



ปริมาณความเข้มข้นและสัณฐานวิทยาของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อยและเขตเทศบาลนครพิษณุโลก

กัญญาณัฐ นาจาน และ กณิตา ธนเจริญชนภาส*

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก 65000

*Corresponding author: kanitat@nu.ac.th

(Received: October 28, 2025; Revised: February 4, 2026; Accepted: March 9, 2026)

บทคัดย่อ

ปัญหาฝุ่นละออง PM2.5 ในจังหวัดพิษณุโลกมีแนวโน้มรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาความเข้มข้น สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบธาตุของ PM2.5 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่า (อุทยานแห่งชาติแควน้อย) และพื้นที่เมือง (เทศบาลนครพิษณุโลก) ซึ่งจะช่วยทำให้เข้าใจลักษณะเฉพาะของมลพิษในแต่ละบริบทพื้นที่ได้ชัดเจนขึ้น ในการศึกษาทำการเก็บตัวอย่าง PM2.5 ดำเนินการด้วยวิธีการวิเมตริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมงต่อหนึ่งรอบการเก็บตัวอย่าง ในปี พ.ศ. 2568 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ฤดูกาล คือฤดูแล้ง (ระหว่างเดือน มีนาคม ถึง เดือนเมษายน 2567) และฤดูฝน (ระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนมิถุนายน 2567) ผลการศึกษาพบว่า ในฤดูแล้งระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM2.5 สูงเกินค่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ (ไม่เกิน $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ในช่วง 24 ชั่วโมง) ทั้ง 2 พื้นที่ ($51.23 \pm 13.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ $46.33 \pm 10.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในฤดูฝนพบว่าพื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อยมีระดับค่าเฉลี่ยค่อนข้างต่ำและไม่เกินระดับมาตรฐานดังกล่าว (เท่ากับ $22.23 \pm 5.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) เมื่อเปรียบเทียบกับฤดูแล้ง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ในแต่ละฤดูกาลพบว่าในฤดูฝนนั้นระดับ PM2.5 ในเขตป่า มีระดับต่ำกว่าเขตเมืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < .05$) เมื่อได้ทำการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) และ วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยใช้รังสีเอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDS) พบลักษณะอนุภาคเด่น 9 ประเภท ได้แก่ (1) รูปร่างแท่งยาว (2) รูปร่างเป็นก้อนปุย (3) รูปร่างผลึกผิวไม่สม่ำเสมอซ้อนกัน (4) ทรงกลมสมมาตร (5) รูปร่างทรงกลมที่ไม่สมมาตร มีขอบเรียบ (6) รูปร่างเป็นเกลียวซ้อนกัน (7) รูปร่างแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาวซ้อนบนรูปร่างไม่แน่นอนและทรงกลม (8) รูปร่างไม่สม่ำเสมอรวมตัวเป็นก้อน และ (9) รูปร่างแท่งยาวเรียว การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุแสดงให้เห็นว่า ธาตุที่พบในสัดส่วนสูงสุด 2 ลำดับแรกมีลักษณะเหมือนกันทั้งสองพื้นที่และสองฤดูกาลโดยพบ คาร์บอน (C) และ ออกซิเจน (O) ลำดับถัดไปจะพบ Si N S และ ไนโตรเจน (N) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ถึงแหล่งกำเนิดอนุภาคที่สำคัญ ได้แก่ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงจากยานพาหนะ การเผาไหม้ชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์ สารชีวภาพ เช่น การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิล

การเผาชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์ การเผาไหม้ความร้อนสูง เศษซากชีวมวล ไร่ฟืน เกสรดอกไม้ รวมถึงฝุ่นดิน และการสึกกร่อนของชิ้นส่วนโลหะหรือสนิม การฟุ้งกระจายของปุ๋ยเคมีจากแหล่งเกษตรกรรม โดยสรุป เมื่อพิจารณาทั้งระดับความเข้มข้น ลักษณะสัญญาณ และชนิดของธาตุในภาพรวม พบว่าอนุภาค PM_{2.5} ในพื้นที่ศึกษาได้รับอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ฤดูกาลและทั้ง 2 พื้นที่ จึงควรดำเนินการจัดการแหล่งกำเนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูแล้ง และควรพิจารณาดำเนินการในเขตเมืองเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีระดับ PM_{2.5} สูงเกินค่ามาตรฐานทั้ง 2 ฤดูกาล เพื่อป้องกันและลดความเสี่ยงจากการสัมผัสอนุภาคฝุ่นละอองของประชาชนในเขตจังหวัดพิษณุโลก

คำสำคัญ: เทศบาลนครพิษณุโลก; สัญญาณของอนุภาค; อนุภาคขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน; อุทยานแห่งชาติแควน้อย

Concentration and morphology of particulate matter less than 2.5 microns in diameter (PM2.5) in the area of Kwai Noi National Park and Phitsanulok Municipality

Kanyanat Najan and Kanita Thanacharoenchanaphas*

Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok 65000

*Corresponding author: kanitat@nu.ac.th

(Received: October 28, 2025; Revised: February 4, 2026; Accepted: March 9, 2026)

Abstract

Due to the escalating severity of PM2.5 pollution in Phitsanulok Province, this study investigates the concentration, morphology, and elemental composition of fine particulates. The research compares a forest area (Kwai Noi National Park) and an urban area (Phitsanulok Municipality) to characterize the distinct pollution profiles between these two environments. In this study, PM2.5 samples were collected using the gravimetric method with a 24-hour sampling duration. The sampling campaign was conducted in 2024, spanning two distinct seasons: the dry season (March–April) and the rainy (wet) season (May–June). The results revealed that, during the dry season, the average concentrations of PM2.5 in both study areas exceeded the National Ambient Air Quality Standard set by the Pollution Control Department of Thailand ($37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per 24 hours), with mean values of $51.23 \pm 13.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $46.33 \pm 10.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In contrast, during the wet season, the concentration at Khae Noi National Park was considerably lower ($22.23 \pm 5.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and did not exceed the standard limit. Furthermore, when comparing the two sites within each season, it was found that during the wet season, the PM2.5 concentration in the forest area was significantly lower than that in the urban area ($P < .05$). Morphological analysis using a Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and for elemental composition using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The findings revealed the identified nine dominant particle types: (1) elongated cylindrical (rod-shaped) forms, (2) fluffy aggregates, (3) irregularly layered crystal

structures with uneven surfaces, (4) symmetric spherical particles, (5) asymmetric spherical particles with smooth edges, (6) coiled structures, (7) elongated rectangular rods associated with irregular and spherical shapes, (8) irregular aggregated particles, and (9) elongated tapered rods. Elemental composition analysis indicated that carbon (C) and oxygen (O) were the predominant elements across both sites and seasons, followed by silicon (Si), nitrogen (N), and sulfur (S). These compositions suggest that the major sources of PM_{2.5} include incomplete combustion of fossil fuels and biomass, biological residues, soil dust, pollen, metal abrasion, and dispersion of chemical fertilizers from agricultural activities. Overall, the study concludes that PM_{2.5} in Phitsanulok is influenced by various emission sources across both seasons and locations. Effective emission control measures, particularly during the dry season and in urban areas, are essential to reduce PM_{2.5} levels and mitigate health risks for local residents.

Keywords: Particle morphology; Particulate matter less than 2.5; Kwai Noi National Park; Phitsanulok Municipality

บทนำ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่ทวีความรุนแรงทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งยังขาดมาตรการจัดการคุณภาพอากาศที่มีประสิทธิภาพ รายงานของ (Lim et al., 2020) ระบุว่า ความเข้มข้นของ PM2.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงเหนือของจีน รวมถึงบางพื้นที่ของแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชีย ขณะที่หลายประเทศในยุโรป ตะวันตกและสหรัฐอเมริกา มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง

ประเทศไทยในฐานะประเทศกำลังพัฒนา ยังคงเผชิญปัญหามลพิษจาก PM2.5 อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในฤดูแล้งที่เกิดการเผาในที่โล่งและไฟป่าจำนวนมาก ข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2566) พบว่ามีจุดความร้อนทั่วประเทศกว่า 700 จุด ส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ป่าและเกษตรกรรม สอดคล้องกับแนวโน้มค่าความเข้มข้น PM2.5 ในช่วงปี พ.ศ. 2561–2567 ที่มีค่าเฉลี่ยรายปี 20–25 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งยังเกินมาตรฐานรายปีที่กำหนดไว้ไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2568)

พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดพิษณุโลก เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจาก PM2.5 อย่างต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะ ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในฤดูหนาว และการเผาในที่โล่ง รวมถึงผลกระทบจากฝุ่นควันข้ามพรมแดนจากประเทศเพื่อนบ้าน ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ภาคเหนือเป็นพื้นที่เสี่ยงสูงต่อผลกระทบทางสุขภาพจากการสัมผัสฝุ่น PM2.5 ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่า สถานการณ์ไฟป่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในบรรยากาศอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความรุนแรงและความถี่ของไฟป่าได้เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มลพิษ PM2.5 แพร่กระจายไปกว้างและสามารถถูกพัดพาข้ามทวีป เช่น จากทวีปอเมริกาเหนือผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือไปยังทวีปยุโรปและเอเชีย (Zhang et al., 2023) สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของไฟป่าต่อคุณภาพอากาศในระดับภูมิภาคและระดับโลก สำหรับประเทศไทย แม้ว่าสถานการณ์ฝุ่นควันข้ามพรมแดนจากประเทศเพื่อนบ้านในภูมิภาคเอเชียยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญ แต่ข้อมูลในปี พ.ศ. 2567 พบว่าสถานการณ์ฝุ่นละอองในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2566 โดยจำนวนจุดความร้อนสะสมลดลงเหลือ 79,859 จุด จากเดิมที่พบ 109,035 จุดในปีก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม พื้นที่เผาไหม้รวมกลับเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.83 จากปีก่อนหน้า คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 10.24 ล้านไร่ โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติและพื้นที่ป่าอนุรักษ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2567) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการลดลงของจำนวนจุดความร้อนไม่ได้สะท้อนถึงการลดลงของพื้นที่เผาไหม้โดยรวมเสมอไป นอกจากแหล่งกำเนิดจาก การเผาชีวมวล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในพื้นที่ชนบทและเขตป่าแล้ว ยังมีแหล่งกำเนิดมลพิษ PM2.5 ที่สำคัญในเขตเมือง ได้แก่ การจราจรยานยนต์ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง การก่อสร้าง การฟุ้งกระจายของฝุ่นดิน ฝุ่นทราย ฝุ่นแร่ รวมถึงละอองเกลือทะเล ที่ถูกพัดเข้าสู่เขตเมืองจากปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา นอกจากนี้ ยังพบว่า ละอองลอยทุติยภูมิ (secondary aerosols) ซึ่งเกิดจากกระบวนการทางเคมีในบรรยากาศ มีส่วนสำคัญในการเพิ่มระดับความเข้มข้นของ PM2.5 ในเขตเมือง

โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของการจราจรสูง (Anwar et al., 2024) ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดหลักของมลพิษ PM2.5 ในเขตเมืองของประเทศไทย

ดังที่กล่าวถึงในเบื้องต้นว่าแหล่งกำเนิด PM2.5 มีที่มาหลากหลาย ดังนั้นการศึกษาลักษณะสัณฐาน (morphology) และองค์ประกอบธาตุ (elemental composition) ของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจแหล่งกำเนิด (source identification) และกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคในบรรยากาศ เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของอนุภาคมีผลโดยตรงต่อการแพร่กระจาย ความเป็นพิษ และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Li et al., 2016; Pöschl, 2005) ลักษณะสัณฐาน เช่น รูปร่าง ขนาด และพื้นผิวของอนุภาค สามารถบ่งชี้ถึงกระบวนการเกิด เช่น การเผาไหม้ การเกิดทุติยภูมิในบรรยากาศ หรือการสึกกร่อนของฝุ่นดิน (Li et al., 2010) ขณะที่องค์ประกอบธาตุ เช่น C, O, S, N, Si, Fe และ K ช่วยในการระบุแหล่งกำเนิดที่เฉพาะเจาะจง เช่น การเผาไหม้ชีวมวล (biomass burning) การปล่อยจากยานยนต์ หรือแหล่งอุตสาหกรรม (Viana et al., 2008; Zhang et al., 2019) ดังนั้นการวิเคราะห์สัณฐานและองค์ประกอบธาตุของ PM 2.5 จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม การกำหนดนโยบายควบคุมมลพิษ และการพัฒนามาตรการลดการปล่อยฝุ่นละอองอย่างมีประสิทธิภาพ

จังหวัดพิษณุโลกมีพื้นที่ป่าคิดเป็นประมาณร้อยละ 38 ของพื้นที่ทั้งหมดของจังหวัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคงอยู่ของทรัพยากรธรรมชาติในระดับที่สำคัญต่อสมดุลระบบนิเวศของพื้นที่ (สำนักงานเกษตรจังหวัดพิษณุโลก, 2566) ขณะเดียวกัน ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา จังหวัดพิษณุโลกมีการขยายตัวของเขตเมืองอย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมของจังหวัด ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของประชากรในเขตเมืองและการพัฒนาด้านโครงสร้างพื้นฐานที่ตามมา จากข้อมูลของกรมการขนส่งทางบก (กรมขนส่งทางบก, 2566) พบว่า จำนวนรถยนต์และรถจักรยานยนต์จดทะเบียนสะสมในจังหวัดพิษณุโลก ระหว่างปี พ.ศ. 2562–2566 มีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.77 หรือประมาณ 0.93 ล้านคันต่อปี ซึ่งส่งผลต่อความรุนแรงของปัญหาฝุ่น PM 2.5 สถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ในปัจจุบันมีความน่ากังวลอย่างยิ่ง โดยมีแหล่งกำเนิดสำคัญมาจากยานพาหนะ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ เบญจพร และคณะ (2567) ที่สำรวจบริเวณริมถนนสายหลัก 9 พื้นที่ในเขตเทศบาลนครพิษณุโลก ซึ่งพบว่ามีถึง 5 พื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 24 ชั่วโมงสูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ 1.ถนนวังจันทร์ ($68.94 \pm 7.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 2. ถนนไชยา นุกาพ ($78.76 \pm 12.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 3. ถนนสามแยกบึงพระจันทร์ ($53.11 \pm 31.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 4. ถนนพุทธบูชา ($44.80 \pm 8.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 5. ถนนศรีสุริโยทัย ($37.63 \pm 1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) สะท้อนให้เห็นถึงการขยายตัวของภาคการคมนาคมและการเคลื่อนไหวทางเศรษฐกิจภายในจังหวัด การเพิ่มขึ้นของจำนวนยานพาหนะดังกล่าวถือเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีศักยภาพในการเพิ่มระดับมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) นอกจากนี้ การศึกษาหลายฉบับรายงานว่าความเข้มข้นของ PM2.5 ในจังหวัดพิษณุโลกมักเกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งและช่วงเกิดสถานการณ์ไฟป่า ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเผาในที่โล่งและไฟป่าเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะของกิจกรรมทางเศรษฐกิจและการ

ขยายตัวของเขตเมืองที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นปัจจัยร่วมที่ควรได้รับการศึกษาวิเคราะห์ เพื่อทำความเข้าใจพลวัตของสถานการณ์มลพิษทางอากาศจากฝุ่น PM_{2.5} ทั้งในเขตเมืองและเขตพื้นที่ป่านุรักษ์ของจังหวัดพิษณุโลกอย่างครอบคลุมอันจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการจัดการและวางแผนเชิงนโยบายด้านคุณภาพอากาศของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในอนาคต

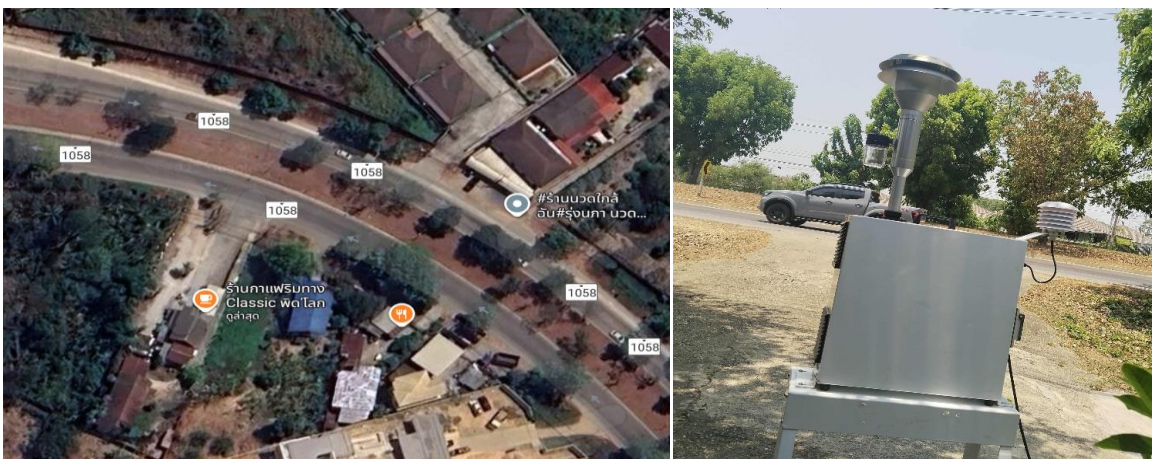
อุปกรณ์และวิธีการ

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับการวิจัยนี้ กำหนดประเภทการใช้ที่ดินทั้งหมด 2 พื้นที่ ได้แก่ (Figure 1)



(a)



(b)

Figure 2. The two selected study areas within Phitsanulok Province

(a) The study area located within Kwai Noi National Park

(b) Roadside sampling sites along Boromtrailokkanat Road

1.1 อุทยานแห่งชาติแควน้อย (พื้นที่ป่า) (พิกัด 17.17630 , 100.39768)

ภูมิอากาศของพื้นที่โดยเฉลี่ยคือ มีระดับอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 32.2 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 27.5 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,482 มิลลิเมตร/ปี โดยมีพื้นที่ทั้งหมด 123,229.12 ไร่ ตั้ง ถนนทางหลวงหมายเลข 1296 ต.คันไช้ อ.วัดโบสถ์ จ.พิษณุโลก (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2568). มีระยะห่างจากตัวเมือง (พื้นที่ศึกษาในเขตเทศบาลเมือง) เท่ากับ 79.2 กิโลเมตร (Figure 2)

1.2. พื้นที่เขตเมืองบริเวณริมถนนบรมไตรโลกนาถ (พิกัด 16.79964 , 100.22552)

เป็นพื้นที่ชุมชนที่มีความหนาแน่นของที่อยู่อาศัยสูง ตั้งอยู่ในเขตเทศบาลนครพิษณุโลก โดยอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 23.1 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,335.6 มิลลิเมตร/ปี (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2556)

พื้นที่ศึกษาทั้งสองแห่งกำหนดขึ้นภายใต้สมมติฐานว่า มีลักษณะแหล่งกำเนิดของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบของธาตุในอนุภาค

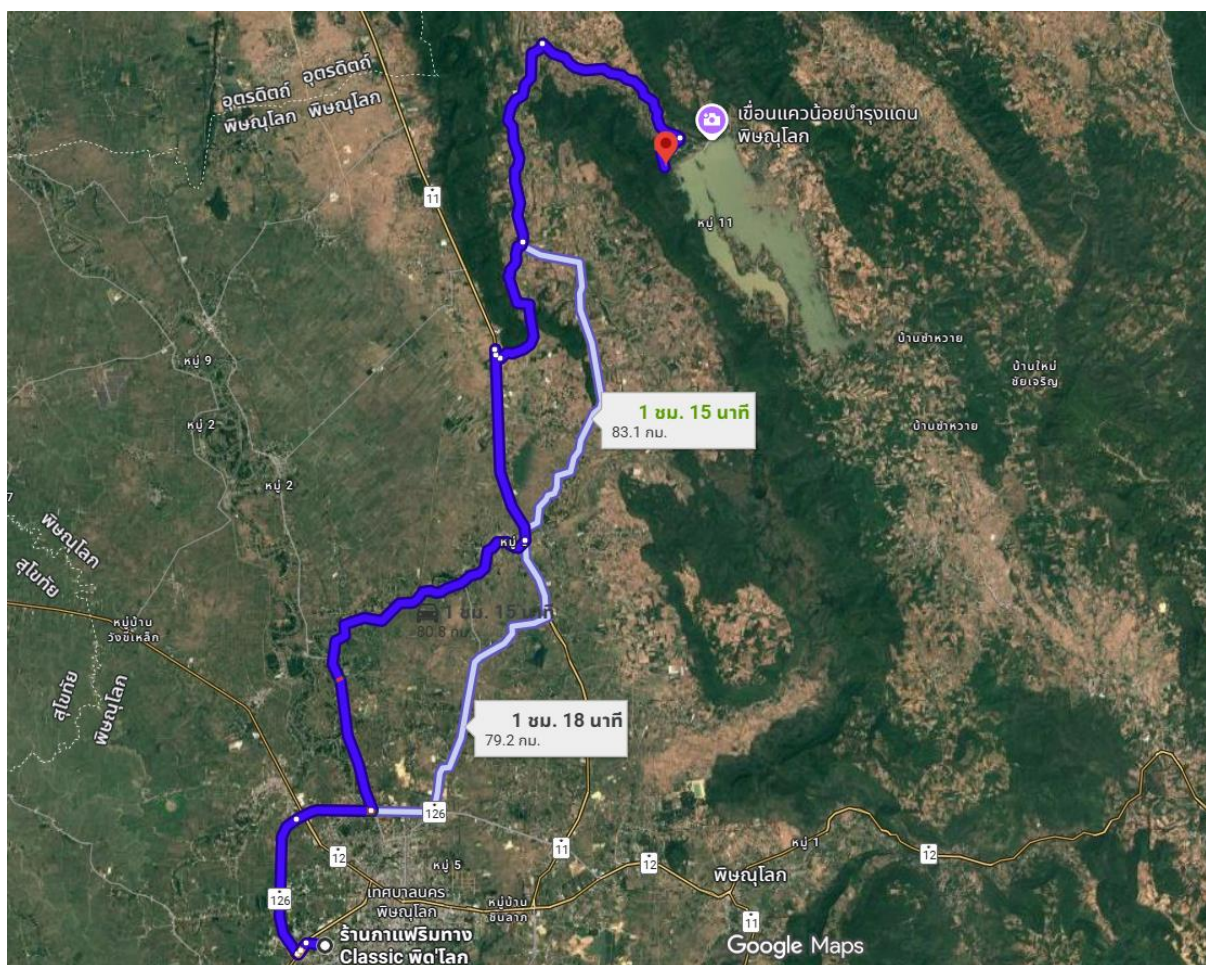


Figure 2. The separation distance between the two study areas

2. วิธีการเก็บและวิเคราะห์ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

2.1 ระยะเวลาดำเนินการเก็บข้อมูลฝุ่นละออง (PM2.5)

ในการศึกษาทำการเก็บตัวอย่าง PM2.5 ดำเนินการด้วยวิธีกราวิมेटริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อหนึ่งรอบการเก็บตัวอย่าง ในปี พ.ศ. 2567 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ฤดูกาลที่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือฤดูแล้ง คือช่วงระหว่างเดือน มีนาคม ถึง เดือนเมษายน 2567 และฤดูฝน (ระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึง เดือนมิถุนายน 2567 โดยเก็บตัวอย่างแต่ละพื้นที่ที่กำหนดจำนวน 3 ชั่วโมงต่อฤดูกาลในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบทางสถิติต่อไป (แสดงรายละเอียดใน Table 1)

Table 1. Show the fieldwork for sample collection

Areas		Dry Season	Wet Season
Kwai Noi National Park	1	21 March – 22 March	1 May – 2 May
	2	23 March – 24 March	3 May – 4 May
	3	9 April – 10 April	5 June – 6 June
Boromtrailokkanat Road	1	15 March - 16 March	8 May – 9 May
	2	16 March - 17 March	9 May – 10 May
	3	22 April- 23 April	12 June – 13 June

2.2 เครื่องมือสำหรับการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

เก็บตัวอย่างโดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5 Low-Volum) ยี่ห้อ Tisch Environmental รุ่น TE-WILBUR Low Volume PM2.5 and PM10 FRM Sampler โดยใช้กระดาศกรอง PM2.5 ชนิด PTFE (Polytetrafluoroethylene) ในการกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง เครื่องมือกำหนดการวางในบริเวณที่เปิดโล่ง ไม่มีสิ่งใดปกคลุม และไม่มีกำแพงด้านหลังเครื่องมือ เพื่อให้การเก็บฝุ่นละอองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับมาตรฐานวิธีการเก็บตัวอย่าง

2.3 ขั้นตอนและวิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

การเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) แต่ละตัวอย่างดำเนินการเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

กระดาศกรอง PM2.5 ชนิด PTFE (Polytetrafluoroethylene) ถูกนำเข้า ตู้อบดูความชื้น เป็นเวลา 72 ชั่วโมง (ประมาณ 3 วัน) ก่อนเริ่มการเก็บตัวอย่าง จากนั้นจึงนำกระดาศกรอง PM2.5 มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 5 ตำแหน่ง ชั่งซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง (เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่แม่นยำ) นำกระดาศกรองที่เตรียมแล้วใส่ในเครื่องเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5 Low-Volum) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากดำเนินการเก็บตัวอย่างครบเวลาจากนั้นนำกระดาศกรอง PM2.5 มาชั่งน้ำหนัก

ด้วยเครื่องซั่งน้ำหนักแบบละเอียด 5 ตำแหน่งและนำกระดาษกรองไปเข้าโถดูดความชื้นต่อเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือ ประมาณ 3 วัน เพื่อให้แน่ใจว่าการวัดน้ำหนักสุดท้ายสะท้อนมวลฝุ่นละอองจริง

3. การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5})

สมการที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) เป็นสมการที่ถูกประยุกต์มาจาก CENTRAL POLLUTION CONTROL BOARD Ministry of Environment & Forests. (2013). (2013) Guidelines for the Measurement of Ambient Air Pollutants Volume-I: National Ambient Air Quality Series: NAAQMS/36/2012-13, Published by P R Division, Central Pollution Control Board

$$M(PM\ 2.5) \text{ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)} = \frac{(M_f - M_i) \times 10^6}{V_{std}} \quad (1)$$

และ

$$V_{std} (m^3) = Q_{std} (m^3) \times t \text{ (min)} \quad (2)$$

โดยที่

$M(PM_{2.5})$ = ปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$M_{f(g)}$ = น้ำหนักกระดาษกรองหลังเก็บตัวอย่าง (กรัม)

$M_{i(g)}$ = น้ำหนักกระดาษกรองก่อนเก็บตัวอย่าง (กรัม)

10^6 = เป็นตัวคูณเพื่อปรับหน่วยกรัมเป็นไมโครกรัม

V_{std} = ปริมาตรของอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (ลูกบาศก์เมตร) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

Q_{std} = มีอัตราการไหลของอากาศ (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

t = เวลาในการเก็บตัวอย่าง (นาที) (เช่น 24 ชั่วโมง = 1,440 นาที)

4. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของฝุ่น PM_{2.5} และองค์ประกอบของธาตุในฝุ่น PM_{2.5}

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุของฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) ดำเนินการโดยใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) ร่วมกับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย การติดตัวอย่างบนแท่นด้วย เทปกาวยางปราศจากคาร์บอน ที่เคลือบทองเพื่อป้องกันการสะสมประจุไฟฟ้า (Charge accumulation) ทำให้ภาพชัดเจน หลังจากนั้นนำ



ตัวอย่างไป อบในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อทำการสแกนและวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุต่อไป

5. การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ T-test

การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ระหว่างสองฤดูกาลในแต่ละพื้นที่ศึกษา ดำเนินการโดยใช้ การทดสอบทางสถิติแบบ T-test สำหรับ ตัวอย่างอิสระระหว่าง 2 พื้นที่ และ 2 ฤดูกาล (Independent Two-Sample t-Test) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการทดลอง

ความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5)

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เปรียบเทียบระหว่าง สองพื้นที่ในสองฤดูกาล แสดงรายละเอียดในแต่ละพื้นที่ดังปรากฏใน Table 3 ผลการศึกษาดังกล่าวได้ทำ การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ PM2.5 อ้างอิงตามมาตรฐานของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ซึ่ง กำหนดว่าค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่ควรเกิน $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ พบว่า ระดับ PM2.5 ในฤดูแล้ง (Dry season) มีระดับความเข้มข้น PM2.5 เกินเกณฑ์มาตรฐาน 24 ชั่วโมง ทั้ง 2 พื้นที่ โดยระดับ PM2.5 ณ อุทยานแห่งชาติแควน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $51.23 \pm 13.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับพื้นที่ริมถนนบรมไตรโลกนารถ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $46.33 \pm 10.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเพื่อวิเคราะห์การแพร่กระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็ก Table 2 พบว่าระดับความเข้มข้นและข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา มีความสอดคล้องกัน เช่น ในฤดูแล้ง อุทยานแห่งชาติแคว น้อย มีระดับค่าเฉลี่ยเกินมาตรฐาน 24 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณา อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า ณ ช่วงที่ลง พื้นที่เก็บตัวอย่าง สภาพอากาศนิ่ง ส่งผลทำให้ ความหนาแน่นสูงและเกิดสภาวะอากาศปิด ทำให้ฝุ่นละอองไม่ สามารถลอยตัวขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศได้และเกิดการสะสม แต่ในขณะเดียวกัน ในฤดูฝน อุทยานแห่งชาติแควน้อย มีระดับค่าเฉลี่ย PM2.5 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากในช่วงของฤดูฝน ในเขตพื้นที่อุทยานมีความสูงชันที่ กว่าเขตเมือง โดยฝุ่นละอองจะดูดซับละอองน้ำทำให้ฝุ่นละอองตกลงสู่พื้นได้เร็วกว่าสภาพอากาศที่แห้ง

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาช่วงฤดูฝน (Wet season) พบข้อมูลที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง พื้นที่ริม ถนนบรมไตรโลกนารถยังคงมีระดับค่าเฉลี่ย PM2.5 เกินเกณฑ์มาตรฐาน 24 ชั่วโมง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $40.17 \pm 3.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ขณะที่พื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อยมีระดับ PM2.5 ลดลงจากฤดูแล้งและอยู่ในเกณฑ์ มาตรฐาน โดยมีค่าเฉลี่ย $22.23 \pm 5.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Table 3)

Table 2. Meteorological data on the date of field sampling.

Date	Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Rainfall Amount (mm)	Wind Speed (Knot)
15 March	29.9	62	0	11
16 March	30.9	66	0	13
17 March	30.2	71	0	16
19 March	32.5	66	78	18
20 March	27.4	83	0.3	16
21 March	28.7	74	0	11
22 March	30.3	71	0	12
23 March	30.7	69	0	13
24 March	31.3	67	0	11
9 April	32.9	66	0	20
10 April	28.7	76	1.3	12
22 April	33.4	57	0	12
23 April	33.4	63	0	13
26 April	34.3	53	0	12
27 April	34.0	56	0	11
1 May	34.8	59	0	11
2 May	34.6	58	0	17
3 May	34.5	58	0	38
4 May	33.2	62	0	12
8 May	31.7	65	0	14
9 May	32.9	58	1.4	20
10 May	31.0	71	0	18
11 May	31.1	72	20.9	24
12 May	30.8	75	0	10
13 May	32.8	72	74.8	18
5 June	31.2	76	8.5	26
6 June	29.8	82	13.6	14
12 June	29.9	78	0	12
13 June	29.7	75	0	11
14 June	-	77	5.1	15

ที่มา : กรมอุตุนิยมวิทยา, 2568



การวิเคราะห์ทางสถิติ (Independent Two-Sample t-Test) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ PM_{2.5} ระหว่างพื้นที่ริมถนนบรมไตรโลกนารถและอุทยานแห่งชาติแควน้อยในทั้งสองฤดูกาล แสดงรายละเอียดใน Table 4 พบว่า ระดับ PM_{2.5} ณ อุทยานแห่งชาติแควน้อยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง 2 ฤดูกาล ($P<.05$) พิจารณาแล้วฤดูฝนมีระดับ PM_{2.5} ในเขตป่า (อุทยาน) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับผลการทดสอบทางสถิติระหว่างฤดูกาล ณ พื้นที่เขตเมือง บริเวณริมถนนบรมไตรโลกนารถซึ่งเป็นเขตชุมชนหนาแน่น ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<.05$) ของระดับ PM_{2.5} ระหว่าง 2 ฤดูกาล ซึ่งบ่งบอกถึงสถานการณ์แหล่งกำเนิดและระดับการปลดปล่อยอนุภาคในบรรยากาศที่ไม่เปลี่ยนแปลงทั้ง 2 ฤดูกาล และยังคงมีระดับเกินเกณฑ์มาตรฐานเช่นเดิม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับ PM_{2.5} ระหว่างสองพื้นที่ในฤดูกาลเดียวกัน (Table 5) พบว่า ในฤดูฝนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<.05$) ขณะที่ในฤดูแล้งไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P<.05$)

Table 3. The mean $\pm$ SD of PM_{2.5} concentrations for the two study areas across two seasons.

Season	Study area	Concentration Mean $\pm$ SD ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)	Air quality guide for PM 2.5 (average 24 hours) not exceed 37.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dry season	Kwai Noi National Park	51.23 $\pm$ 13.41	Exceed the Thailand Ambient Air Quality Standards
	Boromtrailokkanat Road	46.33 $\pm$ 10.95	Exceed the Thailand Ambient Air Quality Standards
Wet Season	Kwai Noi National Park	22.23 $\pm$ 5.85	Not-exceed the Thailand Ambient Air Quality Standards
	Boromtrailokkanat Road	40.17 $\pm$ 3.05	Exceed the Thailand Ambient Air Quality Standards

Table 4. The comparison of PM_{2.5} concentrations between the study areas and seasons, analyzed using an independent two-sample t-test.

Study area	Dry season		Wet Season		t	Sig (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
	Mean	SD	Mean	SD				
Kwai Noi National Park	51.23	13.41	22.23	5.85	3.433	.026*	29.00000	8.44781
Boromtrailokkanat Road	46.33	10.95	40.17	3.05	9.40	.400	6.16667	6.56117

Note: The asterisk (*) indicates a statistically significant difference at the 95% confidence level ($P < .05$), as determined by an independent two-sample t-test.

Table 5. The comparison of PM_{2.5} concentrations between the two study areas during a single season, separately for the dry and wet seasons, analyzed using an independent two-sample t-test.

season	Kwai Noi National Park		Boromtrailokkanat Road		t	Sig (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
	Mean	SD	Mean	SD				
dry season	51.23	13.41	46.33	10.95	.490	.651	4.90000	9.99528
Wet season	22.23	5.85	40.17	3.05	-4.708	.009*	-17.93333	3.80905

Note: The asterisk (*) indicates a statistically significant difference at the 95% confidence level ($P < .05$), as determined by an independent two-sample t-test.

ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของอนุภาคฝุ่น PM_{2.5} ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS) พบว่าลักษณะสัณฐานที่ความโดดเด่น 9 ลักษณะ (Table 6) คือ

1. รูปร่างแท่งยาว (Elongated cylindrical (or rod-shaped) form)
2. รูปร่างเป็นก้อนปุย (Fluffy aggregates)

3. รูปร่างผลึกผิวไม่สม่ำเสมอซ้อนกัน (Irregularly layered crystal structures with uneven surface)
4. ทรงกลมสมมาตร (Symmetric Spherical particles)
5. รูปร่างทรงกลมที่ไม่สมมาตร มีขอบเรียบ (Asymmetric spherical shape with smooth edges)
6. รูปร่างเป็นเกลียวซ้อนกัน (Coiled structures particles)
7. รูปร่างแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาวซ้อนบนรูปร่างไม่แน่นอนและทรงกลม (Elongated rectangular rods)
8. รูปร่างไม่สม่ำเสมอรวมตัวเป็นก้อน (Irregular aggregated particle)
9. รูปร่างแท่งยาวเรียว (Elongated tapered rods particles)

พิจารณาสัณฐาน PM2.5 ที่พบในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อย ด้วยการขยายภาพกำลังสูงจากเครื่อง FESEM ในฤดูแล้ง พบว่ามีอนุภาคที่มี รูปร่างแท่งยาวและรูปร่างหลายเหลี่ยมซ้อนกัน รูปร่างเป็นก้อนปุยและทรงกลมไม่สมมาตรขอบเรียบซ้อนกัน และ รูปร่างผลึกผิวไม่สม่ำเสมอซ้อนกัน ส่วนในฤดูฝนพบว่า สัณฐานมีลักษณะ รูปร่างแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาวซ้อนบนรูปร่างไม่แน่นอนรวมตัวเป็นก้อนเรียงตัวร่วมกับทรงกลม รูปร่างก้อนปุยและทรงกลมรวมตัวกัน และรูปร่างแท่งยาวเรียวและทรงกลมกระจายตัว เมื่อพิจารณาแล้วจะพบสัณฐานลักษณะเป็นแท่งยาว ทรงกลม การจับก้อนกัน รูปร่างไม่สม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่ (Table 5)

ผลการศึกษาสัณฐานและองค์ประกอบธาตุของ PM2.5 ในพื้นที่เขตเมือง (ริมถนนบรมไตรโลกนาถ) จากการวิเคราะห์สัณฐานของ PM2.5 พบว่า ใน ฤดูแล้ง อนุภาคฝุ่นมีลักษณะเป็น ก้อนปุยซ้อนกัน รูปร่างเกลียว และมีการเรียงตัวร่วมกับทรงกลมสมมาตร โดยมี รูปร่างผลึกผิวไม่สม่ำเสมอซ้อนกัน ส่วนใน ฤดูฝน พบว่า PM2.5 มีลักษณะ ก้อนปุยซ้อนกัน วงรีร่วมกับแท่งยาว โดยเมื่อเปรียบเทียบสัณฐานกับพื้นที่ป่า พบว่าโดยรวมมีความคล้ายคลึงกัน แต่มี สัณฐานเกลียว ซึ่งแตกต่างจากพื้นที่ป่า (Table 5)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใน ฤดูแล้ง (Figure 3) พบ 16 ธาตุ ได้แก่ C O N Si S K Mg Na Al Sn Fe Ca Mo Ti Mn และ P ส่วนใน ฤดูฝน (Figure 4) พบ 13 ธาตุ ได้แก่ C O N Si S Mo Na K Al Fe Ca Mg และ Ti โดย ธาตุที่พบมากที่สุด 2 อันดับแรก ได้แก่ Carbon (C) และ Oxygen (O) ซึ่งพบในทุกพื้นที่และทุกฤดูกาล (Table 5)

จากผลการศึกษาพบความน่าสนใจของธาตุบางชนิดในพื้นที่ อาทิเช่น ธาตุ Si (Silicon) พบในสัดส่วนสูงในทุกพื้นที่และทุกฤดูกาล ส่วนใหญ่เป็น อนุภาคแร่ธาตุจากดินและธรณี ซึ่งอาจเกิดจากฝุ่นดินที่ถูกพัดพาโดยลม ฝุ่นจากการจราจรหรือก่อสร้าง และการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม ส่วนอนุภาคที่มี รูปร่างทรงกลม อาจประกอบด้วย คาร์บอนหรือซิลิกอน ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด (Quijano et al., 2019)

ธาตุ S (Sulfur) เป็นองค์ประกอบที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยเฉพาะจากเครื่องยนต์ดีเซล อนุภาคลักษณะนี้เป็น ก้อนปุย จับตัวแบบหลวม ๆ และมีรูพรุนมาก (เบญจพรและคณะ, 2567; ศิริวรรณ แก้วงาม, 2543) สำหรับธาตุ Mo (Molybdenum) พบทั้งในพื้นที่ป่าและเขตเมือง

ทุกฤดูกาล แม้จะพบในสัดส่วนไม่สูงนัก แต่เป็น โลหะหนักที่อาจมีผลต่อสุขภาพมนุษย์ เป็นองค์ประกอบในสิ่งมีชีวิต และอาจฟุ้งกระจายมาจาก ดิน หิน การใช้ปุ๋ย และการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Krachler et al., 2004)

จากการข้อมูลในข้างต้นและการค้นคว้าศึกษาจากงานการศึกษางานวิจัย ในปัจจุบันให้ความสนใจเป็นอย่างมากเกี่ยวกับปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งประเทศไทยเองก็เป็นประเทศที่ประสบกับปัญหาฝุ่นละออง ประเทศไทยมีพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด 299,183,281 ไร่ เมื่อพิจารณาจังหวัดพิษณุโลกเองก็ส่วนใหญ่อาชีพหลักคือ เกษตรกรรม โดยมีพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด 2,832,600 ไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562) ซึ่งปัญหาฝุ่นละอองที่เกิดของจังหวัดพิษณุโลก ได้แก่ เกิดจากยานพาหนะ การเผาในที่โล่ง เช่น ไฟป่า การเผาตอซังข้าว ซึ่ง ในปัจจุบันได้มีมาตรการในการรับมือและแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง

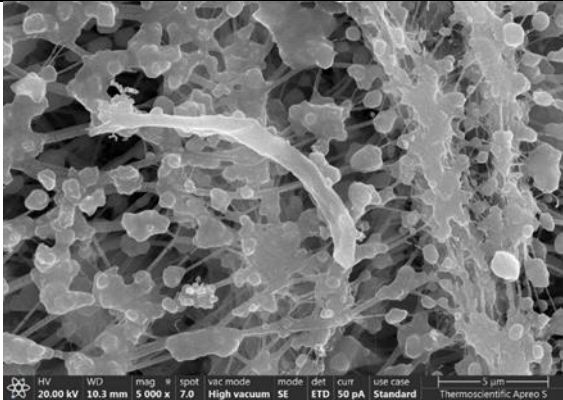
ซึ่งแผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ “การแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง” ฉบับที่ ๒ (พ.ศ. ๒๕๖๘ - ๒๕๗๐) มุ่งเน้นการบริหารจัดการเชิงบูรณาการเพื่อควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษในทุกมิติอย่างมีประสิทธิภาพโดยในพื้นที่เมืองให้ความสำคัญกับการควบคุมภาคคมนาคมผ่านการปรับเปลี่ยนเทคโนโลยียานยนต์โดยมีการสนับสนุนยานยนต์ไฟฟ้า (BEV) พร้อมทั้งศึกษาการใช้อนุมาตรการทางเศรษฐศาสตร์ เช่น การเก็บค่าธรรมเนียมการใช้ถนนในเขตจราจรหนาแน่น (Congestion Charge) และการกำหนดพื้นที่ควบคุมมลพิษต่ำ (Low Emission Zone) และสำหรับพื้นที่ป่าและเกษตรกรรมแผนงานมุ่งเน้นการลดพื้นที่เผาไหม้ (Burnt Scar) โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และข้อมูลดาวเทียมเพื่อระบุพื้นที่เสี่ยงไฟไหม้ซ้ำซาก ในภาคป่าไม้มีการบริหารจัดการเชื้อเพลิงตามความจำเป็นของระบบนิเวศป่าแต่ละชนิดควบคู่กับการใช้อนุมาตรการทางกฎหมายปิดป่าในช่วงวิกฤต ส่วนในภาคเกษตรกรรมได้มีการยกระดับไปสู่เกษตรปลอดการเผาผ่านการกำหนดมาตรฐาน GAP PM_{2.5} Free และระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ซึ่งรวมถึงมาตรการเชิงรุกในการงดให้สิทธิหรือเงินช่วยเหลือแก่เกษตรกรที่มีพฤติกรรมการเผา และการศึกษามาตรการทางการค้าเพื่อควบคุมการนำเข้าสินค้าเกษตรจากต่างประเทศที่มีกระบวนการผลิตเกี่ยวข้องกับการเผาเพื่อแก้ไขปัญหาหมอกควันข้ามแดนอย่างเป็นระบบ (กรมควบคุมมลพิษ, 2568)

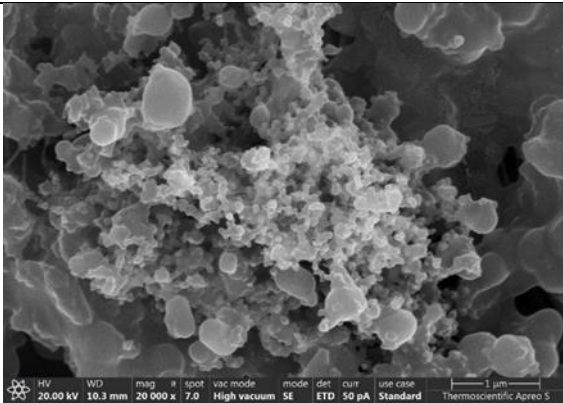
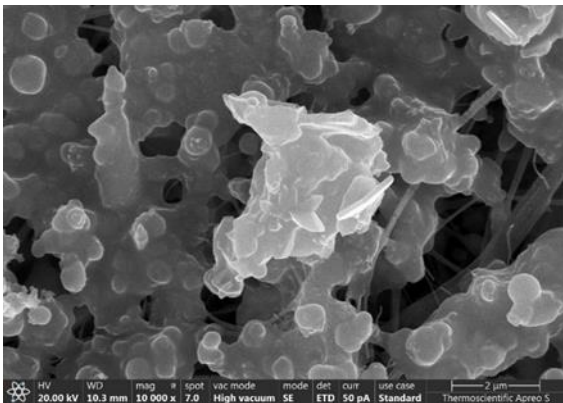
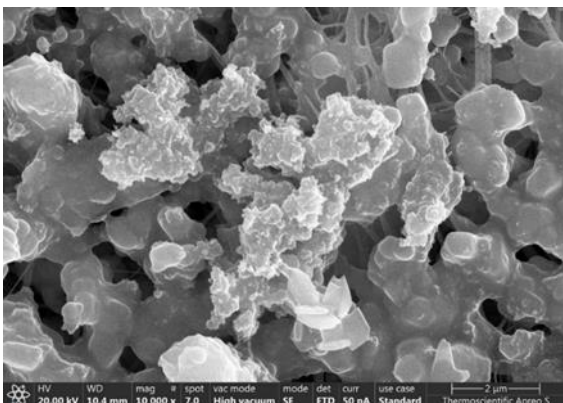
จากการศึกษาวิจัยของ วริศรา กิติภูวดล (2563) เรื่องมาตรการทางกฎหมายในการจัดการปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) พบว่าประเทศไทยจำเป็นต้องมีการปฏิรูปโครงสร้างเชิงระบบผ่านหลักการป้องกันล่วงหน้า (Precautionary Principle) และหลักผู้ก่อมลภาวะเป็นผู้จ่าย (Polluter Pays Principle) โดยในเชิงกฎหมายควรมีการรับรองสิทธิในสิ่งแวดล้อมที่ดีไว้ในรัฐธรรมนูญเพื่อสร้างพันธกรณีที่ชัดเจนให้แก่รัฐ พร้อมทั้งปรับปรุงพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ให้มีการจัดทำแผนปฏิบัติการระดับจังหวัดที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ ไม่จำกัดเฉพาะเขตควบคุมมลพิษ เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการเชิงรุกตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ นอกจากนี้ ต้องยกระดับค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ (Ambient Air Quality Standards) ให้ทัดเทียมกับมาตรฐานสากล เช่น องค์การอนามัยโลกหรือประเทศที่พัฒนาแล้ว เพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการลดการปล่อยมลพิษจากแหล่งกำเนิดอย่างแท้จริง

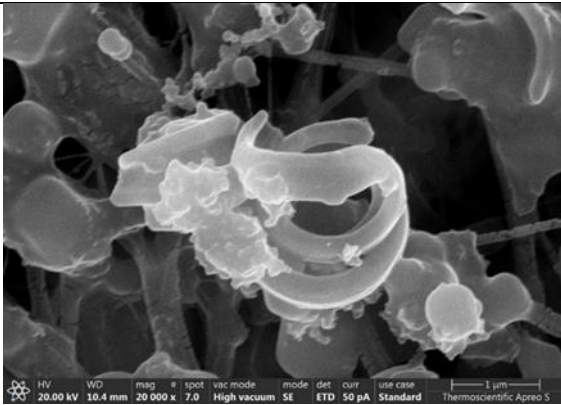
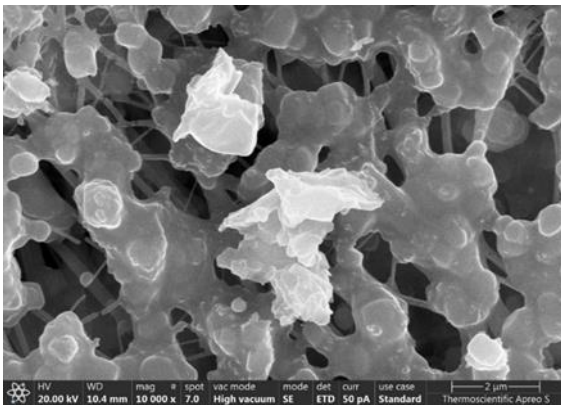
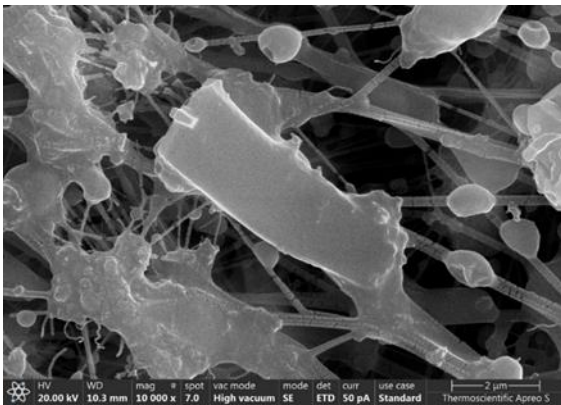
ในด้านการควบคุมแหล่งกำเนิด (Source Control) มาตรการทางกฎหมายต้องชัดเจนว่าในการบังคับใช้ โดยเฉพาะการกำหนดมาตรฐานควบคุมมลพิษจากแหล่งกำเนิดให้ครอบคลุมประเภทกิจกรรมที่หลากหลายมากขึ้น และเพิ่มบทกำหนดโทษปรับให้สอดคล้องกับสถานะเศรษฐกิจและสำหรับปัญหาความซับซ้อนของโครงสร้างหน่วยงาน ควรนำแนวทางการบริหารจัดการแบบเอกภาพ (Unity of command) เช่น องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (US EPA) มาปรับใช้เพื่อลดความทับซ้อนของอำนาจหน้าที่ระหว่างเจ้าพนักงานควบคุมมลพิษและเจ้าพนักงานตามกฎหมายโรงงาน

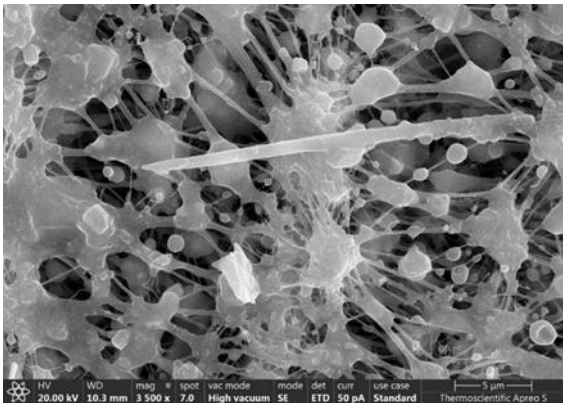
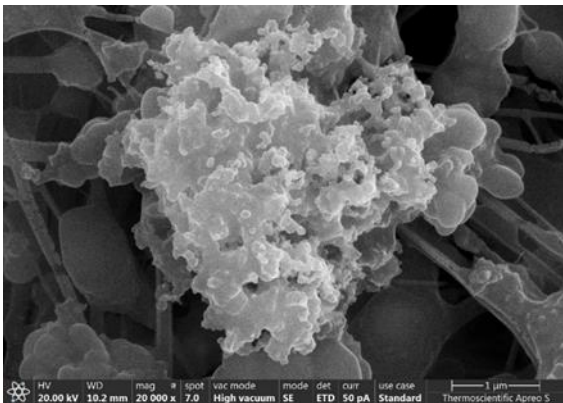
นอกจากนี้ การแก้ไขปัญหาในระยะยาวต้องอาศัยมาตรการทางเศรษฐศาสตร์และนโยบายสนับสนุน (Economic Instruments & Supportive Policies) เช่น การจัดเก็บภาษีสิ่งแวดล้อมหรือภาษีคาร์บอน การใช้ระบบคาร์บอนเครดิตในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการส่งเสริมเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) ผ่านการอุดหนุนการใช้รถยนต์ไฟฟ้า (EV) และการพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดมลพิษจากยานพาหนะ ในภาคเกษตรกรรม รัฐต้องสนับสนุนเทคโนโลยีการจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งเพื่อลดการเผาในที่โล่ง ควบคู่ไปกับการสร้างความตระหนักรู้และส่งเสริมการมีส่วนร่วมของภาคประชาชน (Public Participation) เพื่อสร้างอำนาจต่อรองและจิตสำนึกในการรักษาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

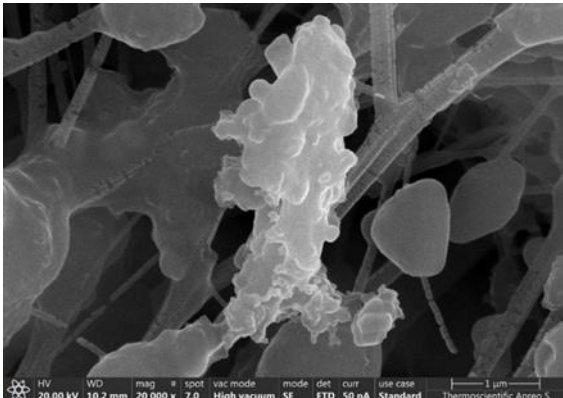
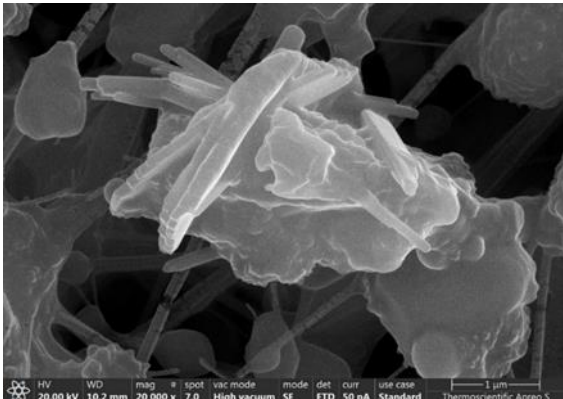
Table 6. Morphological characteristics and elemental composition of PM2.5 in the two study areas across the dry and wet seasons.

Study area	Morphology	Element	%wt
F-DS-R2 Kwai Noi National Park Dry Season	 Elongated rods and layered polygonal particles	C O N S Si K Al	65.0 23.9 7.0 1.7 0.8 0.5 0.1

Study area	Morphology	Element	%wt
	 Irregular fluffy clusters and Layered Asymmetric spherical shape with smooth edges	C O N Si S Mo K	62.3 27.8 3.5 3.1 1.7 0.9 0.6
	 (Irregularly layered crystal structures with uneven surface)	O C Si Al S Fe K Na Ti Ca Mg N	42.3 41.2 7.4 3.6 2.0 1.8 0.6 0.4 0.4 0.2 0.2 0.0
US1-DS-R3 Boromtrailokkanat Road Dry Season	 aggregated fluffy clusters	O C Si S K Al Sn Na Fe Mg	44.8 38.3 14.2 1.2 0.5 0.3 0.2 0.2 0.1 0.1

Study area	Morphology	Element	%wt
	 Aggregated fluffy particles, coiled structures, and symmetric spherical particles	C O Si S K Ca Mo Na Al	57.8 33.5 2.7 2.5 1.0 1.0 1.0 0.2 0.2
	 Irregularly layered crystal structures with uneven surface	C O Si S Mo K Ca Al Fe Na N	65.7 27.9 1.7 1.6 0.9 0.7 0.5 0.4 0.3 0.3 0.0
F-WS-R2 Kwai Noi National Park Wet Season	 Elongated rectangular rods over irregular clusters arranged together with spherical particles	C O Si Ca S Na K Al Mg Fe	52.3 37.8 2.8 2.0 1.6 1.1 0.8 0.8 0.4 0.3

Study area	Morphology	Element	%wt
	 Fluffy clusters and aggregated spherical particles	C O N Si S Mo K	56.6 30.0 6.0 4.9 1.1 1.0 0.5
	 Elongated tapered rods and dispersed spherical particles	C O Si Al K S Fe Na Mg Ti	59.0 33.9 3.0 1.8 0.8 0.7 0.4 0.2 0.1 0.1
US1-WS-R1 Boromtrailokkanat Road Wet Season	 aggregated fluffy clusters	C O N Si S Mo Na K Al	64.6 24.7 4.4 2.7 1.2 1.0 0.9 0.6 0.1

Study area	Morphology	Element	%wt
	 Fluffy clusters and Layered elliptical particles	C O Si Al K S Fe Ca Mg Na	50.1 35.2 6.3 6.4 1.4 1.2 1.2 0.6 0.3 0.3
	 Elongated tapered rods particles and Layered fluffy clusters	C O S Si Na N Ca Mg K Al Fe	47.2 41.3 2.7 2.6 2.4 1.2 0.8 0.6 0.6 0.4 0.2

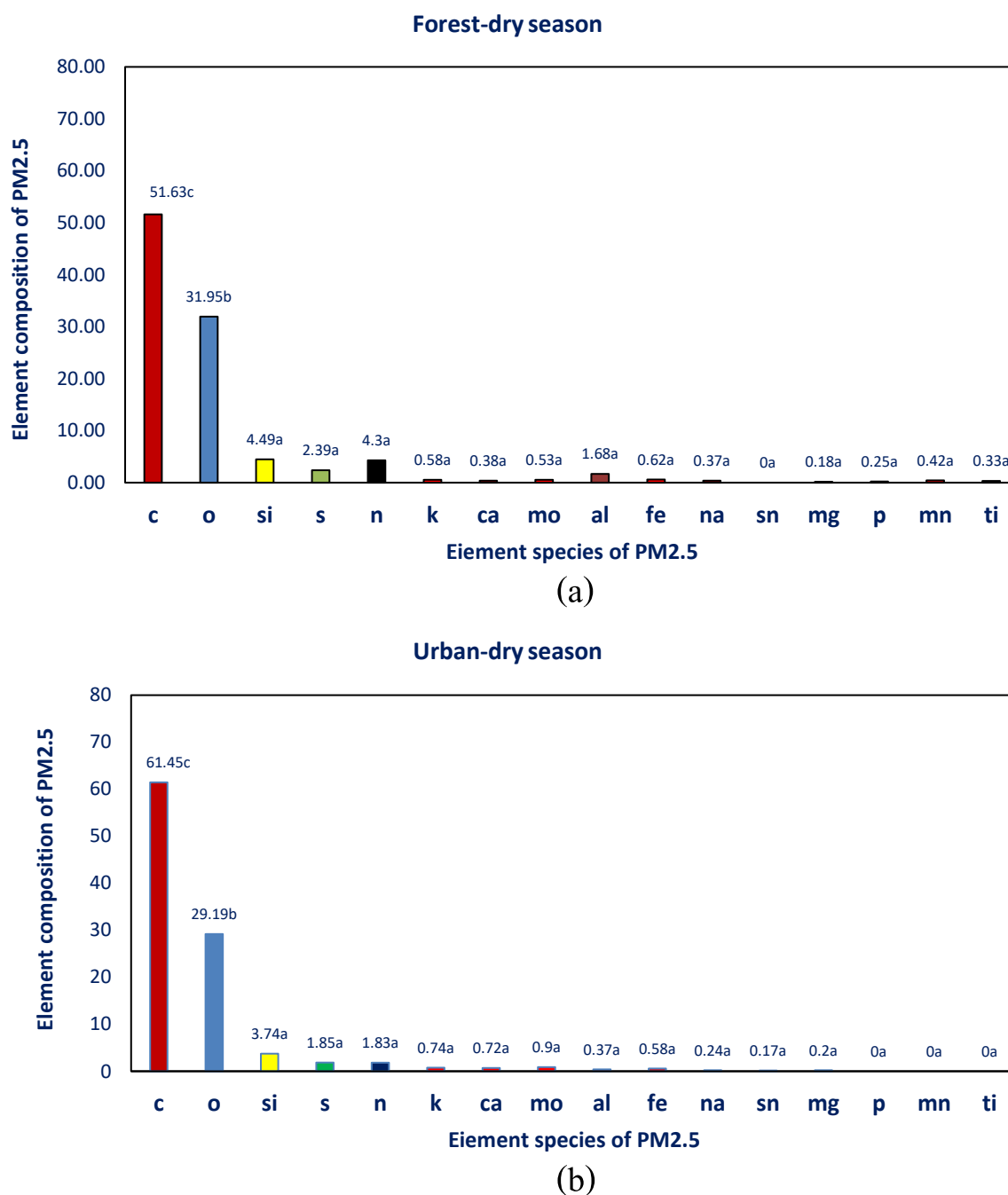


Figure 3. Comparison of elemental composition during the dry season between the roadside area of Boromtrailokkanat Road and Kwai Noi National Park.

Note: (a) Kwai Noi National Park (b) Roadside area of Boromtrailokkanat Road

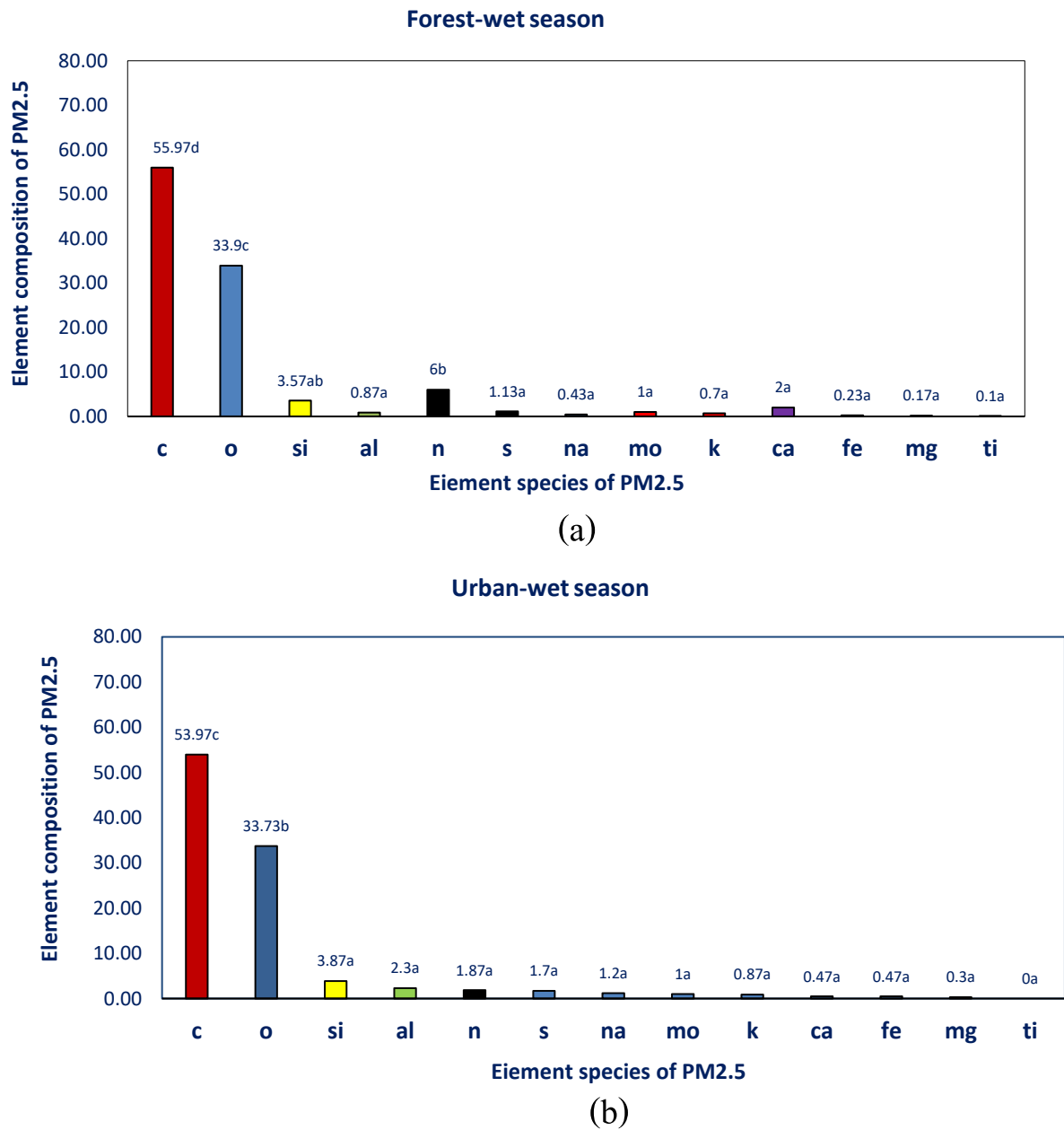


Figure 4. Comparison of elemental composition during the wet season between the roadside area of Boromtrailokkanat Road and Kwai Noi National Park.

Note: (a) Kwai Noi National Park (b) Roadside area of Boromtrailokkanat Road

อภิปรายผล

ฝุ่นละอองมีการศึกษาที่เผยแพร่ออกเป็นจำนวนมากที่กล่าวถึงกระบวนการเกิดของฝุ่นละออง โดยถูกจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1.เกิดจากแหล่งกำเนิดขั้นปฐมภูมิ (Primary Emission Sources) เป็นมลพิษที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรง 2.เกิดจากแหล่งกำเนิดขั้นทุติยภูมิ (Secondary Emission Sources) เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ เช่น กลไกการออกซิเดชัน การควบแน่นของไอระเหยอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ในชั้นบรรยากาศ และปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของฝุ่นละอองอีกด้วย อาทิเช่น การผกผันของอุณหภูมิ (Temperature Inversion) ซึ่งเป็นกลไกในการสะสมมลพิษทางอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศจะลดลงตามความสูง ทำให้มวลอากาศที่พื้นผิวสามารถลอยตัวและกระจายตัวออกไปได้ เมื่อเกิดปรากฏการณ์ Temperature Inversion ทำให้เกิดชั้นกักเก็บในชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้มวลอากาศไม่สามารถกระจายตัวได้ ปรากฏการณ์นี้มักจะพบหรือเกิดขึ้นในช่วงเวลา กลางคืนหรือในฤดูหนาว (Zhang et al., 2024; Zhai et al., 2023)

ผลการศึกษาระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) พบว่า ในพื้นที่ริมถนนบรมไตรโลกนารถ และ อุทยานแห่งชาติแควน้อย ทั้งใน ฤดูแล้ง และ ฤดูฝน ระดับความเข้มข้นของ PM_{2.5} ส่วนใหญ่เกินเกณฑ์มาตรฐาน 24 ชั่วโมงของประเทศไทย ยกเว้นใน ฤดูฝนของพื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อย ซึ่งมีค่าเฉลี่ย $22.23 \pm 5.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

โดยรายละเอียดของค่าเฉลี่ยระดับความเข้มข้น PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) คือ ริมถนนบรมไตรโลกนารถ ฤดูแล้งเท่ากับ $46.33 \pm 10.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ฤดูฝนเท่ากับ $51.23 \pm 13.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับอุทยานแห่งชาติแควน้อย ฤดูแล้งเท่ากับ $40.17 \pm 3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ฤดูฝนเท่ากับ $22.23 \pm 5.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS พบว่า ด้วยสถิติ t-test พบว่าในพื้นที่ อุทยานแห่งชาติแควน้อย ระดับความเข้มข้นของ PM_{2.5} มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน ($P<.05$)

อย่างไรก็ตามพิจารณาในพื้นที่ ริมถนนบรมไตรโลกนารถ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างฤดูกาล ($P<.05$) เมื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นระหว่างพื้นที่ทั้งสองในฤดูกาลเดียวกัน พบว่าฤดูฝน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติฤดูแล้ง ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการสังเกตเพิ่มเติมพบว่า ในช่วงฤดูแล้ง พื้นที่อุทยานแห่งชาติแควน้อยมีระดับ PM_{2.5} สูงสุดเนื่องจากเกิดสถานการณ์ การเผาไหม้ชีวมวลในเขตป่า (ไฟป่า) ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความเข้มข้นของฝุ่น การวิเคราะห์เชิงลึกต่อไปจำเป็นต้องพิจารณารูปร่างและองค์ประกอบธาตุของ PM_{2.5} ร่วมกับการประเมินแหล่งกำเนิด เพื่อระบุสาเหตุและลักษณะของฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานและชนิดของธาตุที่พบในการศึกษา พบว่า ชนิดธาตุที่พบในทุกพื้นที่ การศึกษา 6 อันดับแรกเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) ซัลเฟอร์ (S) อะลูมิเนียม (Al) และ โพแทสเซียม (K) และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 2 ฤดูกาลพบความสอดคล้องกันโดยพบว่า สัดส่วนองค์ประกอบของธาตุที่พบมากที่สุด 2 อันดับแรกได้แก่ O (Oxygen) และ C (Carbon) มีสัดส่วนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชนิดธาตุอื่น ๆ ในทุกพื้นที่ ทั้งนี้จากการศึกษาของคณะวิจัย (Zeb et al., 2018) ด้วยการวิเคราะห์

สัณฐานรูปร่างและองค์ประกอบธาตุโดยใช้เทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ Energy Dispersive X-ray (EDX) พบ C (Carbon) เป็นชนิดธาตุที่มีสัดส่วนมากที่สุดสอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจาก C (Carbon) เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์สารทุกชนิด ดังนั้นจึงสันนิษฐานแหล่งกำเนิดได้ว่าอาจเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การจราจร รถยนต์ดีเซล และการปล่อยควันจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการเผาชีวมวล เช่น การเผาไหม้พืชสดหรือวัสดุอินทรีย์อื่น ๆ

เมื่อพิจารณาการพบธาตุร่วมกันระหว่างธาตุ C และ O สันนิษฐานได้ว่าเป็นอนุภาคประเภท ธาตุคาร์บอน (Element carbon; EC) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดคาร์บอนดำ (Black carbon หรือ soot) อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon; OC) เป็นสารอินทรีย์ที่ปล่อยออกมาโดยตรง (Primary) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลรวมถึงปฏิกิริยาทางเคมีสามารถก่อให้เกิดการก่อตัวของฝุ่นละอองชนิดทุติยภูมิ (Secondary Organic Aerosol: SOA) ทำให้อนุภาคสามารถเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) (สุพรรณิการ์ และคณะ, 2564; Szidat et al., 2009; Ahmad et al., 2023) นอกจากนี้ การพบธาตุคาร์บอน (C) ร่วมกับไนโตรเจน (N) ในทุกพื้นที่บ่งชี้ถึงสารชีวภาพที่มีแหล่งกำเนิดในท้องถิ่น เช่น เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และเชื้อรา ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน กลุ่มเอมีน หรือเบสของไนโตรเจน ที่อาจเกิดจากการพัดพาด้วยกระแสลม (Kostić et al., 2020)

สำหรับธาตุซิลิกอน (Si) เป็นอีกชนิดธาตุที่พบในทุกพื้นที่ ร่วมกับการพบ O บ่งชี้ว่าเป็นอนุภาคจากละอองดิน หรือธาตุควอตซ์ (Quartz; SiO_2) การสีกกร่อนเชิงธรณี (geogenic origin) ซึ่งเป็นข้อมูลที่พบโดยทั่วไปของพื้นที่ศึกษาที่เกิดขึ้นภายนอกอาคาร (Outdoor) (Zeb et al., 2018)

(ธาตุอะลูมิเนียม (Al) เป็นการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินหรือการถูกพัดพาด้วยกระแสลม, ฝุ่นจากการก่อสร้าง, ฝุ่นถนนลาดยาง และฝุ่นถนนลูกรัง และธาตุซัลเฟอร์ (S) โพแทสเซียม (K) ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและตกตะกอนผ่านกระบวนการที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลหรือเผาไหม้ชีวมวล ถูกเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบซัลเฟต (Sulfate Compounds) และเป็นอนุภาค (Particulate Matter) (Zeb et al., 2018; Matawle et al., 2015)

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานของ PM2.5 พบความสอดคล้องกับงานวิจัยจำนวนมาก ซึ่งระบุว่าอนุภาค PM2.5 ที่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อน มักมีองค์ประกอบของ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซัลเฟอร์ (S) ซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และโพแทสเซียม (K) กลุ่มธาตุดังกล่าวมีความทนทานต่อการส่อด้วยอิเล็กตรอนและเป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์ที่ไม่ระเหย (Non-Volatile Organic Compounds; NVO) จึงมักพบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM แหล่งกำเนิดที่เป็นไปได้ของอนุภาคเหล่านี้ ได้แก่ การฟุ้งกระจายของดินและหิน หรือการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กซึ่งอาจมีต้นกำเนิดจากดิน การเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ หรือการสึกหรอของยางรถและเบรกโดยอนุภาคดินมักมีรูปร่างไม่แน่นอนซึ่งเกิดจากกลไกทางกายภาพขั้นต้น (Primary Physical Mechanisms) เป็นกระบวนการรวมตัวโดยไม่ผ่านการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือความร้อนสูง

ส่วน อนุภาคทรงแท่งยาวอาจเกิดจากการแตกตัวของแร่ธาตุตามโครงสร้างผลึกที่สร้างขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ภายใต้อุณหภูมิสูงและรวมตัวในบรรยากาศที่เย็นลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดโครงสร้างแท่งยาว (Maskey et al., 2016; Quijano et al., 2019; Pipal et al., 2011)

นอกจากนี้ การพบอนุภาคที่มี รูปร่างทรงกลม หรือแตกแขนงเป็นโซ่ อาจสะท้อนถึง การรวมตัวของ C-O หรือ Soot particles ซึ่งเป็นอนุภาคคาร์บอน (black carbon) ที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ในพื้นที่การจราจรหรือจากไฟฟ้าในกรณีที่ผ่านมาอุณหภูมิสูงพอหรือเกิดการเกาะตัวใหม่ (restructuring) อนุภาคเหล่านี้อาจมีลักษณะทรงกลมได้ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไป Soot มักมีลักษณะเป็นโซ่หรือกิ่งก้าน (Ju et al., 2003)

สำหรับ ทรงกลมไม่สมมาตร ขอบเรียบ (Asymmetric spherical particles with smooth edges) ซึ่งพบในการศึกษาครั้งนี้ บ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์หรือการหลอมละลายบางส่วนของสารอินทรีย์/โลหะ แหล่งกำเนิดที่เป็นไปได้ ได้แก่ ไอเสียดีเซล การเผาชีวมวล หรือกระบวนการอุตสาหกรรมที่ปล่อยอนุภาคโลหะ (Ju et al., 2003; Usman et al., 2022)

งานวิจัยนี้พบธาตุ S และ O ร่วมกันสอดคล้องและใกล้เคียงกับการพบองค์ประกอบและสัญญาณวิทยาของอนุภาคในอากาศใกล้พื้นที่ป่าในประเทศจีนซึ่งพบ อนุภาคที่มีธาตุกำมะถันสูง (S) (รวมตัวซ้อนกันกับสารอินทรีย์ (OM) และเขม่า) รวมทั้งพบ PM ประเภทเถ้าลอย โลหะ แร่เปลือกโลก โดยสันนิษฐานจากการพบ Ca จับตัวซ้อนกัน S และ N รวมทั้งพบ Na จับตัวร่วมกับ N สำหรับการจำแนกอนุภาค และพบสารประกอบที่มีส่วนผสมของแอมโมเนียมซัลเฟตและซัลเฟต เช่น K_2SO_4 และ Na_2SO_4 ซึ่งละอองลอยอนินทรีย์ที่พบมากในพื้นที่ เช่นเดียวกับอนุภาคที่พบในพื้นที่ที่มีการเผาชีวมวลในพื้นที่ต่าง ๆ (Adachi and Buseck, 2008; Li et al., 2010; Murphy et al., 2006; Posfai et al., 2003)

ภาพรวมของผลการศึกษาทั้งปริมาณสัญญาณวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีสามารถอนุมานแหล่งกำเนิดของ PM_{2.5} โดยแสดงใน Table 7 ภาพรวมของผลการศึกษาโดยสรุปพบว่า PM_{2.5} ในพื้นที่ริมถนนและอุทยานแห่งชาติแคว้นน้อยส่วนใหญ่เกินเกณฑ์มาตรฐาน 24 ชั่วโมง โดยเฉพาะในฤดูแล้ง อนุภาคฝุ่นประกอบด้วย C, O, Si, S, Al และ K สูงสุด และมีรูปแบบสัญญาณทั้งก่อนรวม, แท่งยาว และทรงกลมไม่สมมาตร ขอบเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ การฟุ้งกระจายของดิน หรือกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การจราจรและไฟฟ้า ลักษณะและองค์ประกอบธาตุเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงแหล่งกำเนิดทั้งชีวมวลอุตสาหกรรม และดิน/ธรณีวิทยา (Ju et al., 2003; Usman et al., 2022; Zeb et al., 2018)

Table 7. Source identification of PM2.5 based on particle shape and elemental profiles
Comparison of PM2.5

Detail	Study area
Study Area	Kwai Noi National Park
Chemical Composition Overview	C, O, N, S, Si, K, Al, Mo, Fe, Na, Ti, Ca, Mg,
Morphological characteristics Overview	
1 Elongated cylindrical (or rod-shaped) form)	
Source Identification	The analysis of PM2.5 samples collected during the burning season revealed a predominance of elongated cylindrical (rod-shaped) particles. These structures, in conjunction with the detection of K, C, O, and S, serve as morpho-chemical tracers for biomass burning, representing partially combusted plant fibers.
2 Elongated rectangular rods	
Source Identification	The analysis of PM2.5 samples collected during the burning season revealed a predominance of elongated cylindrical (rod-shaped) particles. These structures, in conjunction with the detection of K, C, O, and S, serve as morpho-chemical tracers for biomass burning, representing partially combusted plant fibers. The occurrence of elongated rectangular rods provides further evidence of high-temperature thermal alteration. These well-defined geometric structures, found alongside Si, Al, and Ca, suggest the presence of mineral-based crystals or thermally processed plant matter. Their co-existence with K and S reinforces the interpretation of a mixed-source environment, where primary biomass burning emissions interact with crustal dust during intensive wildfire events
1. Fluffy aggregates	
Source Identification	The observation of fluffy aggregates further confirms the impact of incomplete biomass combustion. These structures are characteristic

Detail	Study area	
	of soot agglomerates, primarily composed of C and O, which serve as a scaffold for the adsorption of other detected elements such as K and S. The prevalence of these porous, high-surface-area particles during the burning season highlights the intense emission of carbonaceous aerosols from wildfires, which significantly contributes to the complexity of the PM2.5 profile in the study area.	
4. Asymmetric spherical shape with smooth edges		
Source Identification	The asymmetric spherical particles with smooth edges suggest a process of high-temperature melting and rapid solidification. These structures, often referred to as fly ash, are likely formed from the intensive combustion of biomass or fossil fuels, where inorganic components undergo thermal transformation	
5. Irregularly layered crystal structures with uneven surface		
Source Identification	The irregularly layered crystal structures with uneven surfaces are characteristic of geogenic particles, such as aluminosilicate minerals. These particles originate from soil dust resuspension, where their angular and layered morphology reflects mechanical weathering rather than thermal processing	
Study Area	Boromtrailokkanat Road	
Chemical Composition Overview	C, O, Si, S, Mo, K Ca, Al, Fe, Na, N, Sn Na, Mg,	
Morphological characteristics Overview		
1. Fluffy aggregates		
Source Identification	In the urban roadside environment, the dominance of fluffy aggregates primarily points to vehicular exhaust emissions, particularly soot from incomplete fuel combustion. This is evidenced by the presence of C, O, S, and N, along with trace metals such as Sn and Mo, which are typically associated with engine wear and	

Detail	Study area
	lubricating oils. Additionally, the detection of crustal elements (Si, Al, Fe, Ca, and Mg) indicates a significant contribution from road dust resuspension and tire-pavement interaction. The co-occurrence of K further suggests a minor influence from local urban biomass burning or waste incineration.
2. Coiled structures particles	
Source Identification	The identification of coiled structure particles in the roadside environment strongly indicates non-exhaust emissions, specifically brake wear and mechanical abrasion. These spiral-like morphologies result from the intense frictional heat and mechanical stress between vehicle components. This interpretation is supported by the presence of metallic tracers such as Fe, Sn, Mo, and Al. Furthermore, the association of these structures with S and Si suggests a contribution from tire and road wear particles (TRWP), where polymer-based fragments undergo physical deformation during tire-pavement interaction
3. Irregularly layered crystal	
	The irregularly layered crystal structures with uneven surfaces observed in the urban roadside area are primarily attributed to road dust resuspension. Their morphology is characteristic of crustal minerals (e.g., aluminosilicates), which undergo mechanical fragmentation due to vehicular movement. The presence of Si, Al, Ca, and Fe confirms their geogenic origin, while the detection of S and Mo on these uneven surfaces suggests that these mineral particles act as substrates for the adsorption of anthropogenic emissions, such as vehicular exhaust and industrial pollutants, within the urban canopy.

สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่าในช่วงฤดูแล้ง ระดับความเข้มข้นเฉลี่ยของ PM_{2.5} ทั้งในพื้นที่ป่า (51.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) และพื้นที่เมือง (46.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) มีค่าสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (ไม่เกิน 37.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในขณะที่ช่วงฤดูฝน ความเข้มข้นในพื้นที่ป่าลดลงมาอยู่ที่ 22.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) พบอนุภาคทั้งหมด 9 รูปแบบ เช่น รูปร่างแท่งยาว ก้อนปุย ทรงกลม และรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสะท้อนถึงแหล่งกำเนิดที่หลากหลายทั้งจากธรรมชาติและการทำกิจกรรมของมนุษย์

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Elemental Composition) พบธาตุทั้งหมด 16 ชนิดในฤดูแล้ง และ 13 ชนิดในฤดูฝน โดยมีคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นธาตุหลักที่พบมากที่สุดในทุกพื้นที่และทุกฤดูกาล นอกจากนี้ยังพบธาตุบ่งชี้อื่นๆ เช่น S, K, Si และ Al ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลจากการเผาชีวมวลและการพังกระจายของฝุ่นดิน

จากผลการศึกษาในภาพรวมดังที่ได้สรุป บ่งชี้ว่าภาคส่วนที่เกี่ยวข้องในจังหวัดพิษณุโลกควรมีนโยบาย (Policy) เพื่อให้ผลการวิจัยนี้นำไปสู่การแก้ปัญหาอย่างเป็นรูปธรรม เช่น การจัดการเชิงพื้นที่และฤดูกาล หน่วยงานท้องถิ่นควรยกระดับมาตรการเฝ้าระวังความเข้มข้นของฝุ่นละอองในช่วงฤดูแล้งเป็นพิเศษทั้งในเขตเมืองและพื้นที่ป่า เนื่องจากพบค่าความเข้มข้นเกินมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญในทั้งสองพื้นที่ การควบคุมแหล่งกำเนิดจากการเผาและความร้อน จากการตรวจพบธาตุ Carbon และ Oxygen ในปริมาณสูงร่วมกับธาตุ Potassium (K) ในฤดูแล้ง บ่งชี้ถึงอิทธิพลของการเผาในที่โล่ง ภาครัฐที่เกี่ยวข้อง ควรเพิ่มความเข้มงวดในการชิงเก็บลดเผา นโยบายป้องกันไฟป่าและการจัดการเชื้อเพลิงที่เข้มข้นขึ้นในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักบริหารพื้นที่อนุรักษ์ที่ 11 ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการลงพื้นที่เก็บตัวอย่าง PM_{2.5} ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมขนส่งทางบก. (2566). รายงานสถิติการขนส่ง ปีงบประมาณ 2562 – 2566. <https://shorturl.at/ejUxP>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2568). แผนการปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ “การแก้ไขปัญหาหมอกพิษด้านฝุ่นละออง” ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2568 – 2570 และระยะ 5 ปีต่อไป. pcdnew-2025-08-01_07-12-19_226372.pdf
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2562). พื้นที่เขตเกษตรกรรมประเทศไทย. https://webapp.ddd.go.th/lpd/node_modules/img/Download/zonmap/zonmap2/agri_zone_th.pdf

- กรมควบคุมมลพิษ. (2567). แผนปฏิบัติการขับเคลื่อนวาระแห่งชาติ “การแก้ไขปัญหามลพิษด้านฝุ่นละออง” ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2568 – 2570 และระยะ 5 ปีต่อไป. <https://www.pcd.go.th/strategy>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2567). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2567. <https://www.pcd.go.th/publication/36174/>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2568). ค่ามาตรฐาน PM_{2.5} ใหม่ บังคับใช้แล้ววันนี้ (1 มิ.ย. 66). https://www.pcd.go.th/pcd_news/29901/
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2556). เอกสารวิชาการ อุตุนิยมวิทยานำรู้เพื่อการเกษตรจังหวัดพิษณุโลก. <https://shorturl.at/SCb2u>
- กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2568). อุทยานแห่งชาติแควน้อย (เตรียมการ) (Khwaeng Noi). <https://portal.dnp.go.th/Content/nationalpark?contentId=792>
- เบญจพร โกญจนาท, กฤษฎา ภาณุมนต์วาทิ และ กนิดา ธนเจริญชนาส. (2567). การศึกษาความเข้มข้น ลักษณะสัณฐาน และองค์ประกอบธาตุของอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน บริเวณพื้นที่ริมถนนในเขตเทศบาลนครพิษณุโลก. *วารสารเกษตรนเรศวร*, 21(2), 1-25.
- วิศรา กิติภูวดล. (2563). มาตรการทางกฎหมายในการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศ : ศึกษากรณี ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:191512
- ศิริวรรณ แก้วงาม. (2543). สัณฐานและองค์ประกอบธาตุของฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในกรุงเทพมหานคร [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/21102/>
- สำนักงานเกษตรจังหวัดพิษณุโลก. (2566). ข้อมูลด้านการเกษตรจังหวัดพิษณุโลก, กรมส่งเสริมการเกษตร. <https://phitsanulok.doae.go.th/province/wp-content/uploads/2024/03/ข้อมูลพื้นฐานด้านการเกษตรจังหวัดพิษณุโลก.pdf>
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (Gistda). (2566). พื้นที่จุดความร้อนปี 2566. <https://shorturl.at/BKKDq>
- สุพรรณิการ์ ชาเหลา, ณัฐพล โพธิ์ทาทอง, ปรียาพร คำมุงคุณ และ ภาควิชา ชุมณี. (2564). การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อระบุแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง PM_{2.5} ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 26(1), 438-453.
- Adachi, K. & Buseck, P. R. (2008). Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6469–6481.
- Ahmad, S., Zed, B., Ditta, A., Shahid, U., Shah, U. A., Ahmad, I., Alasmari, A., Sakran, M. & Alqurashi, M. (2023). Morphological, mineralogical, and biochemical characteristics of

- particulate matter in three size fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁) in the urban environment. *ACS Omega*, 8, 31661–31674.
- Anwar, S., Shameer, M., Alawadhi, H., Hamdan, N.M. (2024). Source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ pollutants near an urban roadside site using positive matrix factorization. *Environmental Advances*, 17, 100573. doi:10.1016/j.envadv.2024.100573.
- Ju, H., Bian, F., Wei, M. & Zhang, Y. (2023). Effect of temperature on morphologies and microstructures of soot particles in the diesel exhaust pipe. *Energies*, 16(14), 5488. doi:10.3390/en16145488.
- Kostić, A. Ž, Milinčić, D. D, Barać, M. B, Ali Shariati, M., Tešić, Ž.L., & Pešić, M. B. (2020). The application of pollen as a functional food and feed ingredient-the present and perspectives. *Biomolecules*, 10(1), 84. doi: 10.3390/biom10010084.
- Krachler, M., & Shotyk, W. (2004). Natural and anthropogenic enrichments of molybdenum, thorium, and uranium in a complete peat bog profile, Jura Mountains, *Switzerland Journal of Environmental Monitor*, 6(5), 418-26. doi: 10.1039/b313300.
- Li, N., Georas, S. Alexis, N., Fritz, P., Xia, T., Williams, M.A., Horner, E., & Nel, A. (2016). A work group report on ultrafine particles (American Academy of Allergy, Asthma & Immunology): Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 138(2), 386–396. doi: 10.1016/j.jaci.2016.02.023.
- Li, W., Shao, L., Shi, Z., Chen, J., Yang, L., & Wang, Z. (2010). Individual particle analysis of aerosols collected under haze and non-haze conditions at a high-elevation mountain site in North China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13), 6407–6420. doi:10.5194/acp-11-11733-2011.
- Lim, C. H., Ryu, J., Choi, Y., Jeon, S. W., & Lee, W., K. (2020). Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998–2016). *Environment International*, 1-12. doi:10.1016/j.envint.2020.106011.
- Maskey, S., Chae, H., Lee, K., Dan, P. N., Khoi, T. T. & Park, K. (2016). Morphological and elemental properties of urban aerosols among PM events and different traffic systems. *Journal of Hazardous Materials*, 317, 108–118.
- Matawle L. J., Pervez, S., Dewangan, S., Shrivastava, A., Tiwari, S., Pant, P., Deb, K. M. & Pervez, Y. (2015). Characterization of PM_{2.5} source profiles for traffic and dust sources in

- Raipur, India. *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 2537–2548. doi:10.4209/aaqr.2015.04.0222.
- Murphy, D. M., Cziczo, D. J., Froyd, K. D., Hudson, P. K., Matthew, B. M., Middlebrook, A. M., Peltier, R. E., Sullivan, A., Thomson, D. S. & Weber, R. J. (2006). Single-particle mass spectrometry of tropospheric aerosol particles. *Journal of Geophysical Research*, 111, D23S32. doi:10.1029/2006JD007340.
- Pipal, A., Kulshrestha, A. & Taneja, A. (2011). Characterization and morphological analysis of airborne PM2.5 and PM10 in Agra located in north central India. *Atmospheric Environment*, 45, 3621–3630. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.03.062.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(46), 7520–7540. doi: 10.1002/anie.200501122.
- Posfai, M., Simonics, R., Li, J., Hobbs, v. P. & Buseck R. P. (2003). Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa:1. Compositions and size distributions of carbonaceous particles. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D13), 8483. doi:10.1029/2002JD002291.
- Quijano, C. F. M., Mateus, L. V., Saint'Pierre, D. T., Bott, S. I. & Gioda, A. (2019). Exploratory and comparative analysis of the morphology and chemical composition of PM2.5 from regions with different socioeconomic characteristics. *Microchemical Journal*, 147, 507–515. doi:10.1016/j.microc.2019.03.071.
- Szidat, S., Ruff, M., Perron, N., Wacker, L., Synal, H.-A., Hallquist, M., Shannigrahi, A. S., Yttri, K. E., Dye, C., & Simpson, D. (2009). Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Goteborg, Sweden. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 1521–1535.
- Usman, F.; Zeb, B.; Alam, K.; Huang, Z.; Shah, A.; Ahmad, I.; Ullah, S. 2022. In-Depth Analysis of Physicochemical Properties of Particulate Matter (PM10, PM2.5 and PM1) and Its Characterization through FTIR, XRD and SEM–EDX Techniques in the Foothills of the Hindu Kush Region of Northern Pakistan. *Atmosphere*, 13, 124. doi:10.3390/atmos13010124.
- Viana, M., Kuhlbusch, T. A. J., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R. M., Hopke, P. K., et al. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and

- results. *Journal of Aerosol Science*, 39(10), 827–849. doi:10.1016/j.jaerosci.2008.05.007.
- Zeb, B., Alam, K., Sorooshian, A., Blaschke, T., Ahmad, I., & Shahid, I. (2018). On the morphology and composition of particulate matter in an Urban environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 1431–1447. doi: [10.4209/aaqr.2017.09.0340](https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.09.0340).
- Zhai, M., Kuang, Y., Liu, L., He, Y., Luo, B., Xu, W., Tao, J., Zou, Y., Li, C., Xu, H., & Deng, X. (2023). Insights into characteristics and formation mechanisms of secondary organic aerosols in the Guangzhou urban area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 5119–5133. Doi:10.5194/acp-23-5119-2023.
- Zhang, J., Su, Y., Chen, C., Guo, W., Tan, Q., Feng, M., Song, D., Jiang, T., Chen, Q., Li, Y., Wang, Y., Huang, X., Han, L., Wu, W. & Wang, G. (2024). Chemical composition, sources and formation mechanism of urban PM_{2.5} in Southwest China: a case study at the beginning of 2023. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 2803–2820. doi:10.5194/acp-24-2803-2024.
- Zhang, Q., Wang, Y., Xiao, Q., Geng, G., Steven, J. Q., Liu, X., Yang, J., Liu, J., Huang, W., He, C., Luo, B., Martin, R.V., Brauer, M., Randerson, J.T., & He, K. (2023). Long-range PM_{2.5} pollution and health impacts from the 2023 Canadian wildfires. *Nature*, 645, 672–678. doi:[10.1038/s41586-025-09482-1](https://doi.org/10.1038/s41586-025-09482-1).
- Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, E., Hu, M., & Wang, Y., (2019). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical Reviews*, 115(10), 3803–3855.