียรภาพของบรรยากาศ โดยสอดคล้องกับความเร็วลม (เมตรต่อวินาที) และปริมาณการส่องแสงสว่างของแสงอาทิตย์ หรือปริมาณเมฆบนท้องฟ้า

จากสมการ (5) และ (6) σ_y คำนวณหาค่า TH โดยที่ระยะทางในแนวแกน x ที่ใช้มีหน่วยเป็นกิโลเมตร ที่ระดับลมเบา ความเร็วลม 0.44 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ B ค่า c มีค่าเท่ากับ 18.3330 และ d มีค่าเท่ากับ 1.8096 ที่ระดับลมปานกลาง ความเร็วลม 5.78 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ D ค่า c มีค่าเท่ากับ 8.333 และ d มีค่าเท่ากับ 0.72382 และระดับลมแรง ความเร็วลม 11.11 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ D ค่า c มีค่าเท่ากับ 8.333 และ d มีค่าเท่ากับ 0.72382 (U.S. Environmental Protection Agency, 1995)

จากสมการ (7) σ_z ระยะทางในแนวแกน x ที่ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นกิโลเมตรที่ระดับลมเบา ความเร็วลม 0.44 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ B ค่า a มีค่าเท่ากับ 90.673 และ b มีค่าเท่ากับ 0.93198 ที่ระดับลมปานกลาง ความเร็วลม 5.78 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ D ค่า a มีค่าเท่ากับ 34.459 และ b มีค่าเท่ากับ 0.86974 และระดับลมแรง ความเร็วลม 11.11 เมตรต่อวินาที เสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ D ค่า a มีค่าเท่ากับ 34.459 และ b มีค่าเท่ากับ 0.86974 (U.S. Environmental Protection Agency, 1995) สอดคล้องกับ Algorithm2 การฟุ้งกระจายของ $PM_{2.5}$ แสดงใน Figure 3

Algorithm2 Diffusion of $PM_{2.5}$

```
C(x,y,z,) <- Concentration of Pollution in mg/m3
For I = 1 To 1,500 <- Number of Each Individual Position z
    Pollutants and Air Pollution Emissions <- Gases_Emission_Rate
    Calculates the degree's perpendicular to the x-axis (TH).
    Calculate the y-axis diffusion coefficient (σy).
    Calculate the z-axis diffusion coefficient (σz).
    Calculate the Dispersion of Pollutants at Position x, z.
    If (Calculation of Pollutant's Concentration is Complete)
        Next Position z
    End If
End For
```

Variable	Description
Gases_Emission_Rate	Air pollution emission rate of $PM_{2.5}$

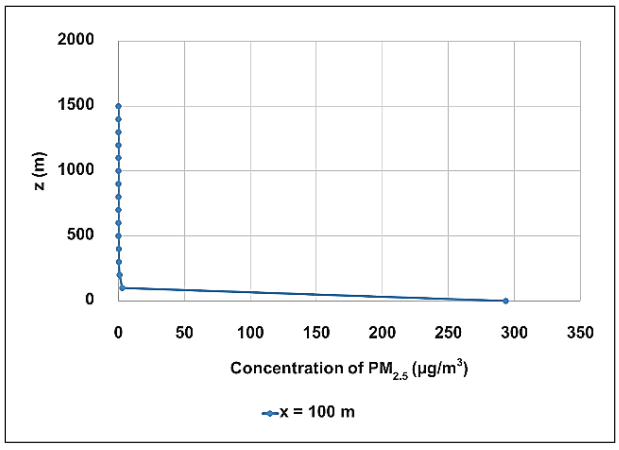
Figure 3 Algorithm2 Diffusion of $PM_{2.5}$

ส่วน 3 ผลลัพธ์ของแบบจำลองระยะทางการฟุ้งกระจาย แสดงในรูปแบบของตารางและกราฟ วิธีการ NRC Model คำนวณปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดจะมีความเข้มข้นสูงสุด และที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้นจากพื้นดินจะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในระยะทางตามแนวแกน x ส่วน σ_u, σ_v และ σ_w เป็นค่าคงที่ และวิธีการ Gaussian Plume Model ปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดจะมีความเข้มข้นสูงสุด และที่ระดับความสูงเพิ่มขึ้นจากพื้นดินจะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในระยะทางตามแนวแกน x ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงตามความเร็วลม และระดับเสถียรภาพของบรรยากาศที่เปลี่ยนไป ผลจากการคำนวณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ทั้ง 2 วิธีการจะนำมาเปลี่ยนหน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

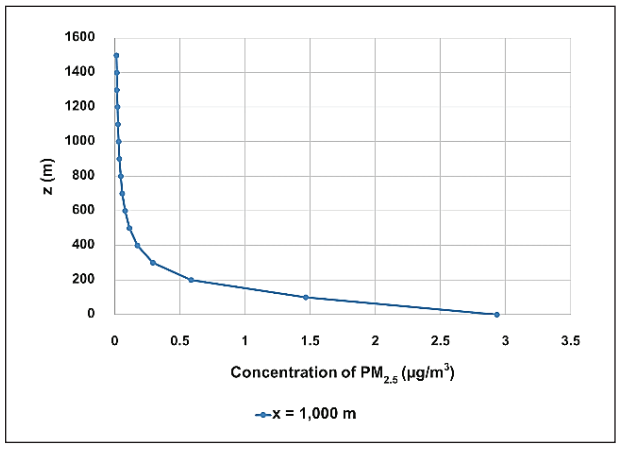
ผลการศึกษา

จากผลการวิจัยสร้างแบบจำลองระยะทางในการฟุ้งกระจายและความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ที่เกิดจากการเผาชีวมวล โดยคำนวณหาอัตราการปล่อยสารมลพิษของ $PM_{2.5}$ ในอากาศ จากสมการ (1) คำนวณ $EF_{PM_{2.5}}$ เท่ากับ 8.5 กรัมต่อกิโลกรัม$_{มวลแห้ง}$ และ M เท่ากับ 650 กิโลกรัมต่อไร่ คำนวณหาค่า $Q_{PM_{2.5}}$ ได้เท่ากับ 5,525 กรัมต่อไร่ แต่ด้วยอัตราการเผาไหม้ที่นำมาคำนวณเท่ากับ 1 เฮกตาร์ต่อวัน (6.25 ไร่ต่อวัน) (Prato & Huertas, 2019) หรือเท่ากับ 13,824 วินาทีต่อไร่ จึงดำเนินการเปลี่ยนหน่วยได้ผลลัพธ์เท่ากับ 399.667 มิลลิกรัมต่อวินาที เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณสมการ (2) และ (4) ต่อไป ในส่วนของการพยากรณ์ปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ฟุ้งกระจายในอากาศจะใช้วิธีการ NRC Model จากสมการ (2) และ (3) เป็นวิธีการคำนวณที่ความเร็วลมคงที่เพื่อดูแนวทางการลอยตัวของ $PM_{2.5}$ ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 100 เมตร และ

1,000 เมตร โดยเริ่มที่ระดับพื้นดิน และลอยตัวเพิ่มความสูงช่วงละ 100 เมตรจากพื้นดินจนถึงระยะความสูง 1,500 เมตร เหนือพื้นดิน ผลลัพธ์แสดงใน Figure 4 และ Table 1



(A)



(B)

Figure 4 $PM_{2.5}$ results from the NRC Model where the x-axis distance is (A) 100 meters and (B) 1,000 meters

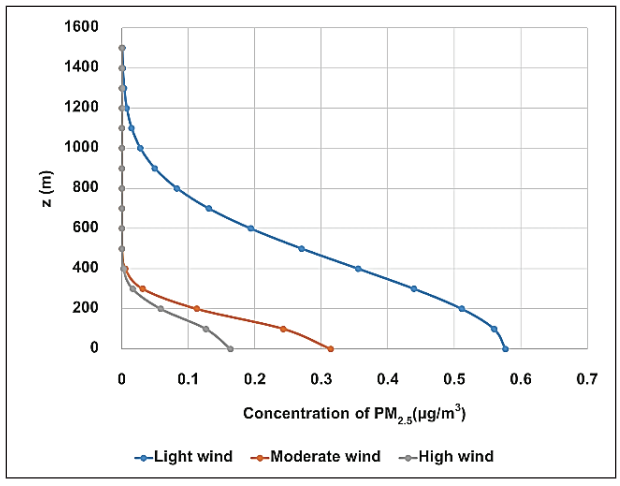
Table 1 Concentration of $PM_{2.5}$ from the NRC Model where the x-axis distance is (A) 100 meters and (B) 1,000 meters

x = 100 m			x = 1,000 m		
Concentration of $PM_{2.5}$ (µg/m^3)	z (m)	r^2	Concentration of $PM_{2.5}$ (µg/m^3)	z (m)	r^2
293.4762839	0	10000	2.934762839	0	1000000
2.905705781	100	1010000	1.467381419	100	2000000
0.731861057	200	4010000	0.586952568	200	5000000
0.325722846	300	9010000	0.293476284	300	10000000
0.18330811	400	16010000	0.172633108	400	17000000
0.117343576	500	25010000	0.112875494	500	26000000
0.081498551	600	36010000	0.079317915	600	37000000
0.059880899	700	49010000	0.058695257	700	50000000
0.045848506	800	64010000	0.045150198	800	65000000
0.036227167	900	81010000	0.035789791	900	82000000
0.029344694	1000	100010000	0.029057058	1000	101000000
0.024252234	1100	121010000	0.024055433	1100	122000000
0.020378882	1200	144010000	0.020239744	1200	145000000
0.017364433	1300	169010000	0.017263311	1300	170000000
0.014972516	1400	196010000	0.014897273	1400	197000000
0.013042811	1500	225010000	0.012985676	1500	226000000

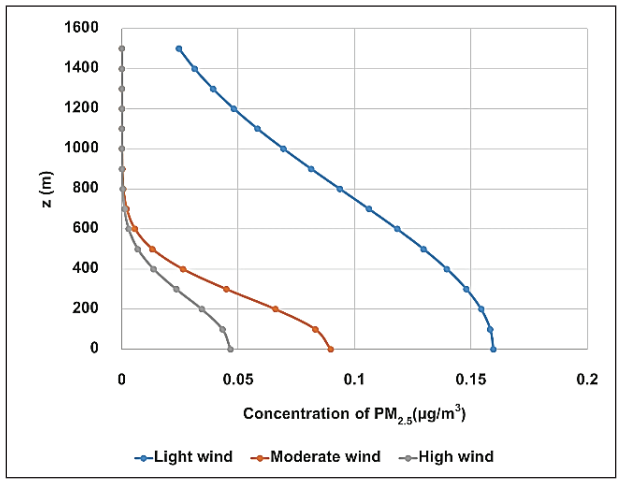
จาก Figure 4 แสดงกราฟที่เป็นผลลัพธ์ด้วยวิธีการ NRC Model ของ $PM_{2.5}$ พบว่า จากแหล่งกำเนิดการเผาชีวมวลที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 100 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 293.48 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.0130 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 1,000 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2.93 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุด

การคำนวณมีความเข้มข้น 0.0130 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จาก Table 1 แสดงค่าความเข้มข้นที่ลดลงตามระดับความสูงกับทุกระยะทางในแนวแกน x ค่าความเข้มข้นสูงสุด 293.4763 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความเข้มข้นต่ำสุด 0.0130 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในเสถียรภาพของบรรยากาศที่เลวร้ายที่สุดที่ส่งผลต่อผู้ที่ได้รับผลกระทบและนำมาแสดงผลลัพธ์ดัง Figure 4 และวิธีการ Gaussian Plume Model จากสมการ(4)-(7) เป็นวิธีการคำนวณที่ความเร็วลม 0.44 เมตรต่อวินาที 5.78 เมตรต่อวินาที และ 11.11 เมตรต่อวินาที ในเสถียรภาพของบรรยากาศที่เลวร้ายที่สุดที่จะทำให้มลพิษทางอากาศสะสมปริมาณมาก เพื่อดูแนวทางการลอยตัวของ $PM_{2.5}$ ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 5 เมตร 10 เมตร และ 100 เมตร โดยเริ่มที่ระดับพื้นดิน และลอยตัวเพิ่มความสูงช่วงละ 100 เมตรจากพื้นดินจนถึงระยะความสูง 1,500 เมตรเหนือพื้นดินผลลัพธ์แสดงดัง Figure 5 และ Table 2

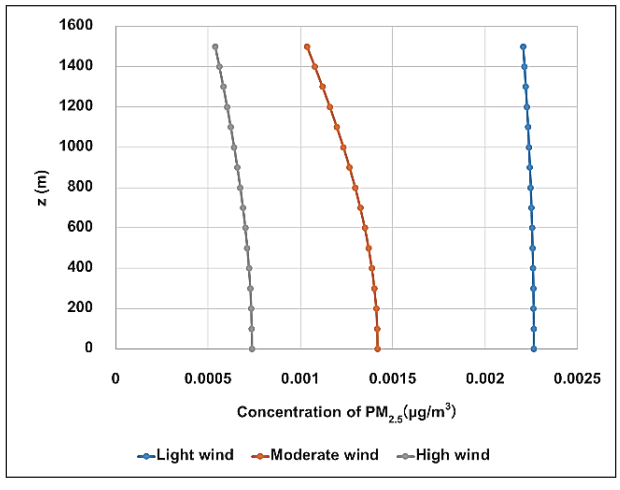
จาก Figure 5 แสดงกราฟที่เป็นผลลัพธ์ด้วยวิธีการ Gaussian Plume Model ของ $PM_{2.5}$ พบว่า จากแหล่งกำเนิดการเผาชีวมวลที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 5 เมตร ระดับลมเบามีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.577 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูงเมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.0006 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมปานกลางมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.31 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 2.9206×10^{-26} ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมแรงมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.16 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 1.5195×10^{-26} ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 10 เมตร ระดับลมเบามีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.16 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.02 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมปานกลางมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.09 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 2.86148×10^{-9} ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมแรงมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 1.48869×10^{-9} ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 100 เมตร ระดับลมเบามีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0023 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.0022 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมปานกลางมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0014 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.0010 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



(A)



(B)



(C)

Figure 5 $PM_{2.5}$ results from the Gaussian Plume Model where the x-axis distance is (A) 5 meters (B) 10 meters and (C) 100 meters and conditions light wind, moderate wind and high wind

Table 2 Example for concentration of $PM_{2.5}$ from the Gaussian Plume Model where the x-axis distance is 5 meters

Light wind		Moderate wind		High wind	
Concentration of $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	z (m)	Concentration of $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	z (m)	Concentration of $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	z (m)
0.57711128	0	0.31404557	0	0.163382846	0
0.55989804	100	0.24307567	100	0.126460611	100
0.51127798	200	0.11271662	200	0.058641049	200
0.43944445	300	0.03131353	300	0.016290928	300
0.35550822	400	0.00521163	400	0.002711362	400
0.27070363	500	0.00051965	500	0.00027035	500
0.19401587	600	$3.1042x10^{-5}$	600	$1.61497x10^{-5}$	600
0.13088178	700	$1.1109x10^{-6}$	700	$5.77961x10^{-7}$	700
0.08310361	800	$2.3819x10^{-8}$	800	$1.23917x10^{-8}$	800
0.04966602	900	$3.0595x10^{-10}$	900	$1.5917x10^{-10}$	900
0.02793815	1000	$2.3544x10^{-12}$	1000	$1.22487x10^{-12}$	1000
0.01479226	1100	$1.0854x10^{-14}$	1100	$5.64694x10^{-15}$	1100
0.00737175	1200	$2.9979x10^{-17}$	1200	$1.55968x10^{-17}$	1200
0.00345784	1300	$4.9607x10^{-20}$	1300	$2.58081x10^{-20}$	1300
0.00152665	1400	$4.9177x10^{-23}$	1400	$2.55844x10^{-23}$	1400
0.00063441	1500	$2.9206x10^{-26}$	1500	$1.51946x10^{-26}$	1500

ระดับลมแรงมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0007 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง เมื่อสิ้นสุดการคำนวณมีความเข้มข้น 0.0005 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จาก Table 2 แสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นที่ลดลงตามระดับความสูงกับทุกระยะทางในแนวแกน x ค่าความเข้มข้นสูงสุด 0.577 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความเข้มข้นต่ำสุด $1.51946x10^{-26}$ ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในเสถียรภาพของบรรยากาศที่เลวร้ายที่สุดที่ส่งผลต่อผู้ที่ได้รับผลกระทบ และนำมาแสดงผลลัพธ์ดัง Figure 5

สรุปผล

การคำนวณหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ เกิดจากการเผาชีวมวล ใช้ 2 วิธีการ คือ วิธีการ NRC Model และวิธีการ Gaussian Plume Model โดยใช้อัตราการปล่อยสารมลพิษของ $PM_{2.5}$ ในอากาศเป็นค่าเดียวกัน คือ 399.667 มิลลิกรัมต่อวินาที และที่ระยะความสูง 600 เมตรเหนือพื้นดิน เป็นระยะความสูงที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด ซึ่งวิธีการ NRC Model เป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับการมีลมเบาคงที่ และทุกระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นจากพื้นดินช่วงละ 100 เมตรจากพื้นดินจนถึงระยะความสูง 1,500 เมตรเหนือพื้นดิน ที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 100 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 293.48 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 1,000 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 2.93 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าลดลงตามระดับความสูง แต่เมื่อมีความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะใช้วิธีการ Gaussian Plume Model คำนวณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่ความเร็วลมระดับลมเบาเสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ B ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 5 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.577 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะ 10 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.16 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่ระยะ 100 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0023 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่ความเร็วลมระดับลมปานกลาง ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 5 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.31 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะ 10 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.09 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่ระยะ 100 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0014 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ระดับลมแรงเสถียรภาพของบรรยากาศ ระดับ D ระยะทางในแนวแกน x เท่ากับ 5 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.16 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ระยะ 10 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และที่ระยะ 100 เมตร มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.0007 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเสถียรภาพของบรรยากาศทั้ง 2 ระดับเป็นรูปแบบที่เลวร้ายที่สุดที่จะทำให้มลพิษทางอากาศสะสมปริมาณมากในแต่ละระดับความเร็วลมที่เลือก และที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นจากพื้นดินช่วงละ 100 เมตรจาก

พื้นดินจนถึงระยะความสูง 1,500 เมตรเหนือพื้นดิน โดยปริมาณความเข้มข้นลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในทุกระยะทางในแนวแกน x และทุกระดับของความเร็วลม

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยนี้พบว่า การคำนวณหาความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ เกิดจากการเผาชีวมวล ด้วยวิธีการ NRC Model และวิธีการ Gaussian Plume Model คำนวณหาระยะทางการฟุ้งกระจายในแนวดิ่งจากระดับพื้นดินสูงขึ้นไปในอากาศ โดยปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ในทุกระยะทางในแนวแกน x และทุกระดับของความเร็วลม ผู้วิจัยจึงเห็นควรว่าเพื่อให้ได้ทราบปริมาณความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่จะเกิดขึ้นในแนวราบที่ระยะทางที่แตกต่างกันโดยสร้างสมการคณิตศาสตร์ และพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ขึ้นมาวัดระยะทางในการแพร่กระจายและพยากรณ์ผลกระทบของ $PM_{2.5}$ ที่จะส่งผลไปยังปัจจัยแวดล้อมอื่นของบริเวณที่มีการเผาไหม้พื้นที่ทางการเกษตรของจังหวัดนครสวรรค์ รวมถึงวิเคราะห์จุดแข็งจุดอ่อน เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น เพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กนก พิพัฒน์เวช และศิริพร อุปจักร. (2564). ความสัมพันธ์ระหว่างการสัมผัสฝุ่นละออง PM2.5 กับอาการกำเริบของผู้ป่วยโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง ในโรงพยาบาลน่าน. *วารสารวิชาการสาธารณสุข, 30*(4), 645-653.

ธีรวัฒน์ น้ำคำ และเริงชัย ตันสุชาติ. (2564). ผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 ต่อจำนวนนักท่องเที่ยวต่างชาติในจังหวัดเชียงใหม่และกรุงเทพมหานคร. *วารสารวิจัยราชภัฏเชียงใหม่*, *22*(3), 19-35.

ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. (2563). *ฝุ่น PM 2.5 กระทบเศรษฐกิจเท่าไหร่?*. https://kasikornresearch.com/th/analysis/k-social-media/Pages/FB-M25-23-01-20.aspx.

สำนักงานจังหวัดนครสวรรค์. (2564). *ข้อมูลสำคัญจังหวัดนครสวรรค์ประจำปี2564*. http://www.nakhonsawan.go.th/joomla/attachments/article/3849

สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเลย. (2562). *เกล็ดความรู้ PM 2.5*. http://www.mnre.go.th/loei/th/news/detail/30220.

ส่วนแผนงาน สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. (2563). *สรุปข้อมูลรายปีสถานีตรวจวัดถาวรต่างจังหวัด.* http://air4thai.pcd.go.th/webV2/download.php.

Abdel- Rahman, A.A. (2008). On the atmospheric dispersion and gaussian plume model. *Proceedings of The 2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (Wwai'08)* (pp. 31-39). Greece.

Alemayehu, D. & Hackett, F. (2015). Dispersion of particulate matters (pm2.5) and sulfur dioxide (SO2) concentrations on tribal and, Oklahoma. *American Journal of Environmental Sciences*, *11*(6), 440-449. https://doi.org/10.3844/ajessp.2015.440.449

Cuculeanu, V., Lupu, A., Georgiana, G., Popescu, I. & Toma, A. (2019a). Dispersion model for low wind and atmospheric calm - part I: description. *Romanian Reports in Physics, 71,* 1-9.

Cuculeanu, V., Lupu, A., Georgiana, G., Popescu, I. & Toma, A. (2019b). Dispersion model for low wind and atmospheric calm - part II: evaluation experiment at a nuclear power plant in Romania. *Romanian Reports in Physics, 71*(4), 1-15.

Lotrecchiano, N., Sofia, D., Giuliano, A, Barletta, D. & Poletto, M. (2020). Pollution dispersion from a fire using a gaussian plume model. *International Journal of Safety and Security Engineering*, *10*(4), 431-439.

Pandey, G. & Sharan, M. (2019). Accountability of wind variability in AERMOD for computing concentrations in low wind conditions. *Atmospheric Environment, 202*, 105-116.

Prato, F.D. & Huertas, I.J.. (2019). Determination of the area affected by agricultural burning. *Atmosphere, 10*(6), 1-14.

U.S. Environmental Protection Agency. (1995). *User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models volume ii description of model algorithms.* United States Environmental Protection Agency.

Weather Forecast Office. (n.d.). *Beaufort wind scale*. https://www.weather.gov/mfl/beaufort.

Yang, Z., Yao, Q., Buser, D.M., Alfieri, G.J., Li, H., Torrents, A., McConnell, L.L., Downey, M.P. & Hapeman, J.C. (2020). Modification and validation of the Gaussian plume model (GPM) to predict ammonia and particulate matter dispersion. *Atmospheric Pollution Research, 11*(7), 1063-1072.