



กรมควบคุมโรค
Department of Disease Control



รายงานการวิจัยเรื่อง ❖

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2565

Health Risk Assessment of Inhalation Exposure to Ambient Size-Fractionated PM-bound PAHs during Smog Season in Chiang Mai Urban Area in 2022

ผู้วิจัย

นายวิทวัส อินเลี่ยน
นางสาวณัฏฐิพร ยะบั้ง
นางดวงเดือน เทพนวล
นางสาวสมพร จันทร

ปี 2565



สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่ กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข



รายงานการวิจัยเรื่อง

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะ
กับอนุภาคฝุ่นแขวนลอยในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่
ปี 2565

Health Risk Assessment of Inhalation Exposure to Ambient Size-
Fractionated PM-bound PAHs during Smog Season in Chiang Mai
Urban Area in 2022

ผู้วิจัย

นายวิฑูรย์ อินเสียน

นางสาวณัฏฐิพร ยะบึง

นางดวงเดือน เทพนวล

นางสาวสมพร จันทระ

สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่

กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข

พ.ศ. 2565

คำนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) เรื่อง การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2565 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสารมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ โดยหาความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และความเข้มข้นสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และทำการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 พื้นที่เขตเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพและการตอบสนองของเซลล์เยื่อบุผิวปอดจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศในฝุ่นแยกขนาดในภาคเหนือของประเทศไทย ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย กรมควบคุมโรค โครงการวิจัยไม่เกี่ยวกับมนุษย์ วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2565 ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก กองทุนวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองนวัตกรรมและวิจัย กรมควบคุมโรค ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565-2566

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจที่จะทำการศึกษา สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการพิจารณากำหนดแผน มาตรการ และแนวทางในการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน รวมถึงใช้เป็นข้อมูลสำหรับสื่อสารความเสี่ยง และแจ้งเตือนประชาชนเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากสารมลพิษทางอากาศในพื้นที่ได้ต่อไป

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นแยกขนาด ความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน(พีเอเอช) ที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในบรรยากาศช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในอนุภาคฝุ่นทางการหายใจ เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) ด้วยการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในอากาศ ต่อเนื่อง 48 ชั่วโมงด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นที่มีอัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที สามารถแยกอนุภาคฝุ่นได้ 9 ขนาด ได้แก่ 10.0-9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43 และ <0.43 ไมครอน ทำการเก็บตัวอย่างในพื้นที่เขตเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เครื่องมือเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นติดตั้งบนชั้นดาดฟ้าของอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในช่วงฤดูหมอกควัน (กุมภาพันธ์-เมษายน) ปี 2565 ทำการหาความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นแยกขนาดด้วยวิธีซิงเกิ้ลน้ำหนัก จากนั้นนำกระดาศกรองที่ทำกรเก็บตัวอย่างมาสกัดด้วยตัวทำละลาย และทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารพีเอเอช 16 ชนิด โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจตามแนวทางขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (U.S. EPA) ผลการวิจัย พบว่า ความเข้มข้นฝุ่นรวมทั้ง 9 ขนาด (PM₁₀) อยู่ระหว่าง 36.86-126.87 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เฉลี่ย 84.28±27.32 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน มีสัดส่วนสูงสุดร้อยละ 18.08 สารพีเอเอชรวมที่พบใน PM₁₀ มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 1.30-3.19 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (เฉลี่ย 2.14±0.51 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) พบสัดส่วนสูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน ร้อยละ 20.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบว่า มีความสัมพันธ์กันที่อนุภาคฝุ่นรวม (PM₁₀) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน และอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสสารพีเอเอชผ่านการหายใจพบมีค่าความเสี่ยงในระดับปานกลาง ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงเท่ากับ 7.19×10^{-5} และพบค่าความเป็นพิษ (TEQ) สูงสุดในฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมครอน เมื่อพิจารณาค่าความเสี่ยง (ILCR) ตามกลุ่มวัยพบว่า วัยเด็ก (1-15 ปี) มีค่าความเสี่ยงสูงกว่าวัยผู้ใหญ่ (16-70 ปี) 1-2 เท่า สรุปได้ว่าหากความเข้มข้นของฝุ่นละเอียดมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้น จะเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มอาการระบบทางเดินหายใจและความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจโดยเฉพาะกลุ่มวัยเด็ก

คำสำคัญ: ความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจ, อนุภาคฝุ่นแยกขนาด, สารพีเอเอช, ฤดูหมอกควัน

Abstract

The objectives of this research were to investigate size-fractionated particulate matter and their polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) concentrations in ambient air during smog haze season of 2022. It examines the relationship between particulate matter concentration and PAHs associated with different particle sizes and to assess human health risks from respiratory exposed to particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbon. The study design is experiment research. The particulate matter in ambient air were continuously probed for 48 hours by using a cascade impactor air sampler with a flow rate of 28.3 liters per minute. The sampler can separate particles into nine size ranges: 10.0-9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43 and <0.43 microns. The sampling was conducted in an urban area of Chiang Mai Province, with the sampler installed on the rooftop of a nine-story building (30th Anniversary Building) in the Faculty of Science, Chiang Mai University. Samples were collected during the smog haze season (February-April) of 2022. The size-fractionated particulate matter concentration was determined using the gravimetric method. The collected filter samples were then extracted using a solvent and analyzed for 16-PAHs compounds using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Health risk assessment for respiratory exposure was conducted following the U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) guidelines. The results showed that the concentrations of total PM (PM₁₀) ranged from 36.86-126.87 microgram per cubic meter (average 84.28±27.32 microgram per cubic meter). The PM concentration was found to be highest in particle size ranged 0.65-0.43 micron, accounted for 18.08%. The concentrations of total PAH in all PM sizes ranged from 1.30-3.19 nanogram per cubic meter (average 2.14±0.51 nanogram per cubic meter). The highest average concentration of PAHs was found in particle size ranged 0.65-0.43 micron, accounted for 20.37%. The relationship between concentration of particulate matter and to total PAH concentration attached to each particle size was found in total PM (PM₁₀), particles size range 3.3-2.1 micron, and 1.1-0.65 micron were statistically significant ($p<0.05$). The results from health risk assessment of inhalation exposed to PAHs showed that the inhalation cancer risk was moderate with an average value of 7.19×10^{-5} . The highest toxicity equivalent concentration (TEQ) was found in fine particles with the particle size range lowered than 2.1 micron. The incremental lifetime cancer risk (ILCR) in children group (1-15 years) was about 1-2 times higher than in adult group (16-70 years). To sum up all the investigation results, the high

concentration of fine particles found in ambient air leads to high respiratory health risk and the high inhalation the high cancer risk, especially, in children group.

Keyword: Respiratory health risk, Health risk assessment, Size-fractionated particulate matter, PAHs, Smog haze season

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ ด้วยความกรุณาของแพทย์หญิงเสาวนีย์ วิบุลสันติ ผู้อำนวยการสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่ นายแพทย์นัฐพนธ์ เอกภักษ์รุ่งเรือง รองผู้อำนวยการสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่ และนางสาวเมตตา คำอินทร์ หัวหน้ากลุ่มโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่ ที่ได้กรุณาให้ดำเนินการวิจัย ให้คำปรึกษา แนะนำในการทำวิจัย พร้อมทั้งตรวจแก้ไขและปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี และศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์เจ้าหน้าที่ในเป็นผู้ร่วมวิจัย อนุเคราะห์สถานที่ในการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างฝุ่นแยกขนาด ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่อนุเคราะห์เจ้าหน้าที่เป็นผู้ร่วมวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ของหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือในด้านต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นักวิจัยทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการเก็บตัวอย่างฝุ่นแยกขนาด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในอนุภาคฝุ่นแยกขนาด รวมถึงการจัดทำรายงานวิจัยเล่มนี้จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์ และบรรลुวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ทุกประการ

สุดท้ายขอขอบคุณ กองทุนวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองทุนนวัตกรรมและวิจัย กรมควบคุมโรค ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

คำนำ

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ง

สารบัญ.....จ

สารบัญตาราง.....ช

สารบัญรูป.....ซ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....3

1.4 นิยามศัพท์.....3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ สถานการณ์มลพิษทางอากาศในภาคเหนือ และผลกระทบต่อสุขภาพ.....5

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่น.....9

2.3 แนวคิดเกี่ยวกับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช).....13

2.4 แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ.....17

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....22

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....27

3.1 ประชากรที่จะศึกษา.....27

3.2 ขนาดตัวอย่างและวิธีสุ่มตัวอย่าง.....27

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....27

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	38
4.1 อนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศ.....	38
4.2 คุณลักษณะของการวิเคราะห์หาสารพีเอเอช โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี - แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS).....	42
4.3 สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) ที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะ กับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	51
4.5 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการเป็นมะเร็งจากการหายใจ.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 อภิปรายผล.....	60
5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	61
5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	61
5.5 การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ภาคผนวก.....	69

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ชนิดของสารมลพิษอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพ.....	6
ตารางที่ 2	ชนิด ตัวอย่าง จำนวนวงแหวนเบนซีน ศักยภาพในการก่อมะเร็ง และสูตรโครงสร้างของสารพีเอเอช.....	14
ตารางที่ 3	ขนาดอนุภาคฝุ่นที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่าง Eight-stage cascade impactor.....	29
ตารางที่ 4	ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ประเมินความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งจากการหายใจจำแนกรายกลุ่มอายุ.....	37
ตารางที่ 5	ความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และสัดส่วนของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	40
ตารางที่ 6	ค่า LOD LOQ %Recovery และ %RSD ของการวิเคราะห์สารพีเอเอช 16 ชนิดด้วยเครื่อง GC-MS.....	44
ตารางที่ 7	ความเข้มข้นและสัดส่วนของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	46
ตารางที่ 8	ความเข้มข้นและสัดส่วนของสารพีเอเอช 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นรวม.....	48
ตารางที่ 9	สัดส่วนของสารพีเอเอช 16 ชนิด จำแนกตามอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	50
ตารางที่ 10	ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	51
ตารางที่ 11	ค่าเฉลี่ยความเป็นพิษของสารพีเอเอช (TEQ) และค่าเฉลี่ยความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งจากการหายใจ (ICR) ของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด.....	52

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ ณ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) 10 ปีย้อนหลัง (2554-2564).....	9
รูปที่ 2	อนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับเส้นผมมนุษย์ และขนาดของวัตถุ.....	10
รูปที่ 3	ศักยภาพในการตกสะสมของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในทางเดินหายใจของมนุษย์.....	13
รูปที่ 4	สถานที่เก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในพื้นที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	28
รูปที่ 5	รูปถ่ายสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวที่ตั้งอยู่บนดาดฟ้าอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	28
รูปที่ 6	เครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด Eight-stage cascade impactor.....	30
รูปที่ 7	ตัวอย่างกระดาศกรองชนิดคอวตซ์ที่ใช้สำหรับการเก็บตัวอย่างฝุ่นแต่ละขนาด.....	31
รูปที่ 8	เครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สำหรับชั่งกระดาศกรอง..	31
รูปที่ 9	เครื่องอัลตราโซนิก สำหรับสกัดสารพีเอเอชออกจากกระดาศกรอง.....	33
รูปที่ 10	เครื่องระเหยสุญญากาศ.....	34
รูปที่ 11	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A-5977E.....	34
รูปที่ 12	ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานพีเอเอช ทั้ง 16 ชนิดและสารมาตรฐานภายใน 2 ชนิดของสารละลายมาตรฐานพีเอเอช ที่ความเข้มข้น 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร.....	35
รูปที่ 13	ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด จำแนกตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง.....	39
รูปที่ 14	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM_{10} จากสถานีกรมควบคุมมลพิษกับความเข้มข้น PM_{10} จากการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด.....	41
รูปที่ 15	รูปแบบการกระจายของปริมาณอนุภาคฝุ่นเฉลี่ยในฤดูหมอกควัน ปี 2565.....	41
รูปที่ 16	กราฟมาตรฐาน สมการเส้นตรง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสารละลายพีเอเอชทั้ง 16 ชนิด.....	42
รูปที่ 17	ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิด เปรียบเทียบกับความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นรวม 9 ขนาด จำแนกตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง.....	46
รูปที่ 18	รูปแบบการกระจายของความเข้มข้นสารพีเอเอชรวมเฉลี่ยที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในฤดูหมอกควัน ปี 2565.....	47
รูปที่ 19 (ก-ญ)	ค่าประมาณการความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตลอดช่วงชีวิต (ILCR) จำแนกตามกลุ่มอายุ และขนาดอนุภาคฝุ่น.....	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน โดยเฉพาะผลกระทบต่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ การท่องเที่ยว และสิ่งแวดล้อม พื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย เกิดปัญหามลพิษทางอากาศ หรือ ภาวะหมอกควัน เป็นประจำทุกปีในช่วงฤดูร้อน (กุมภาพันธ์-เมษายน) โดยมีแหล่งกำเนิดหลักมาจากการเผาในที่โล่ง เช่น เผาเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และไฟฟ้า ทั้งที่เกิดจากพื้นที่ในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ก่อให้เกิดมลพิษข้ามแดน รวมถึงลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ในภาคเหนือของประเทศไทย เช่น พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งตั้งอยู่ใน “แอ่งเชียงใหม่-ลำพูน” ถูกล้อมรอบด้วยแนวภูเขาสูง ประกอบกับสภาวะอากาศนิ่งในช่วงฤดูแล้ง ทำให้ฝุ่นละอองแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้นานโดยไม่ตกลงสู่พื้นดิน ก่อให้เกิดการสะสมของมลพิษในบริเวณแอ่ง สารมลพิษทางอากาศหลักที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อนคือ อนุภาคฝุ่น (Particulate matter; PM) สถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) จากข้อมูลสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษที่ตั้งอยู่บริเวณศาลากลางจังหวัดเชียงใหม่ (35t) 10 ปีย้อนหลัง (1 มกราคม 2554 – 31 ธันวาคม 2564) พบรูปแบบการเกิดอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ เหมือนกันทุกปี จะเริ่มสูงขึ้นเกินค่ามาตรฐานของประเทศไทยในเดือนธันวาคม และพบความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นสูงสุดเดือนมีนาคม จากนั้นจะลดลงในเดือนพฤษภาคมเป็นประจำทุกปี

ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จะมีความสัมพันธ์กับจุดความร้อน และปรากฏการณ์ของภูมิอากาศในแต่ละปี (Climate phenomena) ปีที่มีความเข้มข้นของฝุ่นสูงจะพบจุดความร้อนในพื้นที่ 8 จังหวัดภาคเหนือตอนบน รวมถึงจุดความร้อนในพื้นที่ประเทศเพื่อนบ้านเพิ่มสูงขึ้นด้วย และในปีที่มีการเกิดปรากฏการณ์เอลนีโญหรือสภาวะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลในแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรและความผันแปรของระบบอากาศในซีกโลกใต้ที่อยู่ในสภาวะเอลนีโญ (El Niño) กล่าวคือ อุณหภูมิผิวน้ำทะเลบริเวณตอนกลางและตะวันออกของแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรอุ่นขึ้นผิดปกติ จะพบความเข้มข้นของฝุ่นสูงด้วยเช่นกัน (Yabueng *et al.*, 2020) ฝุ่นที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจะพบสัดส่วนฝุ่นละเอียดมากกว่าฝุ่นหยาบ มากกว่าร้อยละ 70 ในช่วงฤดูการเผาในจังหวัดเชียงใหม่ (สมพร จันทระ และคณะ, 2561) ฝุ่นละเอียดส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้มากกว่าฝุ่นหยาบ หลายการศึกษาวิจัยพบว่า ฝุ่นละอองในบรรยากาศประกอบด้วยขนาดหลายอนุภาค อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดแตกต่างกันสามารถเข้าสู่ร่างกาย และสะสมในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้แตกต่างกัน การรับสัมผัสอนุภาคฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูง เป็นระยะเวลานานจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรังและโรคมะเร็งปอด (Kim *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2019) โดยอนุภาคฝุ่นหยาบที่มีขนาดอนุภาค ระหว่าง 10.0-5.8 ไมครอน จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนบน คือ รูจมูกและช่องจมูก อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน จะตกสะสมบนคอหอย (pharynx) อนุภาค

ฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลม และหลอดลมฝอยส่วนต้น (trachea and primary bronchi) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลมฝอยส่วนกลาง (secondary bronchi) อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลมฝอยส่วนปลาย (terminal bronchi) และอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน ตกสะสมในถุงลม (alveoli) แล้วสามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดในร่างกายของมนุษย์ได้ โดยเฉพาะฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน ซึ่งเรียกว่า ฝุ่นระดับนาโน (Löndahl *et al.*, 2006; Sarigiannis *et al.*, 2015) ทั้งนี้ไม่เพียงแต่อนุภาคฝุ่น แต่องค์ประกอบทางเคมีที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นที่มีความเป็นพิษ เช่น สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) มักจะเกาะกับฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก ย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพเช่นกัน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีศักยภาพในการก่อมะเร็งในมนุษย์

สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) หรือสารพีเอเอช (PAHs) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน แหล่งกำเนิดของพีเอเอชที่เข้าสู่สิ่งแวดล้อม เกิดจากการเผาไหม้สารอินทรีย์ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ถ่านหิน การเผาไหม้ชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์ รวมถึงการเผาเศษวัสดุทางการเกษตรและเผาป่า (Zhang *et al.*, 2019) องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ได้กำหนดสารพีเอเอช 16 ตัวในบรรยากาศ เป็นสารหลักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และองค์การอนามัยโลกกำหนดค่าระดับความเข้มข้นที่เป็นระดับเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งทางการหายใจ ไม่เกิน 1 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (World Health Organization (WHO), 2000) สารพีเอเอชโดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยเกิดพิษแบบเฉียบพลัน หากมีการสัมผัสผิวนานๆจะทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และตา หากได้รับสัมผัสเป็นระยะเวลายาวนานจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง เนื่องจากสารพีเอเอชมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (Goudarzi *et al.*, 2021)

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการติดตามตรวจสอบสารมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เพื่อเป็นองค์ความรู้สำหรับสื่อสารความเสี่ยงต่อสุขภาพให้กับประชาชนในการป้องกันอันตรายจากสารมลพิษทางอากาศ รวมถึงเป็นข้อมูลสำหรับกำหนดนโยบายให้หน่วยงานสาธารณสุขทั้งในภาครัฐ ภาคเอกชน องค์กรอิสระ ในการเฝ้าระวัง ป้องกันเพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพจากปัญหามลพิษทางอากาศ สำหรับประชาชนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

1.2.3 เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านสถานที่

1) สถานที่ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด

สถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราว ตั้งอยู่ในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ละติจูด คือ $18^{\circ} 48' 5.40''\text{N}$ ลองจิจูดคือ $98^{\circ} 57' 12.18''\text{E}$ ที่มีความสูง 373 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล บนชั้น ดาดฟ้าของอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งมีความสูงประมาณ 30 เมตร จากพื้นดิน

2) สถานที่ทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1.3.2 ขอบเขตด้านระยะเวลา

1) ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่น

ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูหมอกควันปี 2565 เดือนกุมภาพันธ์-เมษายน 2565

2) ระยะเวลาในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

พฤษภาคม - ธันวาคม 2565

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

มลพิษทางอากาศ หมายถึง ภาวะอากาศที่มีสารหรืออนุภาคเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติ ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

ปัญหาหมอกควัน หมายถึง ปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากการสะสมของควันและฝุ่นละอองในบรรยากาศ

อนุภาคฝุ่น (Particulate matter; PM) หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณอยู่ระหว่าง 0.001 ไมครอนเป็นขนาดของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจนถึง 500 ไมครอน

อนุภาคฝุ่นหยาบ (Coarse particles; PM_{10}) หมายถึง อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมครอน และมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมครอน ($2.5 \mu\text{m} \leq d_{ae} \leq 10 \mu\text{m}$)

อนุภาคฝุ่นละเอียด (Fine particles; $\text{PM}_{2.5}$) หมายถึง อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมครอน และมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 ไมครอน ($0.1 \mu\text{m} \leq d_{ae} < 2.5 \mu\text{m}$)

อนุภาคฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine particles; $\text{PM}_{0.1}$) หมายถึง อนุภาคฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine particles; $\text{PM}_{0.1}$) เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 ไมครอน ($d_{ae} < 0.1 \mu\text{m}$)

สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน อณูมีปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวสูง ความดันไอต่ำ ละลายน้ำได้น้อยมาก โดยการละลายจะขึ้นอยู่กับการมวล เป็นสารที่เฉื่อย และสามารถสลายตัวในสิ่งแวดล้อมด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง และปฏิกิริยาที่เกิดกับไนโตรเจนไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดซัลฟิวริก โอโซน และไฮดรอกซี เรดิคัล

ความเสี่ยง (Risk) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งคุกคามสุขภาพ (Health hazard) และการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามนั้นๆ (Exposure)

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health Risk Assessment; HRA) หมายถึง กระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ คาดการณ์ และประเมินระดับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับสุขภาพของบุคคลหรือประชาชนจากปัจจัยเสี่ยงต่างๆ เช่น สารเคมี มลพิษทางอากาศ พฤติกรรมสุขภาพ หรือปัจจัยทางชีวภาพและกายภาพ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

1.5.2 ได้ข้อมูลความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด โดยอาศัยข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นรูปธรรม สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการวางแผนและพัฒนามาตรการป้องกันผลกระทบทางสุขภาพจากมลพิษทางอากาศในพื้นที่

1.5.3 ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพิจารณากำหนดแผน มาตรการ และแนวทางในการจัดการปัญหาหมอกควันและลดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2565 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. แนวคิดเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ สถานการณ์มลพิษทางอากาศในประเทศไทย และผลกระทบต่อสุขภาพจากมลพิษทางอากาศ
2. แนวคิดเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่น
3. แนวคิดเกี่ยวกับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช)
4. แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ สถานการณ์มลพิษทางอากาศในภาคเหนือ และผลกระทบต่อสุขภาพ

2.1.1 ความหมายมลพิษทางอากาศ สารมลพิษทางอากาศ และปัญหาหมอกควัน

มลพิษทางอากาศ หมายถึง ภาวะอากาศที่มีสารหรืออนุภาคเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม (กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค, 2558)

สารมลพิษทางอากาศ หมายถึง สิ่งแปลกปลอมในอากาศที่อาจจะอยู่ในรูปของอนุภาคหรือก๊าซที่ฟุ้งกระจายในอากาศ (กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค, 2558)

ปัญหาหมอกควัน หมายถึง ปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากการสะสมของควันและฝุ่นละอองในบรรยากาศ (กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค, 2558)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปัญหามลพิษทางอากาศ

การเกิดปัญหามลพิษทางอากาศ หรือ ปัญหาหมอกควัน มักเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน ในช่วงเดือนมกราคม-เมษายน เป็นประจำทุกปี โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือตอนบน โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหามลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก (Thepnuan *et al.*, 2019; Yabueng *et al.*, 2020) คือ

- 1) การเผาไหม้ในพื้นที่โล่งแจ้ง (Open Burning)

การเผาไหม้ในพื้นที่โล่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปัญหาหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน โดยแหล่งกำเนิดหลัก ได้แก่ 1. การเผาในพื้นที่เกษตรกรรม ประกอบด้วย การเผาตอซังข้าวโพด ฟางข้าว และวัชพืชหลังการเก็บเกี่ยว การเผาป่าเพื่อเตรียมพื้นที่ทำการเกษตรในระบบไร่หมุนเวียน 2. ไฟป่า เกิดจากการเผาเพื่อล่าสัตว์ และหาของป่า และ 3. การเผาขยะมูลฝอย

2) สภาพอุตุนิยมวิทยาและภูมิประเทศ

ภาคเหนือตอนบนมีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงและหุบเขา มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ ทำให้หมอกควันสะสมในพื้นที่ได้นาน เช่น จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งอยู่ในแอ่ง “เชียงใหม่-ลำพูน” ประกอบกับในช่วงฤดูแล้ง อากาศแห้งและลมนิ่งสงบ ทำให้หมอกควันไม่ถูกพัดกระจายออกไปจากแอ่ง รวมถึงปัจจัยเรื่องอุณหภูมิกลับหัว (Temperature Inversion) เกิดขึ้นเมื่ออากาศชั้นล่างบริเวณพื้นดินเย็นกว่าด้านบน ทำให้หมอกควันและมลพิษลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศไม่ได้ เกิดการสะสมของหมอกควัน

3) การสะสมของมลพิษจากภายในประเทศและมลพิษข้ามพรมแดน

ปัญหาหมอกควัน ไม่ได้เกิดจากการเผาไหม้ภายในประเทศเท่านั้น แต่เกิดขึ้นจากมลพิษข้ามพรมแดนจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น เมียนมา ลาว และกัมพูชา ซึ่งมีการเผาเพื่อการเกษตร และไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกัน ประกอบกับทิศทางลมพัดพามลพิษเข้าสู่พื้นที่ภาคเหนือ โดยเฉพาะในจังหวัดที่อยู่ติดกับชายแดน เช่น เชียงราย เชียงใหม่ และแม่ฮ่องสอน

2.1.4 ชนิดของสารมลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพ

สารมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากมลพิษทางอากาศ มักเป็นสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น การเผาวัสดุทางการเกษตร เผาไหม้ป่า น้ำมันเชื้อเพลิง ฯลฯ สารมลพิษทางอากาศที่พบมากโดยส่วนใหญ่ในประเทศไทย มีหลายชนิด ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพแตกต่างกัน จากการทบทวนข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า มลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ประกอบด้วย สารที่อยู่ในรูปอนุภาค ได้แก่ อนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ และอยู่ในรูปก๊าซ ไอระเหยต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และโอโซน รวมถึงสารประกอบอื่นๆที่สำคัญที่เกาะอยู่กับอนุภาคฝุ่น ได้แก่ สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารโลหะหนัก รายละเอียดและผลกระทบต่อสุขภาพของสารมลพิษทางอากาศชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของสารมลพิษทางอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพ

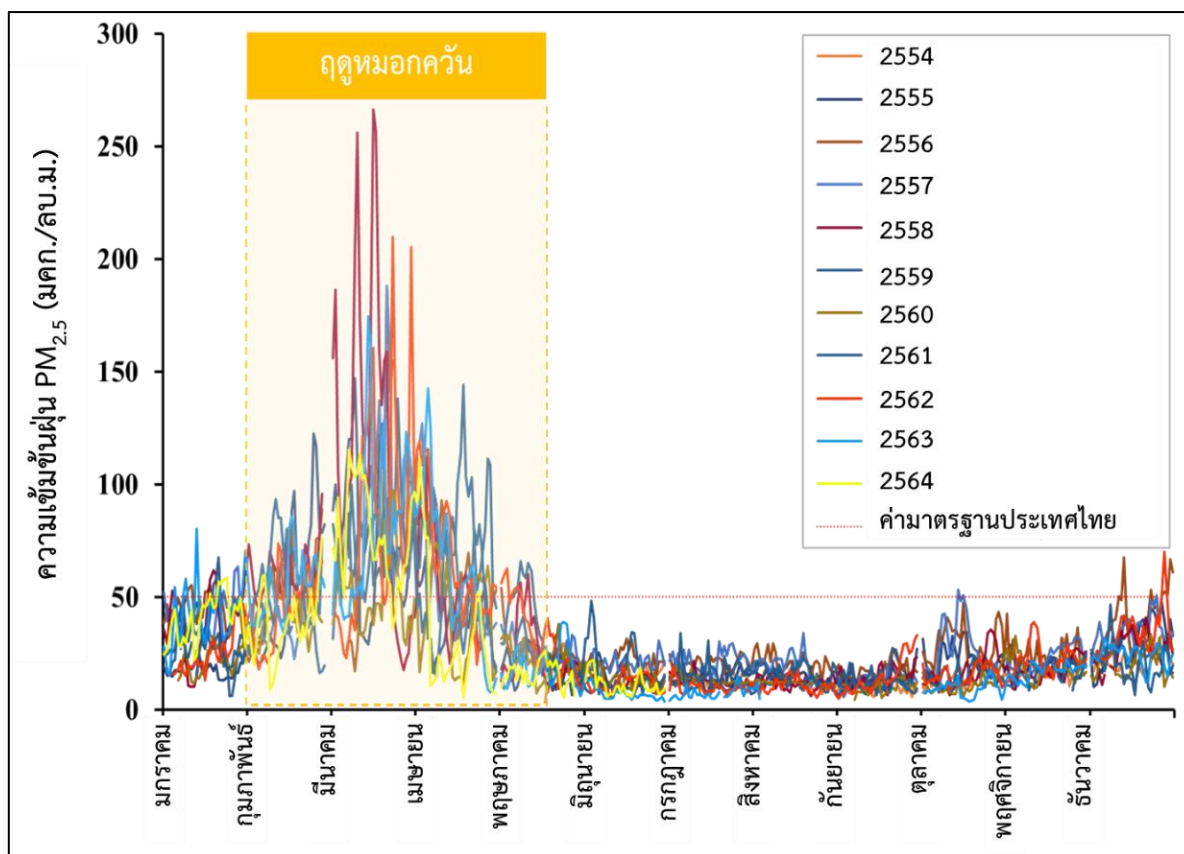
ชนิดสารมลพิษทางอากาศ	ผลกระทบต่อสุขภาพ
1. อนุภาคฝุ่น (Particulate Matter; PM)	หากสูดฝุ่นละอองเล็กเข้าสู่ร่างกาย จะเกิดผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ ตั้งแต่อาการไอ จาม มีน้ำมูก จนถึงการอักเสบของไซนัส เจ็บคอ หายใจลำบาก ทำให้หลอดลมอักเสบ ปอดเป็นพังผืดจากการระคายเคืองเรื้อรัง และอาจเกิดโรคมะเร็งของระบบทางเดินหายใจ
2. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	เมื่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าสู่ร่างกายทางระบบหายใจจะเป็นพิษต่อร่างกายเพราะเข้าแทนที่ออกซิเจนในกระแสโลหิต ทำให้ร่างกายไม่สามารถใช้ก๊าซออกซิเจนได้ การหายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในร่างกายทีละเล็กละน้อยเป็นประจำ จะทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ตาพร่า ความคิดสับสนประสาทหลอน ร่างกายอ่อนแอ หัวใจเต้นถี่ การหายใจถี่ขึ้น และเป็นลมหมดสติ ถ้ามีอาการมากๆ จะมี

ชนิดสารมลพิษอากาศ	ผลกระทบต่อสุขภาพ
	อาการชักกระตุก หัวใจเต้นอ่อนลง การหายใจชาลงและเสียชีวิตได้ กรณีที่ได้รับก๊าซพิษนี้ปริมาณสูงในทันทีทันใด จะทำให้มีอาการเริ่มแรกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ก่อนที่จะหมดสติและเสียชีวิตโดยไม่สามารถช่วยตัวเองได้
3. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	หากหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก เกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ
4. ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	ก๊าซนี้สามารถเข้าสู่ร่างกายได้จากการหายใจโดยตรงหรือในรูปไอระเหยของละอองกรดไนตริกหรือไนตรัส หลังจากที่ถูกก๊าซรวมตัวกับละอองน้ำหรือความชื้นแล้วทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อระบบทางเดินหายใจ ตา จมูก เยื่อเมือก และผิวหนังที่สัมผัสการสัมผัสที่ความเข้มข้นต่ำ เป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดสีเหลืองที่ผิวหนังและฟัน ถ้าได้รับความเข้มข้นสูงจะทำให้ระคายเคืองที่ปอดอย่างรุนแรงและเกิดเมทฮีโมโกลบินในเลือด การเกิดพิษเฉียบพลันทำให้รู้สึกไม่สบายตัว ผิวหนังเป็นสีเขียวคล้ำจากการขาดออกซิเจน ไอ หายใจขัด หายใจลำบาก เป็นไข้ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน และอาจถึงตายได้ ในกรณีที่ความเข้มข้นต่ำอาจระคายเคืองหลอดลม มีอาการปอดบวมน้ำ และเกิดโรคเรื้อรังได้ การสัมผัสกับของเหลวจะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงต่อตาและผิวหนัง
5. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคหลอดลมอักเสบเรื้อรัง รวมทั้งมีอาการคัดจมูก มีน้ำมูก เสียงแหบ แสบจมูก หายใจลำบาก เหนื่อยง่าย เป็นต้น
6. โอโซน (O ₃)	ก่อให้เกิดการระคายเคืองตา และระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ลดความสามารถในการทำงานของปอด
7. สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช)	สารพีเอเอชเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ ในสิ่งมีชีวิตชั้นสูงจะพบความเป็นพิษเรื้อรัง การได้รับแบบเรื้อรังทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบต่างๆของร่างกาย แต่อาการไม่รุนแรงมากนัก ความเป็นพิษของสารพีเอเอช คือความสามารถในการก่อมะเร็งในอวัยวะหลายชนิด แต่ไม่มีผลต่อการพัฒนาของตัวอ่อนและพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตโดยสารพีเอเอช เป็นสารก่อมะเร็งก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ส่งผลต่อระบบประสาทในเด็กทารก ทำให้มีอาการเซื่องซึม มีการร้องไห้ลดลง มี

ชนิดสารมลพิษอากาศ	ผลกระทบต่อสุขภาพ
	ดีซ่านในสมอง อาการเหล่านี้เกิดจากการขาดออกซิเจนในสมองซึ่งเป็นผลของภาวะโลหิตจากที่เกิดจากเม็ดเลือดแดงแตก
8. สารโลหะหนัก	-ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบหายใจ ส่วนใหญ่เป็นอนุภาคของโลหะที่แขวนลอยในอากาศ ได้แก่ เหล็ก ทังสแตน และซิลิเนียม -ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับอวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต และหัวใจ ธาตุโลหะที่เป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม วาเนเดียม นิกเกิล ทองแดง เงิน และแคดเมียม -เป็นพิษร้ายแรง จนเกิดความสามารถที่จะรักษาให้หายขาด ได้แก่ พรอท ตะกั่ว แมงกานีส สารหนู และพลวง สารพิษเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อระบบหัวใจและระบบประสาทส่วนกลาง

2.1.3 สถานการณ์มลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน

สถานการณ์มลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน โดยสารมลพิษอากาศหลักที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูหมอกควัน คือ อนุภาคฝุ่น (Particulate matter; PM) รูปแบบการเกิดอนุภาคฝุ่นในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน รวมถึงจังหวัดเชียงใหม่ จะมีรูปแบบเหมือนกันในทุกปี รูปที่ 1 เป็นข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น $PM_{2.5}$ ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ ณ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) 10 ปีย้อนหลัง (2554-2564) พบว่า ความเข้มข้นฝุ่นจะเริ่มสูงขึ้นเกินค่ามาตรฐานประเทศไทย (ไม่เกิน 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ในเดือนธันวาคม และจะมีความเข้มข้นสูงสุดในเดือนมีนาคม จากนั้นจะมีปริมาณลดลงในช่วงเดือนพฤษภาคมเป็นประจำทุกปี โดยความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในแต่ละปีจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความกดอากาศ รวมถึงจำนวนจุดความร้อนในประเทศ และประเทศเพื่อนบ้านที่เกิดขึ้นในแต่ละปี จากการศึกษาของณัตติพร และคณะ (Yabueng *et al.*, 2020) พบว่า ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จะมีความสัมพันธ์กับจุดความร้อน (Active fire hotspot count) และปรากฏการณ์ของภูมิอากาศในแต่ละปี (climate phenomena) กล่าวคือ ในปีที่มีความเข้มข้นของฝุ่นสูงจะพบจุดความร้อนในพื้นที่ 8 จังหวัดภาคเหนือตอนบน รวมถึงจุดความร้อนในพื้นที่ประเทศเพื่อนบ้านในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ด้วย รวมถึงปีที่เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) จะพบความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นสูงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 1 ความเข้มข้นของฝุ่น $PM_{2.5}$ จากสถานีตรวจวัดของกรมควบคุมมลพิษ ณ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) 10 ปีย้อนหลัง (2554-2564)

2.2 แนวคิดเกี่ยวกับอนุภาคฝุ่น

2.2.1 ความหมายของอนุภาคฝุ่น

อนุภาคฝุ่น (Particulate matter; PM) หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณอยู่ระหว่าง 0.001 ไมครอนเป็นขนาดของอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจนถึง 500 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดของทรายหยาบ เวลาที่อนุภาคมลสารเหล่านี้จะสามารถแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศมีค่าตั้งแต่ไม่กี่วินาทีจนถึงหลายๆ เดือนขึ้นอยู่กับขนาด นอกจากนี้อนุภาคมลสารจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารอื่นๆ ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคมลสารและสารเคมีที่จับอยู่บนอนุภาคมลสาร ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่สามารถก่อมะเร็งหรือเป็นอันตรายต่อพืชต่างๆ และยังมีผลกระทบต่อสุขภาพ ความเป็นอยู่ของมนุษย์อีกด้วย ฝุ่นก่อให้เกิดผลกระทบได้ 3 ทาง คือ ฝุ่นเป็นพิษเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีหรือลักษณะทางกายภาพ ฝุ่นเข้าไปรบกวนระบบหายใจและฝุ่นเป็นตัวพาหรือดูดซับสารพิษแล้วพาเข้าสู่ร่างกาย (กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค, 2558)

2.2.2 ขนาดของอนุภาคฝุ่น

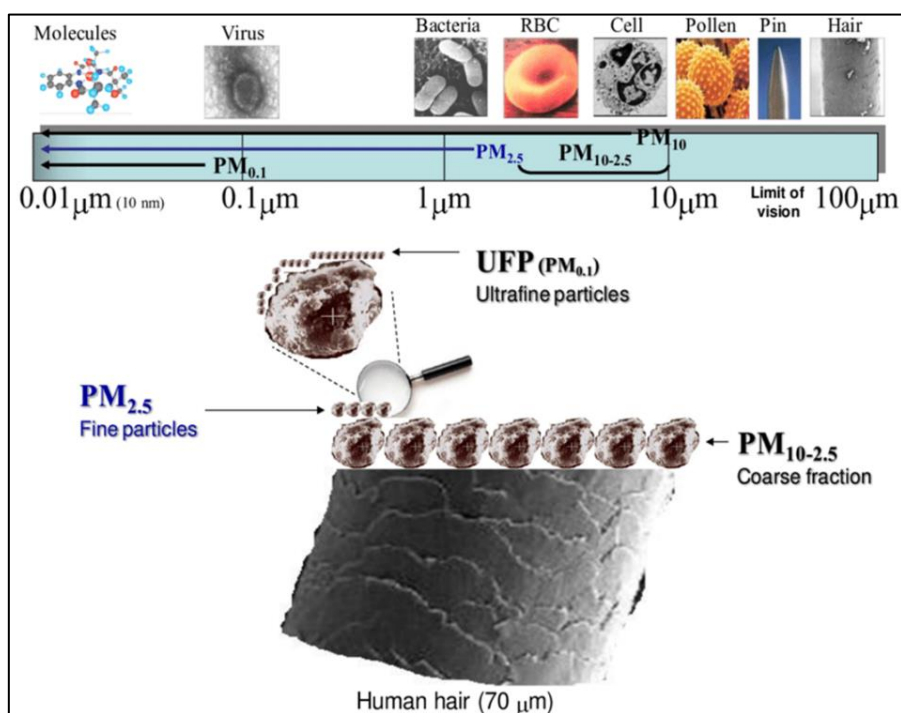
ตามองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (The United states of America Environmental Protection Agency; U.S. EPA) ได้แบ่งขนาดอนุภาคฝุ่น เป็น 3 ขนาดหลักตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น ได้แก่

1. อนุภาคฝุ่นหยาบ (Coarse particles; PM_{10}) เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมครอน และมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมครอน ($2.5 \mu m \leq d_{ae} \leq 10 \mu m$)

2. อนุภาคฝุ่นละเอียด (Fine particles; $PM_{2.5}$) เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 ไมครอน และมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 ไมครอน ($0.1 \mu m \leq d_{ae} < 2.5 \mu m$)

3. อนุภาคฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine particles; $PM_{0.1}$) เป็นอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (aerodynamic diameter (d_{ae})) อยู่ระหว่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 ไมครอน ($d_{ae} < 0.1 \mu m$)

รูปที่ 2 เปรียบเทียบอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดกับวัตถุต่างๆ โดยอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดมากกว่า 10 ไมครอน เปรียบเทียบขนาดเท่ากับ เกสรดอกไม้ เข็มหมุด หรือเส้นผม อนุภาคฝุ่นหยาบ เปรียบได้กับขนาดของเซลล์ หรือเม็ดเลือดแดง อนุภาคฝุ่นละเอียดเปรียบได้กับขนาดของแบคทีเรีย และอนุภาคฝุ่นละเอียดมากเปรียบได้กับขนาดของไวรัส หรืออนุภาคระดับโมเลกุล จากรูปที่ 2 ด้านล่างเป็นขนาดเส้นผมของมนุษย์ 1 เส้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 70 ไมครอน ฝุ่นหยาบมีขนาดประมาณ 1 ใน 7 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นผมมนุษย์ และอนุภาคฝุ่นละเอียด มีขนาดประมาณ 1 ใน 25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นผมมนุษย์ ขนาดของอนุภาคฝุ่นสามารถแบ่งแยกขนาดออกไปตามเครื่องมือเก็บตัวอย่างที่สามารถคัดแยกขนาดของอนุภาคได้ จากการศึกษาของ สมพร จันทระ และคณะ (2561) พบว่า ฝุ่นที่เกิดขึ้นในบรรยากาศจะพบสัดส่วนฝุ่นละเอียดมากกว่าฝุ่นหยาบ มากกว่าร้อยละ 70 ในช่วงฤดูการเผาในจังหวัดเชียงใหม่ นั้นแสดงว่า ในช่วงฤดูหมอกควัน จะพบอนุภาคฝุ่นละเอียดมากกว่าฝุ่นหยาบ



รูปที่ 2 อนุภาคฝุ่นขนาดต่างๆ เปรียบเทียบกับเส้นผมมนุษย์ และขนาดของวัตถุ

ที่มา : R. Bruce Urch, 2010

2.2.3 การกระจายของอนุภาคฝุ่น

การกระจายของอนุภาคฝุ่น จะใช้กราฟ log-log chart ระหว่าง $dC/d\log D_p$ และ D_p อธิบายการกระจายความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นในแต่ละขนาด (Kawanaka *et.al.*, 2009; LV *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018)

โดยที่ dC คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณของอนุภาคแต่ละขนาด

$d\log D_p$ คือ ค่าลอการิทึมของความกว้างของขนาดอนุภาคแต่ละชั้น

D_p คือ ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแต่ละชั้น

การกระจายของอนุภาคฝุ่น จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) Unimodal distribution หมายถึง การกระจายของอนุภาคฝุ่นที่มีกราฟของการแจกแจงของความเข้มข้นอยู่ในอนุภาคหลักเพียง 1 ขนาด เป็นการแจกแจงแบบสมมาตร มีรูปคล้ายระฆังคว่ำ
- 2) Bimodal distribution หมายถึง การกระจายของอนุภาคฝุ่นที่มีกราฟของการแจกแจงมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นอยู่ในอนุภาคสูงสุดอยู่ 2 ขนาด

โดยทั่วไป ลักษณะการกระจายของขนาดอนุภาคเกิดจากกลไกการเกิดของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด โดยอนุภาคฝุ่นละเอียด (Fine particles) จะเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ และการพอร์มรูปเป็นอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กผ่านกลไกการสะสมและการควบแน่นของไอระเหย ในขณะที่อนุภาคฝุ่นหยาบเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ การแขวนลอยของฝุ่นบนพื้นผิวและอนุภาคฝุ่นดิน โดยทิศทางลม

2.2.4 แหล่งกำเนิดอนุภาคฝุ่น

แหล่งกำเนิดอนุภาคฝุ่น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

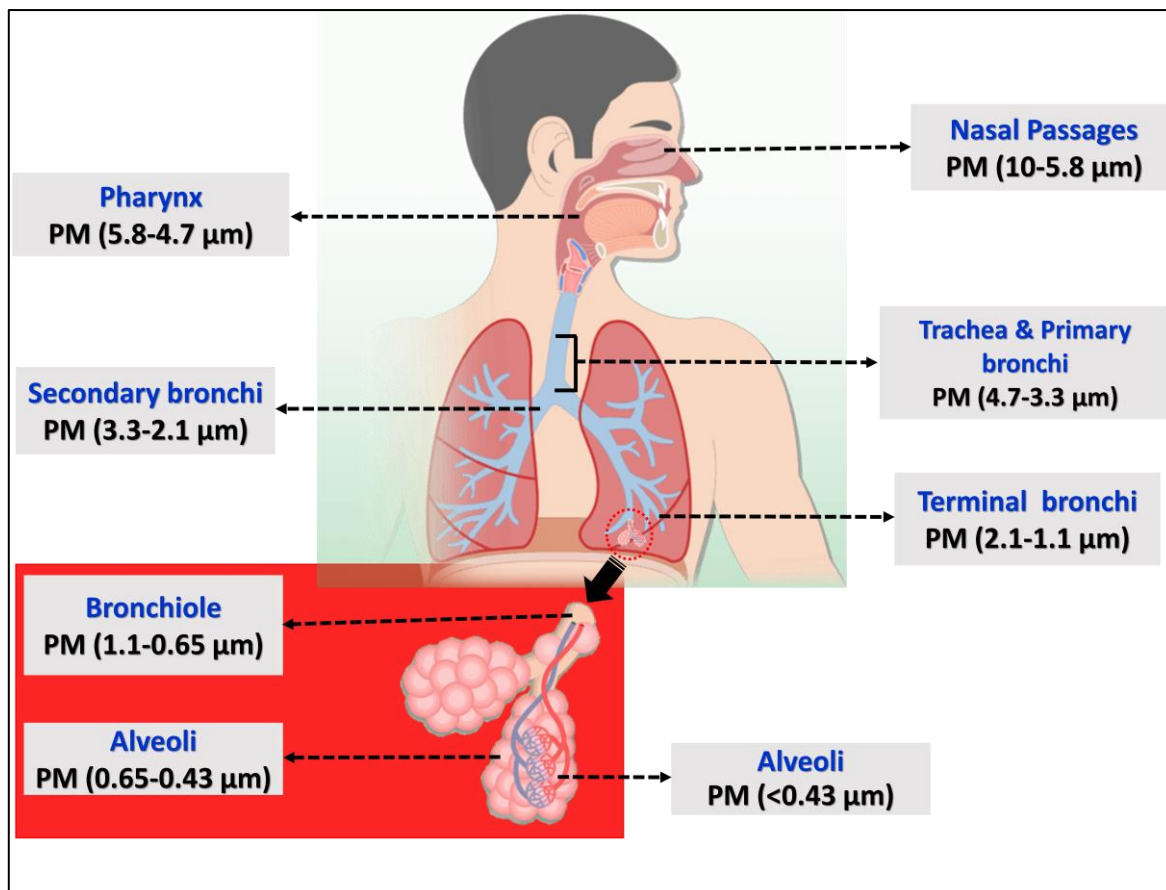
1. แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ ได้แก่ ฝุ่นละอองดินฟุ้งปลิวจากพื้นดินและพื้นที่เกษตรกรรม ไฟป่า เกลือทะเล ภูเขาไฟปะทุ ฝุ่นฟุ้งปลิวจากทะเลทราย ซึ่งมักจะรวมเป็นฝุ่นรวมที่มีขนาดใหญ่
2. แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิง การจราจร โรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า การก่อสร้าง การเผาชีวมวล (การเผาขยะ และการเผาในพื้นที่โล่ง) และการเกษตรกรรม รวมถึงแหล่งกำเนิดทางอ้อมจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งจัดเป็นฝุ่นทุติยภูมิ เกิดจากการรวมตัวของก๊าซมลพิษเป็นฝุ่นละอองละเอียดมาก จากกระบวนการรวมตัวของสารในบรรยากาศ

สำหรับแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) มีการศึกษาวิจัยโดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในการหาสัดส่วนแหล่งที่มาของฝุ่น โดยในปี 2562 Chansuebsri *et al.* (2024) ได้ทำการศึกษาสัดส่วนแหล่งที่มา และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่เขตเมืองเชียงใหม่ ทั้งในและนอกฤดูหมอกควัน โดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่น $PM_{2.5}$ ประกอบด้วย ไอออนละลายน้ำ คาร์บอนอินทรีย์ ธาตุคาร์บอน สารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต คาร์บอกซิเลต และโลหะ ใส่ในแบบจำลองผู้รับมลพิษ Positive Matrix Factorization (PMF) และแบบจำลอง Potential Source Contribution Function (PSCF) เพื่อศึกษาสัดส่วนแหล่งกำเนิด และแหล่งที่มาของฝุ่น $PM_{2.5}$ ในเมืองเชียงใหม่ พบว่า ในช่วงฤดูหมอกควัน มีค่าเฉลี่ยฝุ่นมาจาก 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ การเผาไหม้ชีวมวล ร้อยละ 51 ฝุ่นทุติยภูมิ ร้อยละ 23 ฝุ่นดิน ร้อยละ 14 และการจราจร ร้อยละ 13 ช่วงนอกฤดูหมอกควัน ค่าเฉลี่ยฝุ่นจะมาจากการจราจรเป็นหลัก ร้อยละ 76 ฝุ่นดิน

ร้อยละ 17 และการเผาชีวมวล ร้อยละ 7 เช่นเดียวกันกับในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปี 2550 พบว่า ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน บริเวณเขตดินแดงมาจากไอเสียรถยนต์ดีเซล ร้อยละ 52 จากการเผาชีวมวล ร้อยละ 35 และฝุ่นทุติยภูมิและอื่นๆ ร้อยละ 13 (Kim Oanh, 2007) และในปี 2560 มีการศึกษาวิจัย พบว่า ฝุ่น $PM_{2.5}$ บริเวณจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศกรมควบคุมมลพิษ และบริเวณจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศที่สถาบันเอไอที มาจากไอเสียรถยนต์ดีเซล ร้อยละ 20.8-29.2 จากการเผาชีวมวล ร้อยละ 24.6-37.8 ฝุ่นทุติยภูมิและอื่นๆ ร้อยละ 15.8-20.7 (Kim Oanh, 2017)

2.2.5 ผลกระทบต่อสุขภาพ

อนุภาคฝุ่นในบรรยากาศประกอบด้วยอนุภาคหลายขนาด อนุภาคฝุ่นที่มีขนาดแตกต่างกันสามารถเข้าสู่ร่างกาย และตกสะสมในระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้แตกต่างกัน การรับสัมผัสอนุภาคฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูง เป็นระยะเวลานานจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว เช่น โรคระบบทางเดินหายใจ โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (COPD) และโรคมะเร็งปอด (Kim *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2019) โดย อนุภาคฝุ่นหยาบที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 10.0-5.8 ไมครอน จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนบน คือ รูจมูกและช่องจมูก อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน จะตกสะสมบนคอหอย (pharynx) อนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลม และหลอดลมฝอยส่วนต้น (trachea and primary bronchi) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลมฝอยส่วนกลาง (secondary bronchi) อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน จะตกสะสมในหลอดลมฝอยส่วนปลาย (terminal bronchi) และอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน ตกสะสมในถุงลม (alveoli) แล้วสามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดในร่างกายของมนุษย์ได้ โดยเฉพาะฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอนหรือ 100 นาโนเมตร ซึ่งเรียกว่า ฝุ่นระดับนาโน (Kim *et al.*, 2015; Löndahl *et al.*, 2006; Sarigiannis *et al.*, 2015) รายละเอียดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ศักยภาพในการตกสะสมของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในทางเดินหายใจของมนุษย์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Kim *et al.*, 2015

อนุภาคฝุ่นในบรรยากาศ มีผลกระทบต่อสุขภาพไม่ว่าจะเป็นระยะเฉียบพลัน และระยะเรื้อรัง โดยอาการและอาการแสดงหรือโรคที่มีหลักฐานจากการศึกษาทางระบาดวิทยาพบว่ามีความสัมพันธ์กับฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. โรคหรืออาการและอาการแสดงแบบเฉียบพลัน ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาแพ้ การระคายเคืองของผิวหนังและเยื่อต่างๆ เช่น เยื่อบุตา การจับหอบในผู้ป่วยที่มีโรคประจำตัวเป็นโรคหอบหืด หรือโรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง การเกิดโรคหัวใจขาดเลือดเฉียบพลัน และการเกิดโรคหลอดเลือดสมองเฉียบพลันหรืออัมพาต เป็นต้น
2. โรคหรืออาการและอาการแสดงแบบเรื้อรัง ได้แก่ การเกิดโรคมะเร็งปอด การเกิดโรคสมองเสื่อม นอกจากนี้พบว่า มีผลกระทบต่อสุขภาพทารกในครรภ์ อาจทำให้เด็กในครรภ์เจริญเติบโตช้า หรือทารกคลอดก่อนกำหนด และเพิ่มการตายปริกำเนิดได้

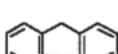
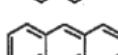
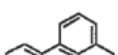
2.3 แนวคิดเกี่ยวกับสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช)

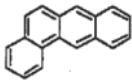
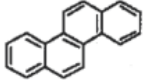
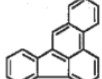
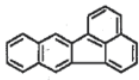
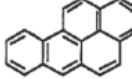
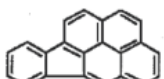
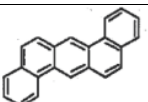
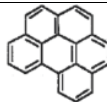
สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน โดยทั่วไปสารพีเอเอช อนุกรมมีปกติจะเป็นของแข็ง มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวสูง ความดันไอต่ำ

ละลายน้ำได้น้อยมาก โดยการละลายจะขึ้นอยู่กับมวล สารพีเอเอชเป็นสารที่เฉื่อย และสามารถสลายตัวในสิ่งแวดล้อมด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง และปฏิกิริยาที่เกิดกับไนโตรเจนไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดซัลฟิวริก โอโซน และไฮดรอกซี เรดิคอล โดยส่วนใหญ่ในบรรยากาศสารพีเอเอช จะเกิดจากกระบวนการควบแน่นหรือการดูดซับ ทำให้เกิดสารพีเอเอชใน 2 สถานะ ได้แก่ สถานะก๊าซ และสถานะที่ดูดซับบนอนุภาคแขวนลอย โดยสารพีเอเอชจะอยู่ในสถานะใดขึ้นกับความดันไอ จำนวนอนุภาคหรือพื้นที่ผิว สารพีเอเอชดูดติดผิว ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและความคงตัวของสารพีเอเอชนั้น

2.3.1 ชนิดของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (U.S. EPA) ได้กำหนดสารพีเอเอชจำนวน 16 ชนิด ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ได้แก่ Naphthalene (NAP), Acenaphthylene (ACY), Acenaphthene (ACE), Fluorene (FLU), Phenanthrene (PHE), Anthracene (ANT), Fluoranthene (FLA), Pyrene (PYR), Benz[a]anthracene (BaA), Chrysene (CHR), Benzo[b]fluoranthene (BbF), Benzo[k]fluoranthene (BkF), Benzo[a]pyrene (BaP), Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IND), Dibenzo[a,h]anthracene (DbA) และ Benzo[g,h,i]perylene (BPER) โดยสำนักงานวิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer; IARC) ได้จัดจำแนกสารพีเอเอช 16 ชนิด ออกเป็น 3 กลุ่ม ตามศักยภาพในการก่อมะเร็ง ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ก่อมะเร็งในมนุษย์ ประกอบด้วย สาร BaP กลุ่ม 2A อาจก่อมะเร็งในมนุษย์ ประกอบด้วย สาร DbA และ กลุ่ม 2B อาจเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ประกอบด้วย สาร BaA CHR BbF BkF และ IND (IARC, 2010) รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติและโครงสร้างของสารพีเอเอชทั้ง 16 ชนิดแสดงดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ชนิด ตัวอย่าง จำนวนวงแหวนเบนซีน ศักยภาพในการก่อมะเร็ง และสูตรโครงสร้างของสารพีเอเอช

ชนิด	ตัวอย่าง	จำนวนวง แหวนเบนซีน	IARC Class*	สูตรโครงสร้าง
Naphthalene	NAP	2		
Acenaphthylene	ACY	3		
Acenaphthene	ACE	3		
Fluorene	FLU	3		
Phenanthrene	PHE	3		
Anthracene	ANT	3		
Fluoranthene	FLA	4		
Pyrene	PYR	4		

ชนิด	ตัวย่อ	จำนวนวง แหวนเบนซีน	IARC Class*	สูตรโครงสร้าง
Benz[a]anthracene	BaA**	4	2B	
Chrysene	CHR**	4	2B	
Benzo[b]fluoranthene	BbF**	5	2B	
Benzo[k]fluoranthene	BkF**	5	2B	
Benzo[a]pyrene	BaP**	5	1	
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	IND	6	2B	
Dibenz[a,h]anthracene	DbA**	5	2A	
Benzo[g,h,i]perylene	BPER	6		

ที่มา : International Agency for Research on Cancer, (IARC, 2010)

* IARC class หมายถึง ศักยภาพของการก่อมะเร็งกำหนดโดยหน่วยงาน IARC ดังนี้

กลุ่ม 1 ยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

กลุ่ม 2A น่าจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

กลุ่ม 2B อาจจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

** หมายถึง เป็นกลุ่มสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic PAHs)

2.3.2 แหล่งกำเนิดของสารพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม

แหล่งกำเนิดของสารพีเอเอชในสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่มาจาก 2 แหล่งหลัก ได้แก่ แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ ได้แก่ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เช่น การเกิดไฟไหม้ป่า และการระเบิดของภูเขาไฟ โดยจะปลดปล่อยสารพีเอเอชเข้าสู่บรรยากาศ
- 2) แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ประกอบด้วย การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงยานพาหนะที่ปลดปล่อยสารพีเอเอชสู่บรรยากาศ การเผาขยะ การปรุงอาหาร โดยเฉพาะกระบวนการปรุงอาหารบางอย่าง เช่น การย่างหรือการรมควัน การรั่วไหลของน้ำมัน รวมถึงการเผาชีวมวล ได้แก่ การเผาป่า และการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร

2.3.3 ความเป็นพิษของสารพีเอเอช

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (U.S. EPA) ได้กำหนดสารพีเอเอช 16 ชนิดในบรรยากาศ เป็นสารหลักที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และองค์การอนามัยโลกกำหนดค่าระดับความเข้มข้นที่เป็นระดับเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็งทางการหายใจ ไม่เกิน 1 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (World Health Organization (WHO), 2000) สารพีเอเอชโดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยเกิดพิษแบบเฉียบพลัน หากมีการรับสัมผัสในระยะเวลาสั้นๆจะทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และตา หากได้รับสัมผัสเป็นระยะเวลายาวนานจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็ง เนื่องจากสารพีเอเอชมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง ความเป็นพิษของสารพีเอเอชแบบเรื้อรังจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ สารก่อมะเร็ง (Carcinogenicity) และ สารก่อกลายพันธุ์ (Mutagenicity) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สารก่อมะเร็ง (Carcinogenicity)

สารพีเอเอชเป็นสารที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็ง จากการจัดกลุ่มโดยใช้ข้อมูลศักยภาพของการก่อมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ทดลอง และข้อมูลส่วนประกอบที่อยู่ในสารผสมที่ได้รับการยืนยันทางระบาดวิทยาว่าเป็นสาเหตุหรือมีส่วนทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ เช่น ควินบุทรี น้ำมันดิบ เขม่าเตาเผาถ่านหิน หรือจากท่อไอเสียรถยนต์ สารพีเอเอช 16 ชนิด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามความสามารถในการก่อมะเร็ง ได้แก่ กลุ่มสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ประกอบด้วยสารพีเอเอช 7 ชนิด ได้แก่ BaA CHR BbF BkF BaP IND และ DbA และกลุ่มสารไม่ก่อมะเร็งในมนุษย์ จำนวน 9 ชนิด ได้แก่ NAP ACY ACE FLU PHE ANT FLA PYR และ BPER รายละเอียดดังตารางที่ 2

2) สารก่อกลายพันธุ์ (Mutagenicity)

พีเอเอช กลุ่มที่เป็นสารก่อมะเร็งจะมีฤทธิ์เป็นสารก่อกลายพันธุ์ด้วย โดยพีเอเอชบางชนิดเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกเมตาบอไลต์โดยเอนไซม์ cytochrome P-450 ทำให้เกิดการเติมหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ที่เป็นวงแหวนเบนซีนได้เป็นสารอนุพันธ์ epoxide ซึ่งเป็นสารที่ว่องไวมาก สร้างพันธะโควาเลนต์ได้ดีกับสารพวกโปรตีนและกรดนิวคลีอิก

2.3.4 กลไกการเกิดความเป็นพิษของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น

กลไกการเกิดความเป็นพิษของมลพิษในอากาศ เชื่อว่ามีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการอักเสบและภาวะ Oxidative stress เริ่มจากการเกิดภาวะ oxidative stress เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในอนุภาคฝุ่น สาเหตุมาจากการเกิดอนุมูลอิสระ reactive oxygen species (ROS) ได้แก่ hydrogen peroxide (H_2O_2), superoxide (O_2^-), hydroxyl radical ($OH^\cdot$) และ hydroperoxyl radical ($HO_2^\cdot$) ซึ่งเป็นสารอนุมูลอิสระที่เกาะอยู่บนอนุภาคของฝุ่นหรือจากองค์ประกอบของสารเคมีบนอนุภาคของฝุ่น เช่น สารพีเอเอช ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่สามารถก่อให้เกิดการสร้าง ROS ได้มาก โดยสารประกอบอะโรมาติกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์ redox active peroxides และสารอนุมูลอิสระอื่น ๆ ด้วยเอนไซม์ภายในเซลล์ เมื่อมีภาวะ oxidative stress เกิดขึ้นภายในเซลล์ เซลล์จะมีกลไกการทำงานของระบบแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) ในการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) และกลูตาไทโอน

(GSH) มาทำลายสารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น (Kelly & Fussel, 2003; Risom *et al.*, 2005) ภาวะ oxidative stress ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากอนุมูลอิสระจะส่งผลต่างๆ ต่อเซลล์โดยเฉพาะเซลล์ปอด พบว่าอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกหักของ DNA ถ้าเซลล์มีกระบวนการซ่อมแซม DNA ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดภาวะการกลายพันธุ์ได้ การกลายพันธุ์ที่เกิดขึ้นนี้คาดว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดโรคมะเร็ง นอกจากนี้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถกระตุ้นการส่งสัญญาณภายในเซลล์ โดยพบว่า มีผลกระตุ้นการเกิด Histone acetylation กระตุ้น transcription factor กระตุ้นการหลั่งแคลเซียม และกระตุ้น Mitogen activated protein kinases (MAPK) ซึ่งจะมีผลทำให้มีการแสดงออกของยีนต่างๆ โดยเฉพาะยีนที่ควบคุมการสร้างโปรตีนในกระบวนการอักเสบ เช่น ไซโตไคน์ ฟอสฟาเตส กลืนดิน มีการศึกษาพบว่าอนุมูลอิสระสามารถกระตุ้นให้เซลล์เยื่อปอดอักเสบและเซลล์เม็ดเลือดขาวจากปอดหลั่ง Proinflammatory cytokines เช่น IL-6, IL-8, IL-1 และ TNF- α เพิ่มขึ้น สารเหล่านี้เหนี่ยวนำให้เกิดภาวะอักเสบขึ้น ถ้าภาวะนี้เกิดแบบเรื้อรังจะเหนี่ยวนำให้เกิดโรคต่างๆ ตามมา เช่น โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง (Chronic obstructive Pulmonary disease, COPD), โรคหอบหืด (Asthma) และโรคหลอดเลือดและหัวใจ (Becker *et al.*, 2005; Risom *et al.*, 2005)

2.4 แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Health Risk Assessment; HRA) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ คาดการณ์ และประเมินระดับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับสุขภาพของบุคคลหรือประชาชนจากปัจจัยเสี่ยงต่างๆ เช่น สารเคมี มลพิษทางอากาศ พฤติกรรมสุขภาพ หรือปัจจัยทางชีวภาพและกายภาพ (นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ, 2552) โดยแนวคิดเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ มีรายละเอียด ดังนี้

2.4.1 ความหมายของ ความเสี่ยง และการประเมินความเสี่ยง

ความเสี่ยง (Risk) หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งคุกคามสุขภาพ (Health hazard) และการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามนั้นๆ (Exposure)

การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) หมายถึง กระบวนการที่ใช้วิธีทางวิทยาศาสตร์และสถิติในการระบุสิ่งคุกคามสุขภาพ และการคาดการณ์ผลอันไม่พึงประสงค์ของสิ่งคุกคามต่อสถานะสุขภาพของมนุษย์ภายใต้บริบทของสถานการณ์ที่กำหนดไม่ว่าสิ่งคุกคามนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นสารเคมี ชีวภาพ หรือกายภาพ การวิเคราะห์ดำเนินการภายใต้ความสัมพันธ์ระหว่าง host-agent-media (exposure) เพื่อประเมินว่าผลของความสัมพัทธ์นั้นก่อให้เกิดอะไร (Consequence) ด้วยระดับความรุนแรงแค่ไหน (Severity) มีโอกาสของการเกิดมากน้อยเพียงน้อย (Likelihood) และปัจจัยหลักใดที่มีอิทธิพลสูงต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความเสี่ยง (Magnitude) (นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ, 2552)

2.4.2 วัตถุประสงค์ของการประเมินความเสี่ยง

วัตถุประสงค์ของการประเมินความเสี่ยงมีอยู่ 4 ประเด็นหลัก คือ

- 1) คาดการณ์ระดับของความเสี่ยง
- 2) กำหนดค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้

- 3) จัดลำดับความสำคัญของปัญหา
- 4) ประเมินความเสี่ยงที่ยังเหลืออยู่ (Residual risk) หลังจากที่ได้มีการควบคุม หรือลดความเสี่ยงไปแล้ว

2.4.3 ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพเป็นกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลหรือกลุ่มประชากร ซึ่งสามารถนำไปสู่การป้องกันหรือการจัดการความเสี่ยงได้อย่างเหมาะสม ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ (นันทิกา สุนทรไชยกุล และคณะ, 2552)

1) การระบุสิ่งคุกคามสุขภาพ (Hazard identification)

การระบุสิ่งคุกคามสุขภาพ เป็นขั้นตอนชี้บ่งสิ่งคุกคามสุขภาพ พร้อมทั้งรายละเอียดของสิ่งคุกคามสุขภาพที่อาจก่อให้เกิดผลไม่พึงประสงค์ต่อสุขภาพ ชุมชน บุคคล และสิ่งแวดล้อม เมื่อได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามนั้นๆ

สิ่งคุกคามสุขภาพ (Health hazard) หมายถึง เหตุการณ์หรือสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งมีศักยภาพในการก่อให้เกิดการสูญเสีย บาดเจ็บ เจ็บป่วย หรืออันตรายถึงขั้นเสียชีวิต สิ่งคุกคามสุขภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ตามลักษณะการเกิดและคุณลักษณะดังนี้

1. ตามลักษณะการเกิด ประกอบด้วย 2 ประเภท ได้แก่
 - 1.1 ตามธรรมชาติ เช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม น้ำป่าไหลหลาก ภัยแล้ง ไฟป่า พายุ เป็นต้น
 - 1.2 จากการกระทำของมนุษย์ เช่น สารเคมีอันตราย พิษจากอุตสาหกรรมและบ้านเรือน อาหาร ชีวภาพ รังสีและสารกัมมันตภาพรังสี เป็นต้น
2. ตามคุณลักษณะ ประกอบด้วย 5 ประเภท หลัก ได้แก่
 - 2.1 สิ่งคุกคามทางกายภาพ (Physical Hazards) คือ สิ่งคุกคามที่เป็นพลังงานทางฟิสิกส์ ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดโรคในคนได้ เช่น เสียงดังเกินมาตรฐาน ความร้อนหรือความเย็นจัด การสั่นสะเทือน รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น
 - 2.2 สิ่งคุกคามทางเคมี (Chemical Hazards) ได้แก่ สารเคมีที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เป็นสารที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้สามารถทำปฏิกิริยากับดิน น้ำและอากาศ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อม และอาจส่งทางอ้อมต่อสุขภาพของมนุษย์ได้
 - 2.3 สิ่งคุกคามทางชีวภาพ (Biological Hazards) ได้แก่ จุลชีพที่ก่อโรค (แบคทีเรีย เชื้อรา ไวรัส ปรสิตร) รวมถึงสารพิษที่สร้างโดยจุลชีพ เนื้อเยื่อที่เกิดจากการดัดแปลงพันธุกรรม ที่สามารถทำให้เกิดการติดเชื้อและเจ็บป่วยได้
 - 2.4 สิ่งคุกคามทางพฤติกรรมและวิถีชีวิต (Behavioral and Lifestyle Hazards) หมายถึง สิ่งคุกคามที่เกิดจากพฤติกรรมและวิถีชีวิตของแต่ละบุคคล เช่น การสูบบุหรี่ การดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การใช้สารเสพติด พฤติกรรมการบริโภค และพฤติกรรมออกกำลังกาย เป็นต้น

2.5 สิ่งคุกคามทางจิตสังคม (Psychosocial Hazards) หมายถึง ปัจจัยด้านจิตใจและสังคมที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพจิต ความเป็นอยู่ที่ดี และประสิทธิภาพในการทำงานของบุคคล ซึ่งมักเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมการทำงานหรือชีวิตประจำวัน เช่น ความเครียดจากการทำงาน ความรุนแรงในครอบครัวหรือสังคม การทำงานที่มีภาระหนักเกินไป เป็นต้น

2) การประเมินการรับสัมผัส (Exposure Assessment)

การประเมินการรับสัมผัส เป็นขั้นตอนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาจากปัจจัย ดังนี้

1. การระบุแหล่งที่มา (Source Identification) เช่น แหล่งกำเนิดของสารเคมีอันตราย (โรงงานอุตสาหกรรม ยานพาหนะ ผลิตภัณฑ์เคมี หรือแหล่งธรรมชาติ)
2. การระบุเส้นทางการรับสัมผัส (Exposure Pathways) โดยเส้นทางการรับสัมผัสสารเข้าสู่ร่างกาย ประกอบด้วย 3 เส้นทางหลัก คือ ทางการหายใจ ทางผิวหนัง และ ทางอาหารและน้ำ
3. การระบุประชากรที่ได้รับสัมผัส (Exposed Population) กลุ่มประชากรที่อาจได้รับสัมผัส เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ คนทำงานในโรงงาน หรือประชาชนทั่วไป
4. การประเมินขนาดและระยะเวลาการสัมผัส (Exposure Dose and Duration) ประกอบด้วย ปริมาณสารที่ได้รับ ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัส และความถี่ของการได้รับสัมผัส
5. การหาปริมาณและการวิเคราะห์ข้อมูล (Measurement and Modeling) เช่น การวัดระดับความเข้มข้นของสารในสิ่งแวดล้อม และการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดการณ์การสัมผัส เป็นต้น

3) การประเมินขนาดสัมผัสกับการตอบสนอง (Dose-Response Assessment)

การประเมินขนาดสัมผัสกับการตอบสนอง คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ได้รับสัมผัส สิ่งคุกคามและการตอบสนองของร่างกาย ส่วนใหญ่ได้จากการศึกษาสิ่งคุกคามทางสารเคมีในสัตว์ทดลองมาเป็นผลตามสภาพความเป็นจริงในประชากร เช่น อนุมานจากสัตว์ทดลองในสัตว์มาเป็นในมนุษย์ อนุมานผลของปัจจัยเสี่ยงที่ให้ในปริมาณสูงแก่สัตว์ทดลอง หรือที่เกิดกับกลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยงสูง มาเป็นผลของปริมาณต่ำๆ ของปัจจัยเสี่ยงที่เกิดขึ้นในสภาพความเป็นจริง อนุมานผลของการได้รับปัจจัยเสี่ยงในระยะสั้นของการทดลอง มาเป็นผลของการได้รับปัจจัยเสี่ยงเป็นระยะเวลานาน เช่น ตลอดช่วงชีวิต หรืออนุมานผลของการทดลองให้ปัจจัยเสี่ยงในวิธีแตกต่างจากวิธีที่มนุษย์ได้รับจริง

4) การอธิบายลักษณะของความเสี่ยง (Risk Characterization)

การอธิบายลักษณะของความเสี่ยง เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เป็นการพรรณาลักษณะทางธรรมชาติและขนาดของความเสี่ยงในมนุษย์ ซึ่งจะต้องรวมเอาความไม่แน่นอน (Uncertainties) เข้าด้วย

2.4.4 วิธีการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพ

วิธีการประเมินความด้านสุขภาพแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative Risk Assessment) และการประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk Assessment) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ (Qualitative Risk Assessment) มุ่งเน้นการอธิบายปรากฏการณ์เชิงสังคมศาสตร์และมานุษยวิทยา เน้นความหลากหลายความครอบคลุมของข้อมูลและวิธีการเข้าถึงข้อมูล ไม่เน้นการตรวจวัดทางวิทยาศาสตร์หรือการเก็บข้อมูลเชิงตัวเลข หรือการวิเคราะห์ทางสถิติ แต่สามารถแสดงมิติของข้อมูล รวมถึงอธิบายลักษณะความเสี่ยงที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในเชิงคุณภาพ เช่น ระดับความเสี่ยงมาก ปานกลาง หรือน้อย วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่มีข้อมูลอยู่จำกัดและไม่สามารถประมาณค่าเชิงคณิตศาสตร์หรือสถิติได้ วิธีการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพเชิงคุณภาพ มีดังนี้

- 1.1 ตารางความเสี่ยง (Risk matrix) เป็นการสร้างตารางความเสี่ยงโดยการกำหนดโอกาสของการเกิดเหตุการณ์ และระดับความรุนแรงผลที่เกิดตามมา วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและไม่ต้องการใช้ข้อมูลจำนวนมาก
- 1.2 Event Tree Analysis (ETA) เป็นการประเมินผลที่เกิดจากสิ่งคุกคาม โดยอาศัย Binary logic (เกิด/ไม่เกิด, ใช่/ไม่ใช่) จากจุดเริ่มต้นของการเกิดเหตุการณ์ไปสู่ผลอื่นๆ ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิด
- 1.3 Fault Tree Analysis (FTA) เป็นเทคนิคการใช้แผนภูมิ เพื่อวิเคราะห์แบบย้อนกลับในการหาสาเหตุของการเกิดเหตุอันไม่พึงประสงค์ จากปัจจัยหรือเหตุการณ์ร่วม กระบวนการวิเคราะห์จะเริ่มจากการประเมินปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อการเกิด Top event และความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยว่าเป็นอิสระต่อกัน หรือมีผลร่วมกัน
- 1.4 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) ใช้สำหรับวิเคราะห์ว่าความล้มเหลวของระบบการทำงานเกิดจากปัจจัยอะไร และผลของการล้มเหลวเกิดจากอะไร

2) การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk Assessment) มุ่งเน้นการศึกษาที่อาศัยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ การตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ สามารถอธิบายด้วยหลักเหตุและผล ใช้ตัวเลขในการอธิบายปรากฏการณ์แต่ต้องมีเงื่อนไข กฎเกณฑ์ หรือสมมติฐานเข้าช่วยในการดำเนินการประเมิน เป็นวิธีการประเมินความเสี่ยงที่ซับซ้อนและต้องอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการคำนวณค่าความเสี่ยงเชิงลึกทางปริมาณ โดยจะแสดงผลในรูปของความน่าจะเป็น (Probability) หรือโอกาสในการเกิด (Likelihood) การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณโดยทั่วไปจะใช่เป็นการประเมินความเสี่ยงแบบจุด (Deterministic risk assessment) ซึ่งเป็นการใช้เพียงค่าเดียวที่ได้จากค่าเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมดของชุดข้อมูล เช่น ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ ค่ามัธยฐาน หรือฐานนิยมสามารถคำนวณได้ 2 แบบ ดังนี้

1. คำนวณจากบูรณาการ Tree-based analysis กับความถี่ของการเกิดเหตุการณ์

2. คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการหาปริมาณหรือค่าที่ได้รับสัมผัสจากสิ่งคุกคาม แล้วนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์กับ Dose response relationship เพื่อระบุระดับความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามนั้นๆ

ในการคำนวณหาความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามทางเคมี เช่น ฝุ่นละออง โลหะ หรือสารประกอบทางเคมีที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ 2 แบบตามระยะเวลาของการได้รับสัมผัส ได้แก่ ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง และความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง

ความเสี่ยงที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Non-cancer risk) คำนวณการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามทางเคมี โดยคำนวณการได้รับสัมผัสสารเคมีในแต่ละวัน (Average daily intake; ADI) จากสมการดังนี้

$$ADI = C \times \frac{IR \times EF}{BW} \times \frac{ED}{LT}$$

โดยที่

- C หมายถึง ความเข้มข้นของสิ่งคุกคาม (Concentration) มีหน่วย เป็น มลก./ลิตร; มลก./กก.; มลก./ลบ.ม.
- IR หมายถึง อัตราการได้รับสัมผัสสารตามเหตุการณ์และเวลา (Intake Rate) มีหน่วยเป็น มลก./วัน
- EF หมายถึง ความถี่ของการได้รับสัมผัส (Exposure Frequency) มีหน่วยเป็น วัน/ปี
- ED หมายถึง ระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Exposure Duration) มีหน่วยเป็น ปี
- LT หมายถึง เวลาเฉลี่ยตามระยะเวลาของการได้รับสัมผัส (Lifetime Exposure) มีหน่วยเป็น วัน
- BW หมายถึง น้ำหนักตัว (Body weight) มีหน่วยเป็น กก.

จากนั้นคำนวณหาค่าความเสี่ยงจากค่า Hazard Quotient (HQ) สำหรับ Non-cancer endpoint โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$HQ = \frac{ADI}{RfD}$$

โดยที่

ADI หมายถึง ค่าคำนวณการได้รับสัมผัสสารเคมีในแต่ละวัน (Average daily intake; ADI)

RfD หมายถึง ค่ามาตรฐาน Reference dose (RfD)

ระดับค่าความเสี่ยงตามค่าการประเมิน HQ

ถ้า HQ น้อยกว่า 0.1 ไม่มีความเสี่ยง

HQ อยู่ระหว่าง 0.1-1.0 ความเสี่ยงต่ำ

HQ อยู่ระหว่าง 1.1-10.0 ความเสี่ยงปานกลาง

HQ มากกว่า 10.0 ความเสี่ยงสูง

ความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Cancer risk) ประกอบด้วยการคำนวณหาค่าการได้รับสัมผัสสิ่งคุกคามที่คาดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ติดต่อกันเป็นระยะเวลายาวนาน โดยคำนวณหาค่า CDI (Chronic Daily Intake; CDI) สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$CDI = C \times \frac{IR \times EF}{BW} \times \frac{ED}{LT}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากสมการดังนี้

$$Cancer\ risk = CDI \times Cancer\ slope\ factor$$

หากเป็นมลพิษทางอากาศหรือมลพิษทางน้ำ จะใช้ค่า Unit risk factor แทนค่า Cancer slope factor โดยที่

ค่า Cancer slope factor เป็นค่าที่แนะนำโดยองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ในการคำนวณค่าความเสี่ยงของการเกิดมะเร็ง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของสารก่อมะเร็ง ค่าความชัน (Slope) ได้มาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารก่อมะเร็งที่ได้รับสัมผัสและการเกิดมะเร็ง มีหน่วยเป็น มลก./กก./วัน หรือ ความเสี่ยง (มลก./กก./วัน⁻¹)

ค่า Unit risk factor เป็นค่าที่ได้จากการศึกษาขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ในการอธิบายความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งที่มีความสัมพันธ์กับหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของสารก่อมะเร็งที่ปนเปื้อนในน้ำหรือในอากาศ โดยคำนวณจากค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่เป็นสารก่อมะเร็ง โดยไม่ต้องคำนวณหา CDI มีหน่วยเป็น มคก./ลบ.ม. (ในอากาศ) และ มคก./ลิตร (ในน้ำ)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยภายในประเทศ

Booddee & Muenmee (2021) ทำการศึกษาความเข้มข้นฝุ่น PM_{2.5} ปลดปล่อยมาจากพื้นที่เขตอุตสาหกรรมในอำเภอปลวกแดง จังหวัดระยอง และนำมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ในช่วงฤดูฝน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 38.8±25.2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร น้อยกว่าช่วงฤดูแล้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.7±33.9 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อทำการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพด้วยการคำนวณจากค่าสัดส่วนความเสี่ยง พบว่าในกลุ่มเด็กในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งมีค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพมากกว่าผู้ใหญ่ และมีค่าเกิน 1.0 เนื่องจากปัจจัยด้านสรีรวิทยาระหว่างผู้ใหญ่และเด็กที่แตกต่างกัน เด็กจะมีความต้องการออกซิเจนที่สูงขึ้น และจะทำให้อัตราการหายใจสูงขึ้น รวมถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินหายใจในกลุ่มเด็กจะมีขนาดเล็กกว่าผู้ใหญ่ ทำให้เด็กมีแนวโน้มการหายใจและการสะสมฝุ่นละอองมากขึ้น

Wiriya *et al.* (2013) ทำการศึกษาสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับฝุ่น PM₁₀ ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการหาความแตกต่างตามฤดูกาล การระบุแหล่งกำเนิด ประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ และความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ ความเข้มข้นฝุ่น PM₁₀ เฉลี่ยเท่ากับ 104.91±32.70, 13.28±11.34 และ 36.24±19.16 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.87±10.13, 3.12±2.18 และ 4.58±2.18 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในฤดูหมอกควัน ปี

2010 ฤดูฝน ปี 2010 และฤดูหมอกควัน ปี 2011 พบความเข้มข้นของฝุ่น PM_{10} มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมในทุกช่วงฤดู ($r>0.796$) ในช่วงฤดูร้อน ฤดูฝน ปี 2010 และฤดูร้อน ปี 2011 พบปริมาณฝุ่น PM_{10} และสารพีเอเอชสูงสุดในช่วงฤดูร้อน ปี 2010 โดยในปี 2011 จะมีปริมาณฝุ่น และสารพีเอเอช ต่ำกว่าปี 2010 และต่ำกว่าในช่วง 12 ปีที่ผ่านมา อันเนื่องมาจากปริมาณฝนตกชุกและการเผาในที่โล่งน้อยกว่า และเมื่อนำสารพีเอเอชในแต่ละฤดูกาลมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจอยู่ในระดับปานกลาง

Phoothiwut & Junyapoon (2013) ทำการศึกษาการกระจายของอนุภาคฝุ่น และสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น และลักษณะของสารพีเอเอช ในช่วงฤดูหมอกควันในพื้นที่จังหวัดลำปาง โดยทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นแยกขนาด จำนวน 8 ขนาด และวิเคราะห์หาสาร พีเอเอช พบว่าในช่วงฤดูหมอกควันจะพบปริมาณฝุ่นรวมทุกขนาดสูงกว่านอกฤดูหมอกควัน 3.5 เท่า การกระจายของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิดเป็นแบบ bimodal distribution และพบสารพีเอเอชที่เป็นสารก่อมะเร็งในช่วงฤดูหมอกควันสูงกว่านอกฤดูหมอกควัน

Pootawee *et. al.* (2017) ศึกษาการกระจายของอนุภาคฝุ่น ลักษณะ และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในพื้นที่จังหวัดพะเยา ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นในช่วงหมอกควัน จำนวน 5 ตัวอย่าง และนอกฤดูหมอกควัน ปี 2557 จำนวน 1 ตัวอย่าง และวิเคราะห์หาสารพีเอเอช ในอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบว่า ปริมาณฝุ่นรวมทุกขนาดในช่วงหมอกควันมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 162.75 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สูงกว่านอกฤดูหมอกควัน 30 เท่า ในช่วงฤดูหมอกควัน อนุภาคฝุ่นส่วนใหญ่ เป็นฝุ่นละเอียด 45.12% ฝุ่นหยาบ 42.64% และฝุ่นละเอียดมาก 12.24% สารพีเอเอชรวม 16 ชนิดในช่วงฤดูหมอกควัน ส่วนใหญ่เกาะอยู่ในฝุ่นละเอียด ร้อยละ 50.7 รองลงมาเป็นฝุ่นหยาบ (24.9%) และฝุ่นละเอียดมาก (24.35%) รูปแบบการกระจายของสารพีเอเอช เป็นแบบ bimodal distribution มีพีคหลักอยู่ในฝุ่นหยาบ และฝุ่นละเอียด และค่าความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งจากการหายใจ ในช่วงฤดูหมอกควัน อยู่ระหว่าง 8-25 คนต่อประชากรแสนคนที่ทำการสัมผัสสารมลพิษอากาศ สูงกว่านอกฤดูหมอกควัน 10 เท่า (2 คนต่อประชากรแสนคน)

Thepnuan & Chantara (2020) เก็บตัวอย่างฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่เขตเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2559 (มีนาคม-เมษายน) นำตัวอย่างฝุ่นมาวิเคราะห์หาสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น พบค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงฝุ่น $PM_{2.5}$ เท่ากับ 65.3 ± 17.6 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของพีเอเอชรวม 16 ชนิด มีค่าเท่ากับ 10.23 ± 2.49 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อนำความเข้มข้นของสารพีเอเอชมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจ พบว่า มีค่า TEQ เท่ากับ 1.13 ± 0.34 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจ (ICR) มีค่าความเสี่ยงสูงในช่วงฤดูหมอกควัน

Yabueng *et. al.* (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของนโยบายห้ามเผาและปรากฏการณ์เอลนีโญของภูมิอากาศในอากาศที่มีผลต่อรูปแบบของฝุ่น $PM_{2.5}$ และทำการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ในช่วงฤดูหมอกควันปี 2017-2018 ในพื้นที่กึ่งเมือง จังหวัดเชียงใหม่ และพื้นที่นอกเมือง จังหวัดน่าน พบว่า ค่าฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่กึ่งเมือง จังหวัดเชียงใหม่ มีค่าอยู่

ระหว่าง 38-42 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าต่ำกว่า 2 เท่าในช่วงระยะเวลาเดียวกันก่อนการประกาศนโยบายห้ามเผาในปี 2012-2015 ที่มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ย 67.1 ± 34.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่นอกเมือง จังหวัดน่านทั้ง 2 ปี มีค่าเฉลี่ย 5 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สูงกว่าพื้นที่กึ่งเมืองของจังหวัดเชียงใหม่ พบค่าเฉลี่ย 2 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปีที่ปรากฏการณ์เอนโซอยู่ในสภาวะเอลนีโญจะพบความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นและสารพีเอเอชสูงกว่าลานีญา และพื้นที่นอกเมือง จังหวัดน่านมีความเสี่ยงสูงจากการเป็นมะเร็งจากการหายใจจากสารพีเอเอชที่เกาะในอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ในช่วงฤดูหมอกควัน ส่วนพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่มีความเสี่ยงปานกลาง

Samae *et. al.* (2021) ศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด และวิเคราะห์หาสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นจากการเผาไหม้ชีวมวลจำนวน 12 ชนิดในเตาเผา สำหรับการประเมินแหล่งกำเนิด พบปริมาณฝุ่นและสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยมาจากการเผาไหม้ชีวมวลอยู่ระหว่าง 0.5-10 ไมครอน โดยสารพีเอเอชชนิดหลักที่เกิดจากการเผาฟางข้าว ชากอ้อย ใบอ้อย คือ BbF และ BkF พบเป็นสัดส่วนสูงสุดจากการเผาไหม้ฟางข้าว

Insian *et. al.* (2022) ทำการศึกษาความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และสารพีเอเอชรวมในอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในพื้นที่เขตเมือง และนอกเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2562 พบความเข้มข้นของฝุ่นรวมในเขตเมืองเท่ากับ 105.05 ± 29.78 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนอกเมืองเท่ากับ 128.42 ± 39.17 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นทุกขนาดในเขตเมืองเท่ากับ 4.30 ± 1.95 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนอกเมืองเท่ากับ 6.56 ± 2.88 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดอนุภาคที่พบปริมาณฝุ่นและสารพีเอเอชมากที่สุด เป็นอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน พบในพื้นที่นอกเมืองมากกว่าพื้นที่ในเมืองในช่วงฤดูกลางหมอกควัน อันเนื่องมาจากการเผาในที่โล่งในช่วงฤดูหมอกควัน สารพีเอเอชชนิดหลักที่พบในช่วงฤดูหมอกควัน คือ BbF ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่เกิดจากการเผาในที่โล่ง และเมื่อนำความเข้มข้นของสารพีเอเอชมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจ พบว่าในพื้นที่นอกเมืองมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจมากกว่าพื้นที่ในเมืองในช่วงฤดูกลางหมอกควัน (3-4 เดือน)

2.5.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Lee *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการกระจายของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด โดยใช้เครื่อง eight-stage cascade impactor ในช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาวของกรุงโซล ประเทศเกาหลีใต้ ในปี 2003 พบว่า ทั้งช่วงฤดูร้อน และฤดูหนาวจะพบความเข้มข้นของสารพีเอเอชเกาะอยู่กับอนุภาคฝุ่นละเอียดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน ร้อยละ 41-65 และ ฝุ่นละเอียดขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมครอน ร้อยละ 75 ลักษณะการกระจายของสารพีเอเอชแต่ละชนิดในฤดูร้อนเป็นแบบ bimodal distribution พบพีคหลักที่อนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน และพีครองเป็นอนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน สำหรับฤดูหมอกควันเป็นแบบ unimodal distribution พบพีคหลักในอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน

Chen *et al.* (2016) ทำการศึกษาสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น $PM_{2.5}$ ในพื้นที่นอกเมืองซึ่งใกล้กับแหล่งอุตสาหกรรมที่มีมลพิษสูงในเมือง Changhua ประเทศไต้หวัน ทำการเก็บตัวอย่างปี 2014-2015 พบความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมเฉลี่ย 2.91 ± 1.34 และ 3.04 ± 1.40 นาโนกรัม

ต่อลูกบาศก์เมตรในพื้นที่ Decheng และ Fangyuan ตามลำดับพบสารพีเอเอชสูงในฤดูหนาว มากกว่าฤดูฝน และฤดูร้อน ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจ (ICR) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.7×10^{-5} แสดงว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากหายใจปานกลาง

Ren *et al.* (2017) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบและการกระจายของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น 4 ขนาด ได้แก่ อนุภาคฝุ่นขนาด <1.1 , $1.1-3.3$, $3.3-9.0$ และมากกว่า 9.0 ไมครอน ในเมือง Xi'an และ Guangzhou ซึ่งเป็น 2 มหานครในสาธารณรัฐประชาชนจีน ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงฤดูหนาว และฤดูร้อน ของปี 2013 ผลการศึกษาพบว่าสารพีเอเอชรวม 14 ชนิดมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 57 ± 20 และ 18 ± 23 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่เมือง Xi'an และ Guangzhou ตามลำดับ ในช่วงฤดูหนาวพบมีความเข้มข้นสูงกว่าในช่วงฤดูร้อน 5-10 เท่า การกระจายของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบส่วนใหญ่จะเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 3.3 ไมครอน การคำนวณหาความเป็นพิษ (TEQ) พบว่าทั้ง 2 เมืองจะมีค่าความเป็นพิษของสารพีเอเอชสูงในช่วงฤดูหนาวมากกว่าช่วงฤดูร้อน และสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียดจะมีความเป็นพิษมากกว่าสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นหยาบ

Shen *et al.* (2019) ศึกษาสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในพื้นที่ 10 สถานีเก็บตัวอย่างทั่วสาธารณรัฐประชาชนจีน ประกอบด้วยพื้นที่ในเมือง กึ่งเมือง พื้นที่ทำการเกษตร และพื้นที่ควบคุม ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นเดือนมกราคม 2013 ถึง เดือนธันวาคม 2014 วิเคราะห์หาสารพีเอเอชด้วย GC-MS พบว่าสารพีเอเอชมีความเข้มข้นสูงที่สุดในช่วงฤดูหนาวเนื่องจากการปล่อยมลพิษเพิ่มขึ้น อุณหภูมิต่ำ และมีการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ สารพีเอเอชจะพบสูงสุดในอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน และสารพีเอเอชชนิดหลักที่พบคือ BbK IND และ BPER การคำนวณค่าความเป็นพิษ (TEQ) และค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจ พบสูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน และแสดงว่าฝุ่นละเอียดมีสารที่มีความเป็นพิษเกาะอยู่สูงกว่าฝุ่นหยาบ

Wang *et al.* (2018) ได้ทำการศึกษาลักษณะการปล่อยสารพีเอเอชที่อยู่ในลักษณะก๊าซและอนุภาคฝุ่นแยกขนาดจากการเผาไหม้ถ่านหินจากหม้อต้มฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียน (CFB) ผลการศึกษาพบว่า PAH partitioning ถูกควบคุมโดยการดูดซับคาร์บอนอินทรีย์ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคแต่ละขนาด และการดูดซับของสารพีเอเอชบนอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด โดยสารพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะดูดซับบนอนุภาคฝุ่นได้ดีกว่า สารพีเอเอชที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอันเนื่องมาจาก “Kelvin effect” และสารพีเอเอชจะเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียดมากกว่าอนุภาคฝุ่นหยาบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า

Li *et al.* (2019) ได้ทำการศึกษาการกระจายของความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในช่วงฤดูหนาวของแหล่งกำเนิดมลพิษหลัก Fenhe Plan ของจังหวัด Shanxi สาธารณรัฐประชาชนจีน โดยทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาดโดยใช้เครื่อง cascade impactor และวิเคราะห์หาสารพีเอเอชจำนวน 17 ตัวที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นรวม (PM_{10}) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 689.19 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบสารพีเอเอชสูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาดน้อยกว่า 0.95 ไมครอน ร้อยละ 60 สารพีเอเอชรวมมีรูปแบบการกระจายแบบ unimodal distribution พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นและความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมในอนุ

ภาคฝุ่นขนาดเล็กมากกว่าฝุ่นขนาดใหญ่ เนื่องจากฝุ่นละออยมีแหล่งกำเนิดฝุ่นมาจากแหล่งเดียวกัน รวมถึงสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาคฝุ่น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่นที่ลดลงจะเพิ่มปริมาณและพื้นที่ผิวดูดซับสารพีเอเอชบนอนุภาคฝุ่นได้มากขึ้น การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจพบว่ามีความเสี่ยงสูง อนุภาคฝุ่นละออยที่มีขนาดน้อยกว่า 0.95 ไมครอน จะพบสารพีเอเอชชนิดก่อมะเร็งสูง โดยพบสารพีเอเอชชนิดเด่น ได้แก่ BaP DbA BbF BaA BkF และ IND

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อวัดความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 โดยมีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ประชากรที่จะศึกษา

ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน (กุมภาพันธ์-เมษายน) ปี 2565 พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ จากนั้นทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดเพื่อหาความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) จำนวน 16 ชนิด นำความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่ได้มาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2 ขนาดตัวอย่างและวิธีสุ่มตัวอย่าง

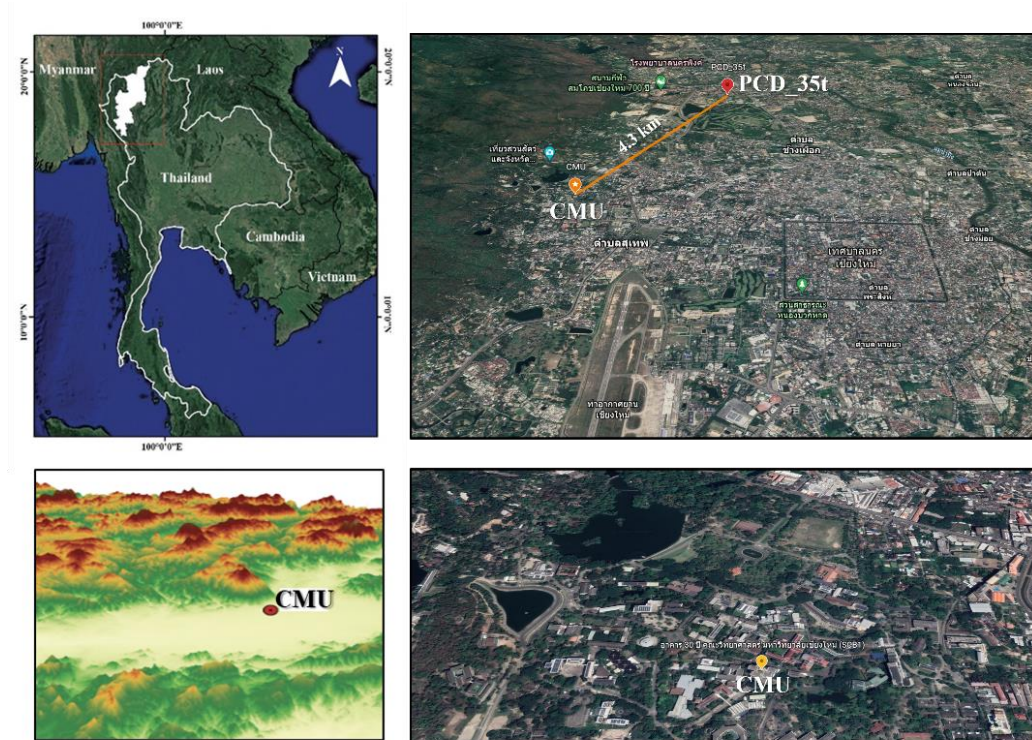
ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาดทั้งหมด 9 ขนาด ได้แก่ อนุภาคฝุ่นขนาด 10 ไมครอน ถึงอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.43 ไมครอน จากสถานีตัวแทนที่เป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเผาในที่โล่งและแหล่งกำเนิดจากการจราจรในพื้นที่เขตเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 (กุมภาพันธ์-เมษายน 2565) ทำการเก็บแต่ละตัวอย่างแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างอย่างน้อย 3 ครั้งต่อเดือน เป็นระยะเวลา 3 เดือน ได้ตัวอย่างฝุ่นทั้งหมด 13 ชุด รวมเป็น 117 ตัวอย่าง (13 ชุด ๆ ละ 9 ตัวอย่าง)

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.3.1 พื้นที่ศึกษา

สถานีเก็บตัวอย่างตั้งอยู่ในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ละติจูด คือ $18^{\circ} 48' 5.40''\text{N}$ ลองจิจูดคือ $98^{\circ} 57' 12.18''\text{E}$ ที่มีความสูง 373 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล ในพื้นที่อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ตั้งอยู่บน “แอ่งเชียงใหม่-ลำพูน” ถูกล้อมรอบด้วยแนวภูเขาสูง อุปกรณ์เก็บตัวอย่างจะติดตั้งบนสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราว ชั้นดาดฟ้าของอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีความสูงประมาณ 30 เมตร พื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการจราจรเนื่องจากถูกล้อมรอบด้วยถนนเส้นหลัก และแหล่งท่องเที่ยว เช่น ถนนนิมมานเหมินท์ ถนนสุเทพ และอยู่ห่างจากสนามบินนานาชาติเชียงใหม่ 4 กิโลเมตร นอกจากนี้ยังเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบหลักจากการเผาในที่โล่ง

โดยเฉพาะในช่วงฤดูหมอกควัน อีกทั้งยังอยู่ใกล้กับพื้นที่อุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ-ปุย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดการเผาในที่โล่งเป็นประจำเกือบทุกปี รายละเอียดดังรูปที่ 4 โดยรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวบนที่ตั้งอยู่บนดาดฟ้าชั้น 9 ซึ่งสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวอยู่ห่างจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ สถานี 35t ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประมาณ 4.3 กิโลเมตร



รูปที่ 4 สถานีเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในพื้นที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 5 รูปถ่ายสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวที่ตั้งอยู่บนดาดฟ้าอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.3.2 การเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด

ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาดทั้งหมด 9 ขนาด ได้แก่ 10.0-9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43 และ < 0.43 ไมครอน จากสถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวที่ตั้งอยู่ชั้นดาดฟ้าของอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทำการเก็บตัวอย่าง ในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 (เดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน 2565) ทำการเก็บอนุภาคฝุ่นแต่ละตัวอย่างแบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างอย่างน้อย 3 ครั้งต่อเดือน รวม 3 เดือน ได้ตัวอย่างอนุภาคฝุ่นทั้งหมดจำนวน 13 ชุด รวมเป็น 117 ตัวอย่าง (13 ชุด ๆ ละ 9 ตัวอย่าง) ด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแบบแยกขนาด eight-stage cascade impactor ยี่ห้อ TISCH Environment ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีอัตราการไหลของอากาศ 28.3 ลิตรต่อวินาที อนุภาคฝุ่นแยกขนาดแบ่งออกเป็น 9 ขนาด รายละเอียดดังตารางที่ 3 และรูปที่ 6 แสดงเครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด Eight-stage cascade impactor

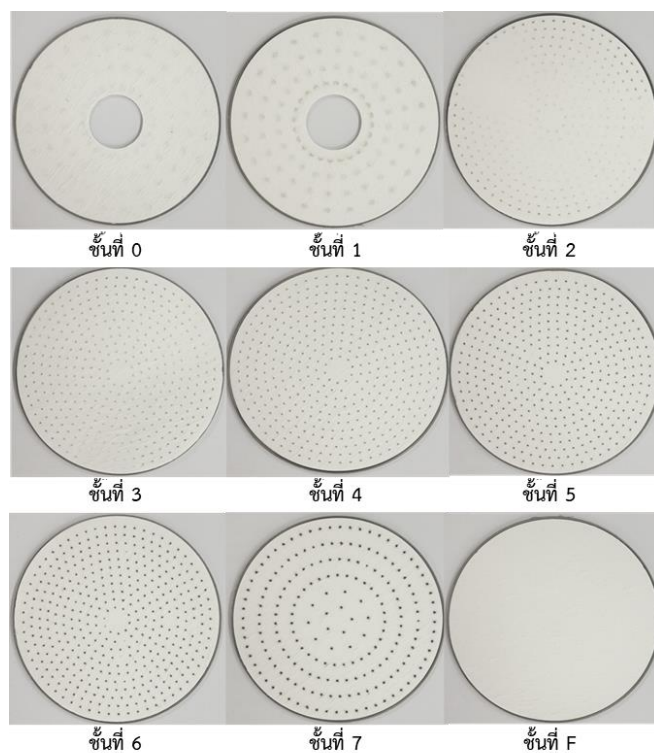
ตารางที่ 3 ขนาดอนุภาคฝุ่นที่เก็บด้วยเครื่องเก็บตัวอย่าง Eight-stage cascade impactor

การจำแนกขนาดอนุภาคฝุ่น	ชั้นเก็บตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคฝุ่น
ฝุ่นหยาบ (Coarse PMs) PM (10.0-2.1 μm)	ชั้นที่ 0	ฝุ่นขนาด 10.0 - 9.0 ไมครอน PM (10.0 - 9.0 μm)
	ชั้นที่ 1	ฝุ่นขนาด 9.0 - 5.8 ไมครอน PM (9.0 - 5.8 μm)
	ชั้นที่ 2	ฝุ่นขนาด 5.8 - 4.7 ไมครอน PM (5.8 - 4.7 μm)
	ชั้นที่ 3	ฝุ่นขนาด 4.7 - 3.3 ไมครอน PM (4.7 - 3.3 μm)
	ชั้นที่ 4	ฝุ่นขนาด 3.3 - 2.1 ไมครอน PM (3.3 - 2.1 μm)
ฝุ่นละเอียด (Fine PMs) PM (2.1-0.43 μm)	ชั้นที่ 5	ฝุ่นขนาด 2.1 - 1.1 ไมครอน PM (2.1 - 1.1 μm)
	ชั้นที่ 6	ฝุ่นขนาด 1.1 - 0.65 ไมครอน PM (1.1 - 0.65 μm)
	ชั้นที่ 7	ฝุ่นขนาด 0.65 - 0.43 ไมครอน PM (0.65 - 0.43 μm)
ฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine PMs) PM (< 0.43 μm)	ชั้นที่ F (backup filters)	ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.43 ไมครอน PM (<0.43 μm)



รูปที่ 6 เครื่องเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด Eight-stage cascade impactor

ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นด้วยกระดาศกรองชนิดควอตซ์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 81 มิลลิเมตร ยี่ห้อ TISCH Environment ประเทศสหรัฐอเมริกา กระดาศที่มีรูตรงกลางขนาด 22 มิลลิเมตร ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นชั้นที่ 0-1 และกระดาศกรองที่ไม่มีรูตรงกลางใช้สำหรับเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นชั้นที่ 2-8 รายละเอียดดังรูปที่ 7 กระดาศกรองชนิดควอตซ์จะถูกอบด้วยเครื่องอบยี่ห้อ Ney® VULCAN D-1750 ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในกระดาศกรอง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดจะทำการปิดเครื่องอบกระดาศ รอจนกระดาศกรองเย็นจากนั้นนำกระดาศกรองชนิดควอตซ์มาใส่ตู้ดูดความชื้นอย่างน้อยเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (รูปที่ 8) ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักก่อนและหลังการเก็บตัวอย่างสำหรับหาน้ำหนักอนุภาคฝุ่นสุทธิของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) โดยใช้หลักการวิเคราะห์แบบ Gravimetric Method นำกระดาศกรองที่ทำการเก็บตัวอย่างเรียบร้อยแล้วทั้งหมดเก็บไว้ในช่องแช่แข็ง ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอการสกัดและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อไป



รูปที่ 7 ตัวอย่างกระดาษกรองชนิดควอตซ์ที่ใช้สำหรับการเก็บตัวอย่างฝุ่นแต่ละขนาด



รูปที่ 8 เครื่องชั่ง 5 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สำหรับชั่งกระดาษกรอง

3.3.3 การวิเคราะห์หาสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช)

1) การเตรียมสารละลายมาตรฐาน และสารละลายมาตรฐานภายใน

1.1) การเตรียมตัวอย่างสารละลายมาตรฐานพีเอเอช

สารละลายมาตรฐานพีเอเอช จำนวน 16 ชนิด ได้แก่ Naphthalene (NAP), Acenaphthylene (ACY), Acenaphthene (ACE), Fluorene (FLU), Phenanthrene (PHE), Anthracene (ANT), Fluoranthene (FLA), Pyrene (PYR), Benz[a]anthracene (BaA), Chrysene (CHR), Benzo[b]fluoranthene (BbF), Benzo[k]fluoranthene (BkF), Benzo[a]pyrene (BaP), Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IND), Dibenz[a,h]anthracene (DbA) และ Benzo[g,h,i]perylene (BPER) ทำการเตรียมโดยใช้สารละลายพีเอเอช 16 ชนิดผสม ที่ความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร เจือจางให้มีความเข้มข้นที่ 20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างไดคลอโรมีเทน:เฮกเซน อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรโดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารพีเอเอชผสมที่ความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ในปริมาตรสุดท้าย 2 มิลลิลิตร ใช้เป็นสารละลายมาตรฐานสำหรับการทำกราฟมาตรฐานของสารพีเอเอชแต่ละชนิด สำหรับคำนวณหาความเข้มข้นของสารพีเอเอชในสารละลายตัวอย่างสกัด

1.2) การเตรียมสารละลายพีเอเอชมาตรฐานภายใน (Internal standard)

สารที่ถูกเตรียมสำหรับใช้เป็นสารละลายมาตรฐานภายใน (Internal standard) มีจำนวน 2 ชนิด คือ Acenaphthene-d10 (ACE-d10) และ Perylene-d12 (PER-d12) ทำการเตรียมโดยชั่งสารละลายมาตรฐานภายในทั้ง 2 ชนิด อย่างละ 5 มิลลิกรัม ละลายในตัวละลายซึ่งเป็นสารผสมระหว่างไดคลอโรมีเทน:เฮกเซน อัตราส่วน 1:1 ปริมาตรโดยปริมาตร ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานภายในผสมที่ความเข้มข้น 300 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร 600 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และ 1,000 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร สารละลายมาตรฐานภายในผสมจะถูกเติมเข้าสู่สารละลายมาตรฐานพีเอเอชปริมาณ 200 ไมโครลิตรให้ได้ความเข้มข้นของ ACE-d10 ปริมาณ 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และ PER-d12 ปริมาณ 200 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ในปริมาตรสุดท้าย 2 มิลลิลิตร

2) การสกัดและวิเคราะห์ตัวอย่างกระดาดากรองอนุภาคฝุ่นเพื่อวิเคราะห์หาสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช)

นำกระดาดากรองเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารพีเอเอชจำนวน 16 ชนิด ได้แก่ Naphthalene (NAP), Acenaphthylene (ACY), Acenaphthene (ACE), Fluorene (FLU), Phenanthrene (PHE), Anthracene (ANT), Fluoranthene (FLA), Pyrene (PYR), Benz[a]anthracene (BaA), Chrysene (CHR), Benzo[b]fluoranthene (BbF), Benzo[k]fluoranthene (BkF), Benzo[a]pyrene (BaP), Indeno[1,2,3-cd]pyrene (IND), Dibenz[a,h]anthracene (DbA) และ Benzo[g,h,i]perylene (BPER) โดยทำการสกัดสารพีเอเอชจากอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดตามวิธีของ Insian *et al.* (2022) และ Yabueng *et al.* (2020) ใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างไดคลอโรมีเทน:เฮกเซน อัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร สกัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 45 นาที (รูปที่ 9) จากนั้นนำสารละลายที่สกัดได้มากรองด้วยกระดาดากรองชนิด Nylon ที่มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า

0.45 ไมโครเมตร ระเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (รูปที่ 10) จนกระทั่งสารละลายเหลือปริมาตรน้อยกว่า 2 มิลลิลิตร เติมสารละลายมาตรฐานภายใน (Internal standard) จำนวน 2 ตัว คือ Acenaphthene-d10 (ACE-d10) และ Perylene-d12 (PER-d12) และปรับปริมาตรเป็น 2 มิลลิลิตรด้วยตัวทำละลายผสม จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารพีเอเอชแต่ละชนิด ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A-5977E ประเทศสหรัฐอเมริกา (รูปที่ 11) โดยใช้คอลัมน์ Rxi-5Sil MS capillary column ใช้แก๊สฮีเลียมเป็น Carrier gas ปริมาตรในการฉีดคือ 1 ไมโครลิตร โหมด Splitless และอุณหภูมิในการฉีดที่ 275 องศาเซลเซียส สำหรับกำหนดโปรแกรมอุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้นที่ 70 องศาเซลเซียส ตั้งให้อุณหภูมิคงที่ 2 นาที จากนั้นกำหนดให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 70-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 8 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งให้อุณหภูมิคงที่ 2 นาที จากนั้นกำหนดให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 200-260 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งให้อุณหภูมิคงที่ 8 นาที แล้วกำหนดให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 260-290 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 15 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งให้อุณหภูมิคงที่ 7 นาที และกำหนดให้อุณหภูมิสุดท้ายคงที่ที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที รวมใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 45 นาทีต่อตัวอย่าง



รูปที่ 9 เครื่องอัลตราโซนิค สำหรับสกัดสารพีเอเอชออกจากกระดาศกรอง

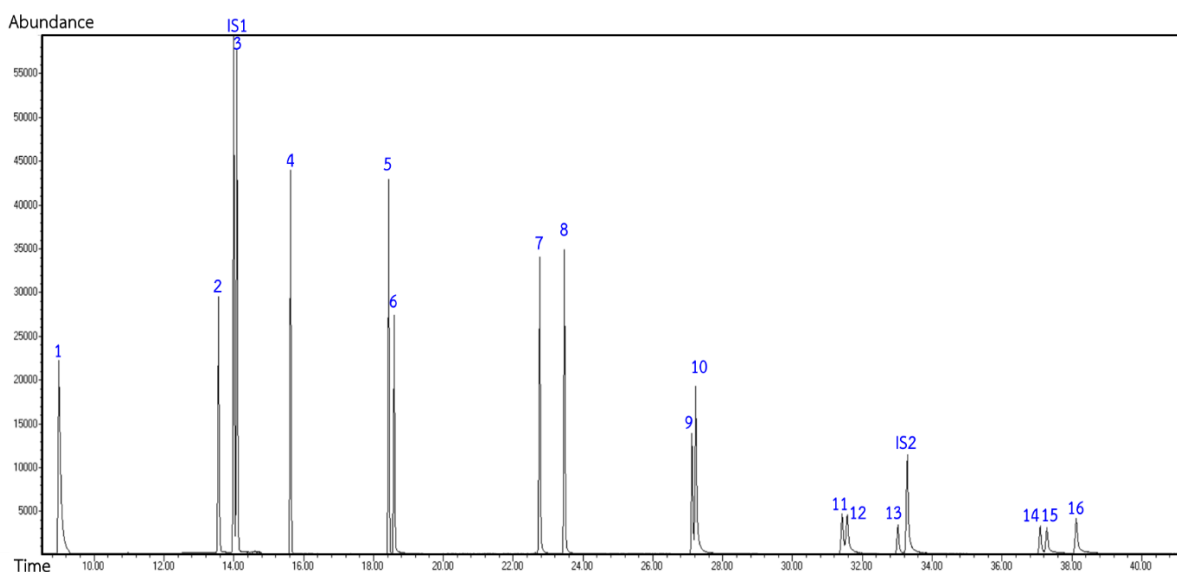


รูปที่ 10 เครื่องระเหยสุญญากาศ



รูปที่ 11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A-5977E

การหาปริมาณสารพีเอเอช จำนวน 16 ชนิด ในอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดจะใช้สมการเส้นตรงในการหาปริมาณสารพีเอเอชแต่ละชนิดในตัวอย่าง กราฟมาตรฐานของสารพีเอเอช ได้จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานพีเอเอช ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่าง 1-20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยความเข้มข้น 1, 2, 4, 6, 8, 10 และ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร การคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) จะได้โครมาโทแกรมของสารพีเอเอชแต่ละชนิด ณ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้การเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ detector อ่านค่าสัญญาณสูงสุด (peak) ของสารพีเอเอชทั้ง 16 ชนิดและ สารมาตรฐานภายใน (internal standard) จำนวน 2 ชนิด โดยกราฟโครมาโทแกรมของสารพีเอเอช ทั้ง 16 ชนิดและ สารมาตรฐานภายใน (internal standard) จำนวน 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ 12



1= Naphthalene	2= Acenaphthylene	3=Acenaphthene	4=Fluorene	5=Phenanthrene
6=Anthracene	7=Fluoranthene	8=Pyrene	9=Benz[a]anthracene	10=Chrysene
11=Benzo[b]fluoranthene	12=Benzo[k] fluoranthene	13=Benzo[a]pyrene	14=Indeno[1,2,3-cd]pyrene	15=Dibenz[a,h]anthracene
16=Benzo[g,h,i]perylene	IS1= Acenaphthene-d10	IS2=Perylene-d12		

รูปที่ 12 ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานพีเอเอช ทั้ง 16 ชนิดและสารมาตรฐานภายใน 2 ชนิดของสารละลายมาตรฐานพีเอเอช ที่ความเข้มข้น 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารพีเอเอชในสารละลายตัวอย่างสกัด ใช้วิธีการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารพีเอเอชแต่ละตัว โดยแกน X แสดงความเข้มข้นของสาร 1 2, 4, 6, 8, 10 และ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และแกน Y แสดงความสูงของพีคระหว่างสารพีเอเอชแต่ละตัวที่ความเข้มข้นนั้นๆ เทียบกับ Internal standard คือ ACE-d10 หรือ PER-d12 โดยกราฟที่ยอมรับได้ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มากกว่า 0.995 จากนั้นคำนวณหาความเข้มข้นของสารพีเอเอชในหน่วย นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศ โดยเทียบจากปริมาณสารที่วิเคราะห์ได้กับปริมาณของอากาศที่เก็บตัวอย่าง ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมทั้ง 16 ชนิด (Total PAHs; tPAHs) แสดงดังสมการที่ 1

$$tPAHs = \sum [PAH_i] \quad (1)$$

โดยที่ $[PAH_i]$ คือ ความเข้มข้นของสารพีเอเอชแต่ละชนิด จำนวน 16 ชนิด

3.3.4 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในมนุษย์ด้านการเกิดมะเร็ง

1) การคำนวณหาค่าความเป็นพิษจากสารพีเอเอช (Toxicity equivalent concentration; TEQ)

คำนวณหาค่าความเป็นพิษจากสารพีเอเอช จากสมการที่ 2

$$TEQ = \sum_i [C_i \times TEF_i] \quad (2) \quad \text{โดยที่ } C_i \text{ คือ ความเข้มข้นของพีเอเอชแต่ละชนิด}$$

TEF_i คือ ปัจจัยความเป็นพิษ

ค่าความเป็นพิษจากสารพีเอเอช (TEQ) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การคำนวณจากสมการที่ 3 ซึ่งกำหนดโดย Nisbet & LaGoy (1992)

$$TEQ = 0.001(NAP + ACY + ACE + FLU + PHE + FLA + PYR) + 0.01(ANT + BPER + CHR) + 0.1(BaA + BbF + BkF + IND) + BaP + DbA \quad (3)$$

โดยที่ NAP หมายถึง Naphthalene, ACY หมายถึง Acenaphthylene, ACE หมายถึง Acenaphthene, FLU หมายถึง Fluorene, PHE หมายถึง Phenanthrene, FLA หมายถึง Fluoranthene, PYR หมายถึง Pyrene, ANT หมายถึง Anthracene, BPER หมายถึง Benzo[g,h,i]perylene, CHR หมายถึง Chrysene, BaA หมายถึง Benz[a]anthracene, BbF หมายถึง Benzo[b]fluoranthene, BkF หมายถึง Benzo[k]fluoranthene, IND หมายถึง Indeno[1,2,3-cd]pyrene, BaP หมายถึง Benzo[a]pyrene, DbA หมายถึง Dibenz[a,h]anthracene

2) การประเมินความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งจากการหายใจ

นำค่าความเป็นพิษจากสารพีเอเอชมาประเมินความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งจากการหายใจ (Inhalation cancer risk; ICR) ตลอดช่วงระยะเวลา 70 ปี โดยใช้สมการที่ 4 ซึ่งกำหนดโดยองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA, 2005)

$$ICR = TEQ \times IUR_{BaP} \quad (4)$$

IUR_{BaP} คือ หน่วยความเสี่ยงจากการหายใจ หมายถึง ความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งจากอายุ (ค่ากำหนดประมาณ 70 ปี) จำนวนในหน่วยมวลของเบนโซ(เอ)ไพรีน (BaP) (ลูกบาศก์เมตร/ไมโครกรัม) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO, 2000) ได้กำหนดค่า IUR_{BaP} มีค่าเท่ากับ 8.7×10^{-2} ลูกบาศก์เมตร/ไมโครกรัม โดยค่า ICR ที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่า 10^{-6} แปลว่า มีความเสี่ยงจากการสัมผัสต่ำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ มีค่าอยู่ระหว่าง $10^{-6} - 10^{-4}$ หมายถึง มีความเสี่ยงจากการสัมผัสปานกลาง มีค่ามากกว่า 10^{-4} หมายถึง มีความเสี่ยงจากการสัมผัสสูง

(Insian *et al.*, 2022; Wiriya *et al.*, 2013; Thepnuan & Chantara, 2020)

สำหรับการประเมินความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งจากการหายใจ จำแนกรายกลุ่มอายุ ใช้การคำนวณหาค่าความเสี่ยงในการก่อให้เกิดมะเร็งตลอดช่วงชีวิต (Incremental Lifetime Cancer Risk; ILCR) 70 ปีจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะอยู่กับอนุภาคฝุ่นทางการหายใจ โดยพิจารณาแยกตามกลุ่มอายุทั้งหมดจำนวน 6 กลุ่ม ประกอบด้วย วัยเด็ก ได้แก่ กลุ่มอายุ 1-<2 ปี กลุ่มอายุ 2-<3 ปี กลุ่มอายุ 3-<6 ปี กลุ่มอายุ 6-<11 ปี กลุ่มอายุ 11-<16 ปี และวัยผู้ใหญ่ ได้แก่ กลุ่มอายุ 16-<70 ปี คำนวณค่า ILCR จากสมการที่ 5

$$ILCR = \frac{\left[CSF \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \right] \times TEQ \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf \quad (5)$$

โดยที่ CFS (Inhalation carcinogenic slope factor) คือ สัมประสิทธิ์ความชันในการก่อให้เกิดมะเร็ง มีค่าเท่ากับ 3.85 มก./กก.วัน (Pongpiachan, 2016)

BW (Body Weight) คือ น้ำหนักตัวโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (กก.)

IR (Inhalation Rate) คือ อัตราการหายใจ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ลบ.ม.ต่อชม.)

ET (Exposure Time) คือ ระยะเวลาที่ได้สัมผัส ชั่วโมงต่อวัน (ชม.ต่อวัน)

EF (Exposure Frequency) คือ ความถี่ของการรับสัมผัส มีหน่วยเป็น วันต่อปี

ED (Exposure Duration) คือ ระยะเวลาที่สัมผัส มีหน่วยเป็น ปี

AT (Averaging Time) คือ อายุขัยเฉลี่ยของประชากรที่จะได้รับความเสี่ยง มีหน่วยเป็น ชั่วโมง (รายละเอียดดังตารางที่ 4)

ค่า ILCR ที่คำนวณได้มีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-6} - 10^{-4} แสดงว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจ ถ้ามีค่ามากกว่า 1.0×10^{-4} หมายถึง มีความเสี่ยงจากการรับสัมผัสสูงหรืออยู่ในระดับที่ไม่ปลอดภัย

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ประเมินความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งจากการหายใจจำแนกรายกลุ่มอายุ (Kawichai & Bootdee, 2022; Tadsanaprasittipol *et al.*, 2021)

กลุ่มอายุ	BW	IR	ET	EF	ED	AT
	(กก.)	(ลบ.ม./วัน)	(ชม./วัน)	(วัน/ปี)	(ปี)	(ชั่วโมง)
วัยเด็ก (1-15 ปี)						
1-<2 ปี	11.4	5.4	24	350	1	1,460
2-<3 ปี	13.8	8.9	24	350	1	1,460
3-<6 ปี	18.6	10.1	24	350	3	4,380
6-<11 ปี	31.8	12.0	24	350	5	7,300
11-<16 ปี	56.8	15.2	24	350	5	7,300
วัยผู้ใหญ่ (16-70 ปี)						
16-70 ปี	80	17.5	24	350	54	78,840

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นและความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดด้วยวิธีวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's Correlation)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) มีวัตถุประสงค์ เพื่อวัดความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 โดยมีผลการศึกษาตามลำดับวัตถุประสงค์ดังนี้

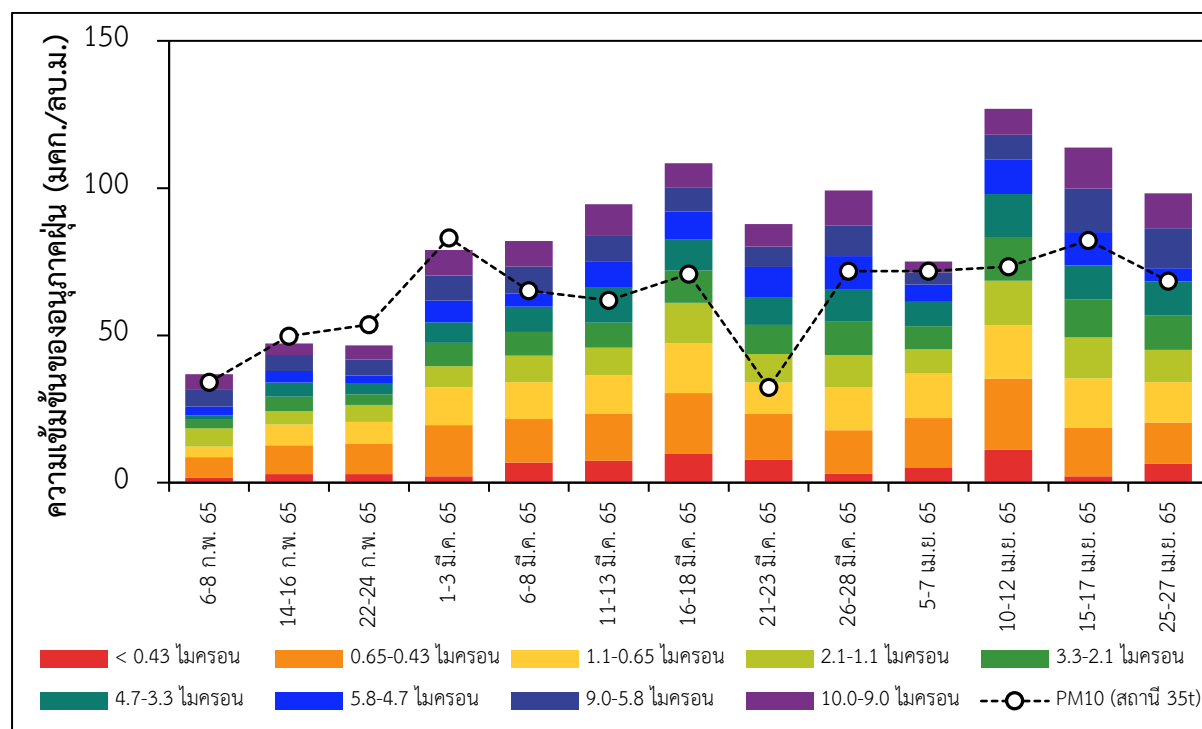
4.1 อนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศ

4.1.1 ความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศ

การวิจัยนี้ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด จำนวน 9 ขนาด แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น ประกอบด้วย 1) ฝุ่นหยาบ (Coarse particles) ชั้นที่ 0 ถึง ชั้นที่ 4 (จำนวน 5 ชั้น) ที่มีขนาดตั้งแต่ 10.0 ไมครอน – 2.1 ไมครอน ($PM_{10.0-2.1}$) 2) ฝุ่นละเอียด (Fine particles) ประกอบด้วยฝุ่นชั้นที่ 5 ถึง ชั้นที่ 7 ที่มีขนาดตั้งแต่ 2.1 ไมครอน – 0.43 ไมครอน ($PM_{2.1-0.43}$) และ 3) ฝุ่นละเอียดมาก (Ultrafine particles) ประกอบด้วยฝุ่นชั้นที่ 8 ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.43 ไมครอน ($PM_{<0.43}$) ในการตรวจสอบความถูกต้องของความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นที่ทำการเก็บตัวอย่าง นำความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นรวมทั้ง 9 ขนาด (PM_{10}) ตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างแต่ละครั้ง เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น PM_{10} จากข้อมูลสถานีตรวจวัดฝุ่นละอองของกรมควบคุมมลพิษ สถานี 35t ที่ตั้งอยู่บริเวณศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งห่างจากสถานีเก็บตัวอย่างจากการวิจัยในครั้งนี้ 4.3 กิโลเมตร โดยความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดที่สามารถคำนวณได้ แสดงดังรูปที่ 13 และตารางที่ 5

ความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นรวมทั้ง 9 ขนาด (PM_{10}) ในช่วงฤดูหมอกควันปี 2565 มีค่าระหว่าง 36.86-126.87 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.28 ± 27.32 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเข้มข้นฝุ่นสูงสุดเท่ากับ 126.87 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ณ วันที่ 10-12 เมษายน 2565 ต่ำสุด เท่ากับ 36.86 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ณ วันที่ 6-8 กุมภาพันธ์ 2565 รายละเอียดดังรูปที่ 13

พบสัดส่วนความเข้มข้นสูงสุดที่อนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน ร้อยละ 18.08 (ค่าเฉลี่ย 15.24 ± 4.51 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองลงมาเป็นอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน ร้อยละ 14.83 (ค่าเฉลี่ย 12.49 ± 4.29 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน ร้อยละ 11.38 (ค่าเฉลี่ย 9.59 ± 3.26 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน ร้อยละ 10.50 (ค่าเฉลี่ย 8.85 ± 3.53 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน ร้อยละ 10.43 (ค่าเฉลี่ย 8.79 ± 3.81 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 9.0-5.8 ไมครอน ร้อยละ 10.00 (ค่าเฉลี่ย 8.42 ± 3.13 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 10.0-9.0 ไมครอน ร้อยละ 9.85 (ค่าเฉลี่ย 8.30 ± 3.22 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน ร้อยละ 8.63 (ค่าเฉลี่ย 7.27 ± 3.32 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.43 ไมครอน ร้อยละ 6.30 (ค่าเฉลี่ย 5.31 ± 3.14 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ตามลำดับ เมื่อจำแนกขนาดอนุภาคฝุ่นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่น พบสัดส่วนของอนุภาคฝุ่นหยาบสูงสุดร้อยละ 49.41 (ค่าเฉลี่ย 41.64 ± 15.08 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองลงมาเป็นอนุภาคฝุ่นละเอียด ร้อยละ 44.29 (ค่าเฉลี่ย 37.32 ± 11.49 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอนุภาคฝุ่นละเอียดมาก ร้อยละ 6.30 (ค่าเฉลี่ย 5.31 ± 3.14 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รายละเอียดดังตารางที่ 5

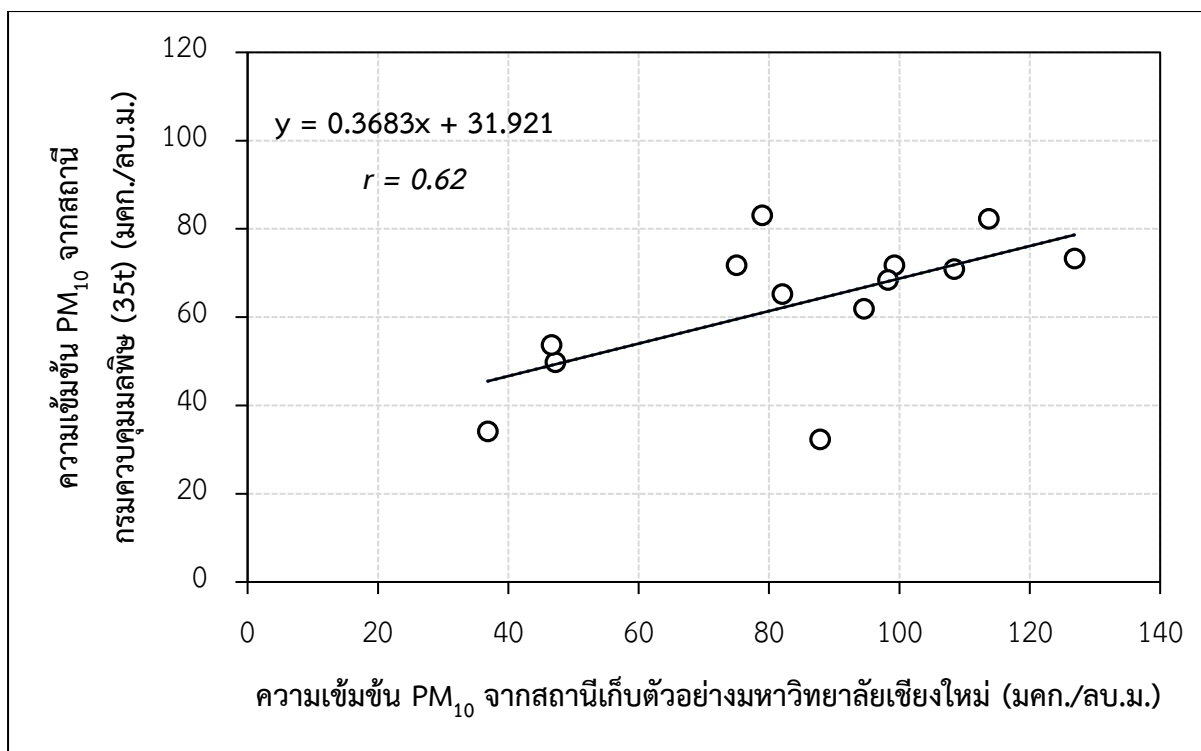


รูปที่ 13 ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด จำแนกตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นเฉลี่ย (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และสัดส่วนของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)	ความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					สัดส่วน (ร้อยละ)
	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	สูงสุด	ต่ำสุด	
10.0-9.0	8.30	±	3.22	13.82	3.66	9.85
9.0-5.8	8.42	±	3.13	14.80	4.15	10.00
5.8-4.7	7.27	±	3.32	11.61	2.82	8.63
4.7-3.3	8.79	±	3.81	14.85	1.23	10.43
3.3-2.1	8.85	±	3.53	14.56	3.07	10.50
2.1-1.1	9.59	±	3.26	15.13	4.60	11.38
1.1-0.65	12.49	±	4.29	18.12	3.64	14.83
0.65-0.43	15.24	±	4.51	24.17	6.95	18.08
< 0.43	5.31	±	3.14	11.17	1.68	6.30
ฝุ่นหยาบ (10.0-2.1)	41.64	±	15.08	64.40	18.37	49.41
ฝุ่นละเอียด (2.1-0.43)	37.32	±	11.49	57.42	16.81	44.29
ฝุ่นละเอียดมาก (< 0.43)	5.31	±	3.14	11.17	1.68	6.30
ฝุ่นรวม (PM ₁₀)	84.28	±	27.32	126.87	36.86	100.00

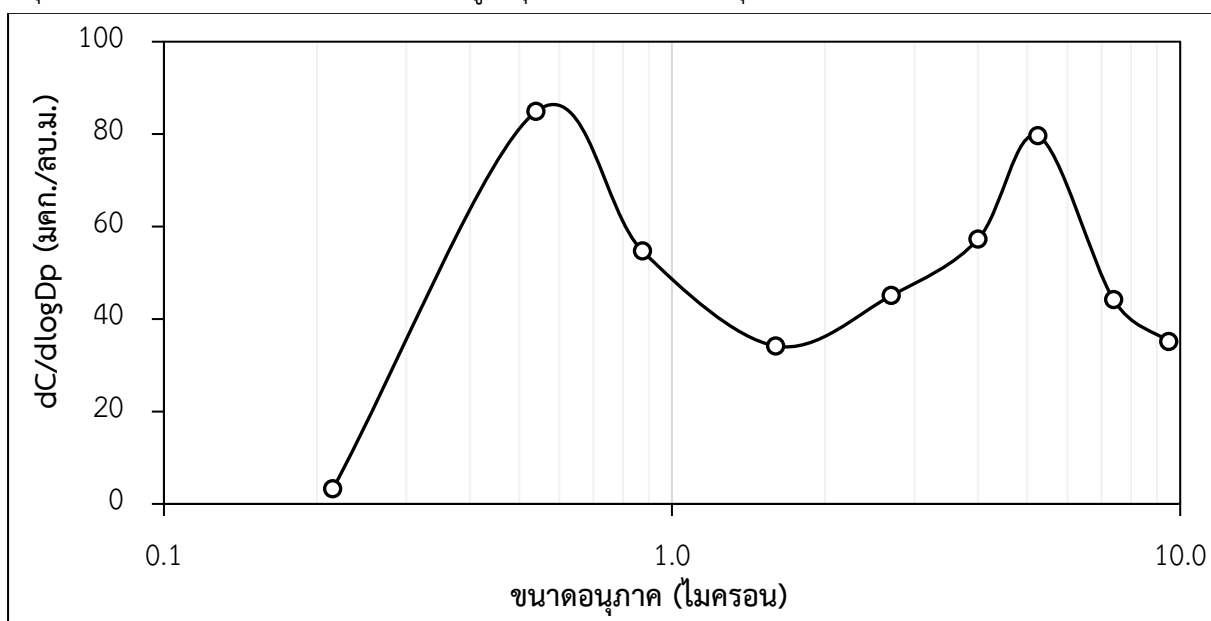
ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมทุกขนาด (PM₁₀) ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างที่สถานีเก็บตัวอย่างชั่วคราวมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นฝุ่น PM₁₀ จากข้อมูลสถานีตรวจวัดฝุ่นของกรมควบคุมมลพิษ สถานี 35t ที่ตั้งอยู่บริเวณศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ พบมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่าระดับความสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.62 ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM₁₀ จากสถานีกรมควบคุมมลพิษกับความเข้มข้น PM₁₀ จากการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาด

4.1.2 การกระจายของอนุภาคฝุ่น

รูปแบบการกระจายของอนุภาคฝุ่นเฉลี่ยในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 แสดงดังรูปที่ 15 พบว่ามีรูปแบบการกระจายของอนุภาคเป็นแบบ Bimodal distribution มีพีคหลักอยู่ในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดอนุภาค 0.65-0.43 ไมครอน และพีครองอยู่ในฝุ่นหยาบที่มีขนาดอนุภาค 5.8-4.7 ไมครอน

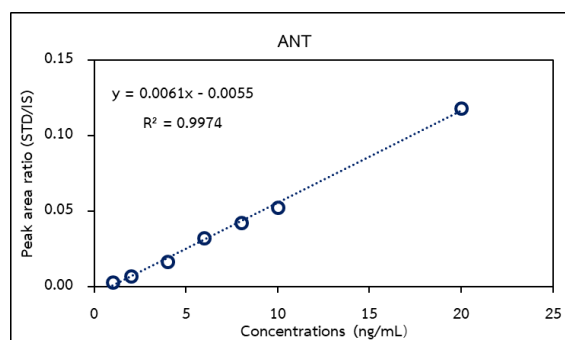
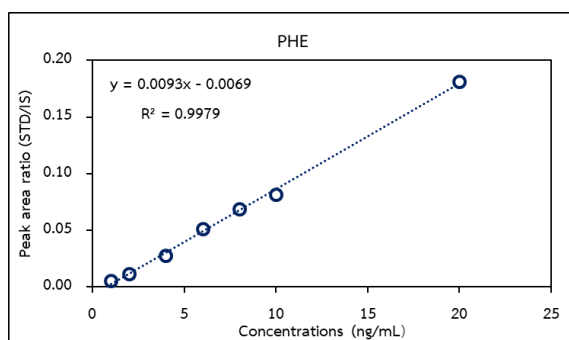
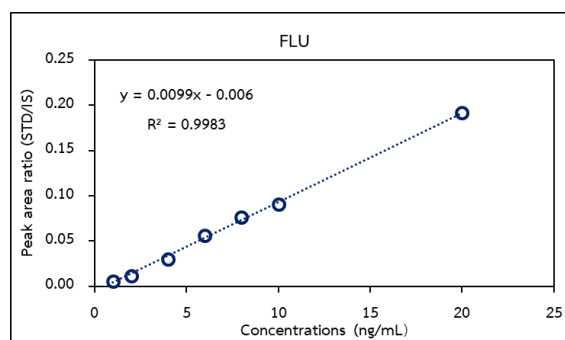
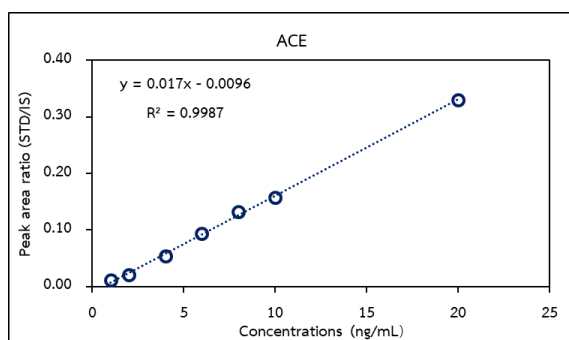
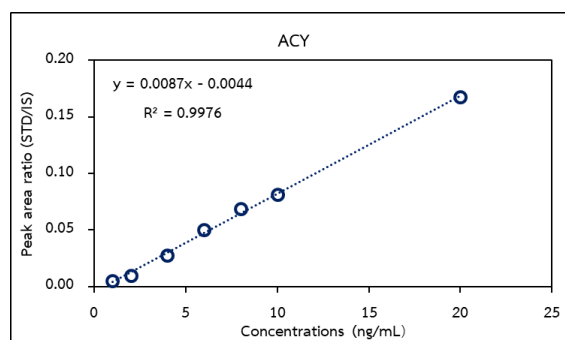
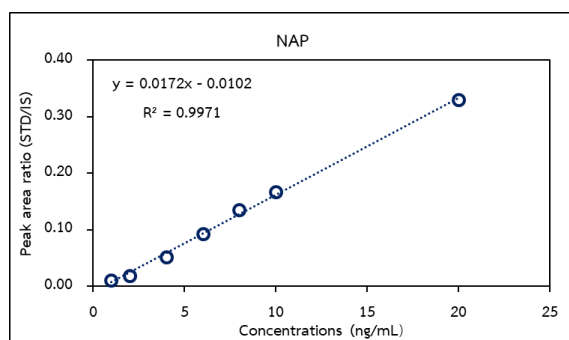


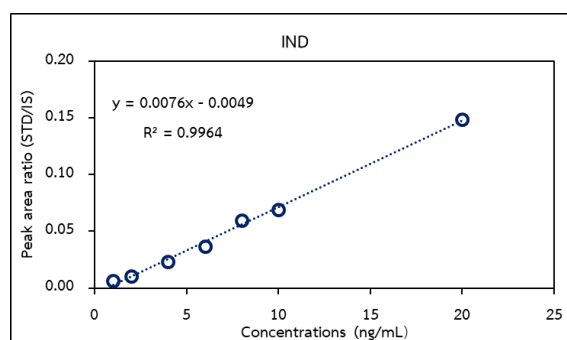
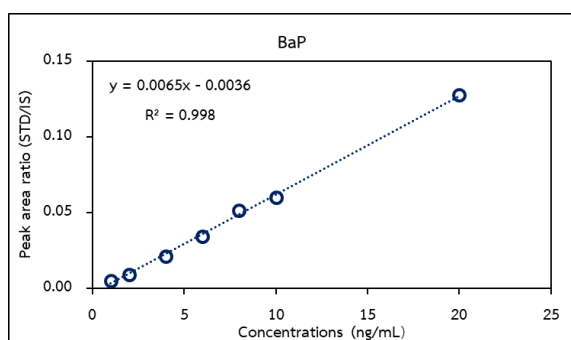
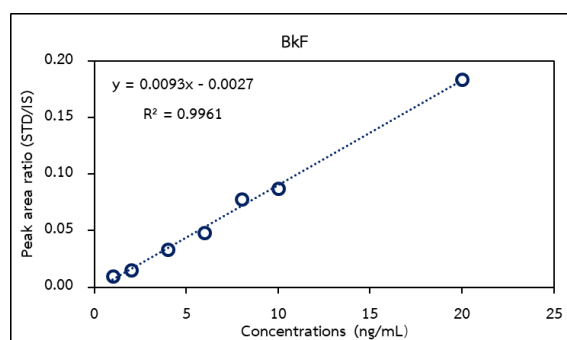
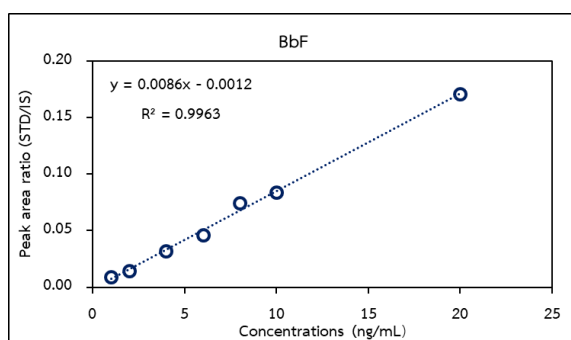
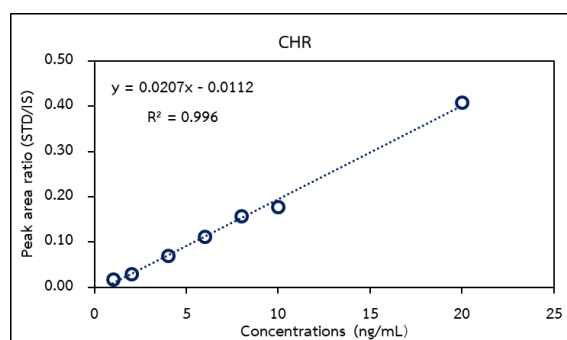
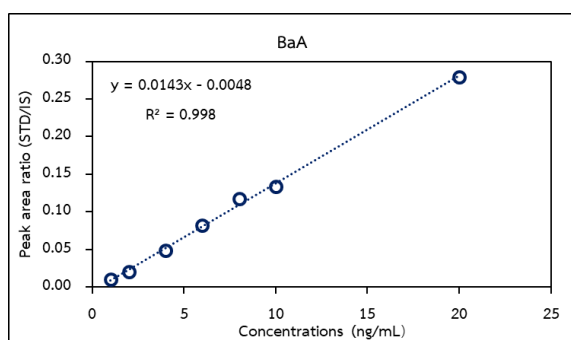
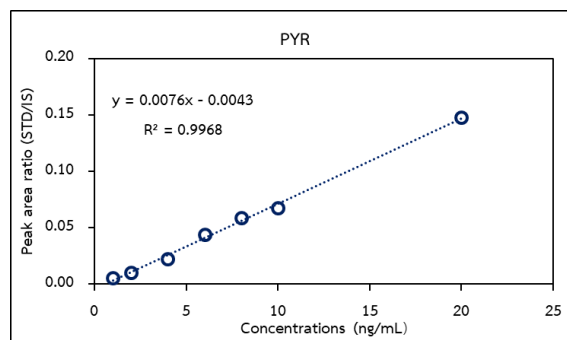
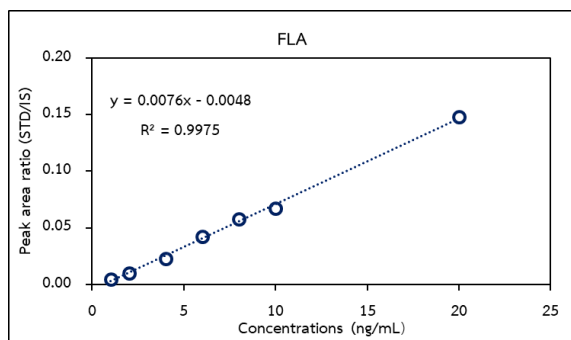
รูปที่ 15 รูปแบบการกระจายของปริมาณอนุภาคฝุ่นเฉลี่ยในฤดูหมอกควัน ปี 2565

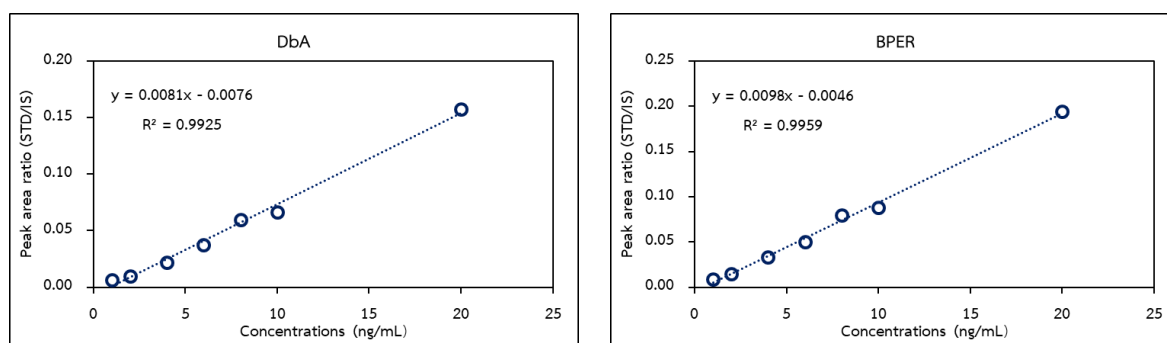
4.2 คุณลักษณะของการวิเคราะห์หาสารพีเอเอช โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS)

4.2.1 กราฟมาตรฐานและสมการเส้นตรง สำหรับวิเคราะห์หาสารพีเอเอชแต่ละชนิด

กราฟมาตรฐาน สมการเส้นตรง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ใช้สำหรับคำนวณหาปริมาณของสารพีเอเอชแต่ละชนิด โดยใช้สารละลายมาตรฐานพีเอเอช 1-20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (ng/mL) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.995-0.999 แสดงว่าเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับใช้คำนวณหาความเข้มข้นของสารพีเอเอชแต่ละชนิด รายละเอียดดังรูปที่ 16







รูปที่ 16 กราฟมาตรฐาน สมการเส้นตรง และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสารละลายพีเอเอชทั้ง 16 ชนิด

4.2.2 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of Detection: LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantification: LOQ) ทำโดยการวัดตัวอย่างแบบลวกจำนวน 7 ซ้ำ ความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) รายงานด้วยค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) และ ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำใกล้เคียงกับค่า LOQ ค่าขีดจำกัดของการวิเคราะห์ของสารพีเอเอช ทั้ง 16 ชนิด อยู่ระหว่าง 0.079-0.355 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ อยู่ระหว่าง 0.304-1.154 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร วิธีวิเคราะห์นี้มีความถูกต้องสูง โดยมีร้อยละของการคืนกลับ อยู่ระหว่าง 61%-120% (ค่าที่ยอมรับได้คือ 80%-120%) ร้อยละของการคืนกลับของสารแนฟทาไลน์ (NAP) มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 80 เนื่องจากแนฟทาไลน์เป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำและง่ายต่อการระเหยระหว่างการสกัด สำหรับความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์มีความเที่ยงสูง โดยค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ อยู่ระหว่าง 2%-14% (ค่าที่ยอมรับได้น้อยกว่า 15%) รายละเอียดของค่า LOD LOQ %Recovery และ %RSD ของสารพีเอเอชแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่า LOD LOQ %Recovery และ %RSD ของการวิเคราะห์สารพีเอเอช 16 ชนิดด้วยเครื่อง GC-MS

ชนิดของสาร	ความสามารถในการวิเคราะห์		ความถูกต้อง	ความเที่ยง
PAHs	LOD	LOQ	ร้อยละของการคืนกลับ	ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
	(ng/mL)	(ng/mL)	(% Recovery)	(%RSD)
	(N=7)	(N=7)		
NAP	0.340	1.133	61	14
ACY	0.120	0.401	82	4
ACE	0.123	0.411	93	4
FLU	0.190	0.633	86	6
PHE	0.091	0.304	88	3
ANT	0.132	0.440	87	5

ชนิดของสาร	ความสามารถในการวิเคราะห์		ความถูกต้อง	ความเที่ยง
PAHs	LOD (ng/mL) (N=7)	LOQ (ng/mL) (N=7)	ร้อยละของการคืนกลับ (% Recovery)	ร้อยละส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
FLA	0.186	0.621	98	6
PYR	0.140	0.467	111	5
BaA	0.145	0.482	114	4
CHR	0.162	0.539	120	4
BbF	0.079	0.264	103	2
BkF	0.155	0.516	99	4
BaP	0.328	1.092	107	8
IND	0.355	1.182	94	9
DbA	0.346	1.154	82	7
BPER	0.164	0.548	87	4

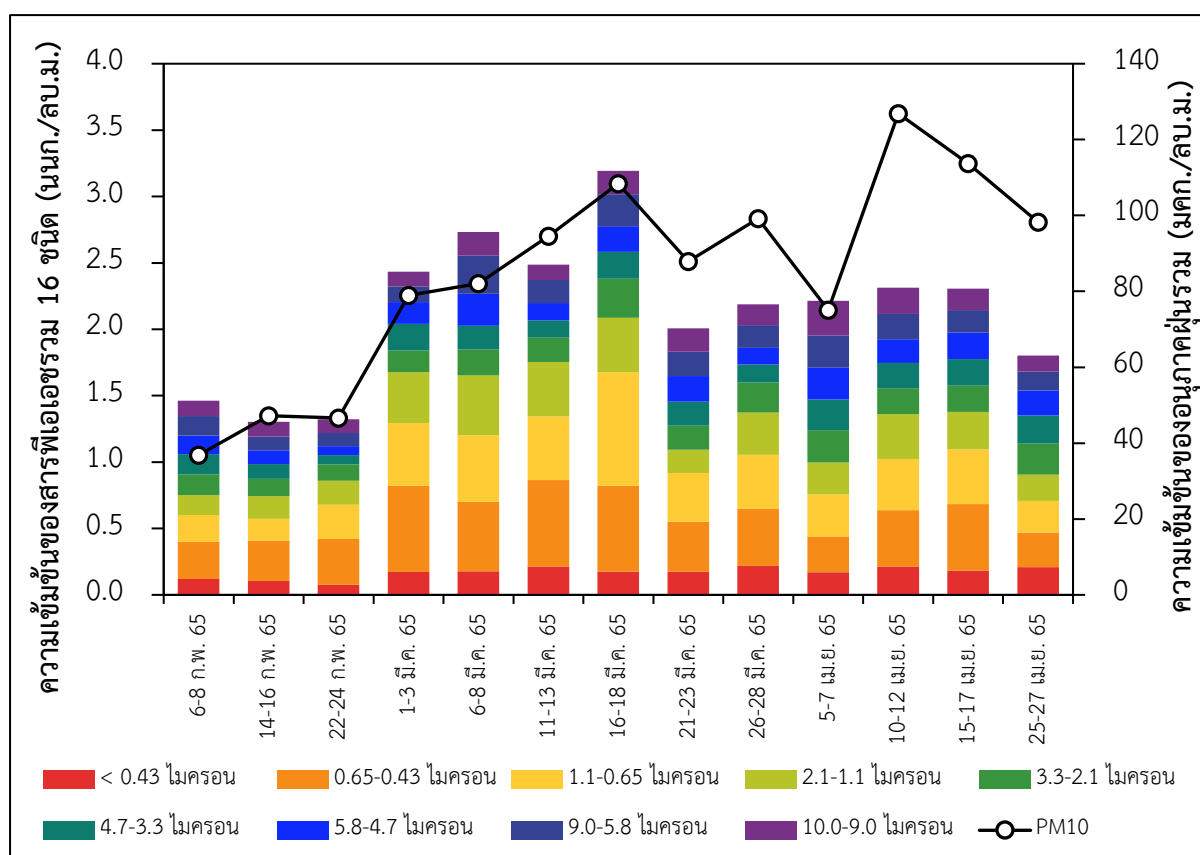
4.3 สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน(พีเอเอช) ที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

4.3.1 ความเข้มข้นสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ความเข้มข้นของสารพีเอเอช รวม 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นรวมทั้ง 9 ขนาด (PM₁₀) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.30-3.19 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.14 ± 0.51 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบสารพีเอเอชรวม 16 ชนิด สูงสุดเท่ากับ 3.19 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ณ วันที่ 16-18 มีนาคม 2565 ต่ำสุดเท่ากับ 1.30 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ณ วันที่ 14-16 กุมภาพันธ์ 2565 รายละเอียดดังรูปที่ 17

เมื่อจำแนกตามสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น 3 ขนาด ได้แก่ อนุภาคฝุ่นหยาบ (10.0-2.1 ไมครอน) ฝุ่นละเอียด (2.1-0.43 ไมครอน) และฝุ่นละเอียดมาก (<0.43 ไมครอน) พบสัดส่วนของสารพีเอเอชรวมเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียดสูงสุด ร้อยละ 51.06 รองลงมาเป็นฝุ่นหยาบ ร้อยละ 40.70 และฝุ่นละเอียดมาก ร้อยละ 8.24 ตามลำดับ สัดส่วนความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมตามขนาดอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบสูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน ร้อยละ 20.37 (ค่าเฉลี่ย 0.44 ± 0.15 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองลงมาเป็นอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน ร้อยละ 18.21 (ค่าเฉลี่ย 0.39 ± 0.18 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน ร้อยละ 13.35 (ค่าเฉลี่ย 0.29 ± 0.11 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน ร้อยละ 9.08 (ค่าเฉลี่ย 0.19 ± 0.05 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 9.0-5.8 ไมครอน ร้อยละ 8.18 (ค่าเฉลี่ย 0.17 ± 0.06 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาดน้อยกว่า 0.43 ไมครอน ร้อยละ 7.97 (ค่าเฉลี่ย 0.17 ± 0.04 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน ร้อยละ 7.91 (ค่าเฉลี่ย 0.17 ± 0.05 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน ร้อยละ 7.78 (ค่าเฉลี่ย 0.17 ± 0.05 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

โนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอนุภาคฝุ่นขนาด 10.0-9.0 ไมครอน ร้อยละ 7.15 (ค่าเฉลี่ย 0.15 ± 0.05 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รายละเอียดดังตารางที่ 7



รูปที่ 17 ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิด เปรียบเทียบกับความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นรวม 9 ขนาด จำแนกตามระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง

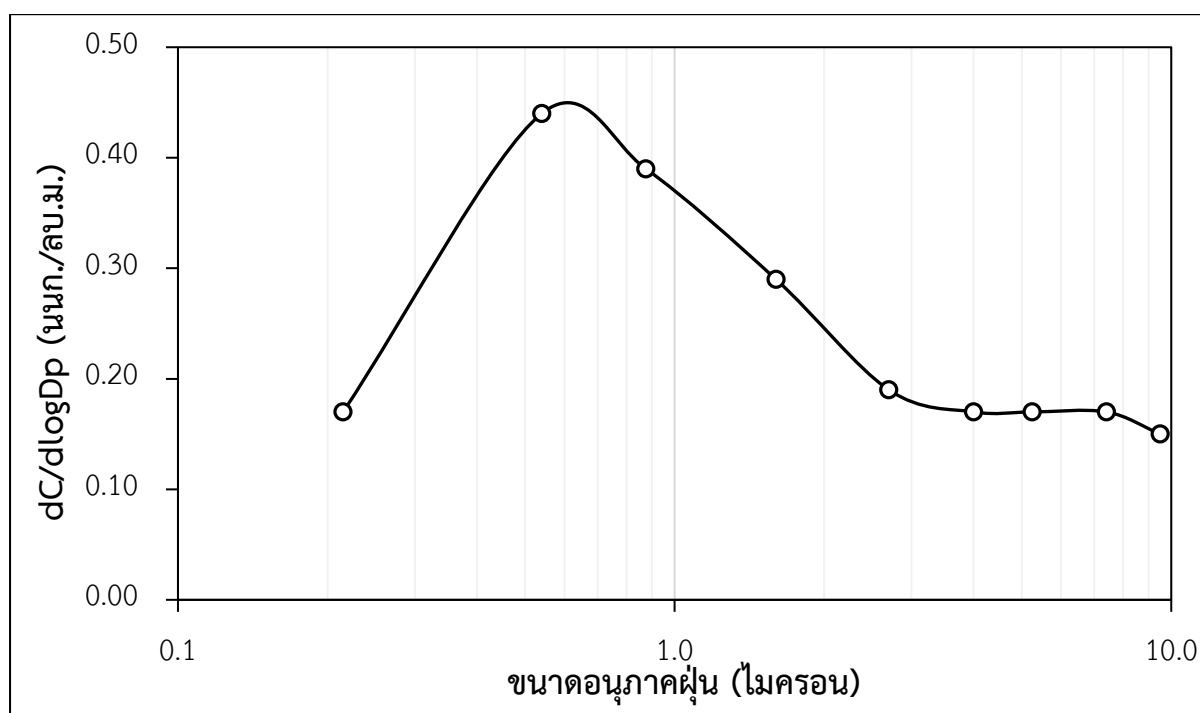
ตารางที่ 7 ความเข้มข้นและสัดส่วนของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)	ความเข้มข้นสารพีเอเอชรวม (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					สัดส่วน (ร้อยละ)
	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	สูงสุด	ต่ำสุด	
10.0 - 9.0	0.15	±	0.05	0.26	0.10	7.15
9.0 - 5.8	0.17	±	0.06	0.29	0.10	8.18
5.8 - 4.7	0.17	±	0.05	0.24	0.07	7.78
4.7 - 3.3	0.17	±	0.05	0.23	0.07	7.91
3.3 - 2.1	0.19	±	0.05	0.29	0.12	9.08
2.1 - 1.1	0.29	±	0.11	0.45	0.15	13.35
1.1 - 0.65	0.39	±	0.18	0.86	0.16	18.21

ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)	ความเข้มข้นสารพีเอเอชรวม (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					สัดส่วน (ร้อยละ)
	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	สูงสุด	ต่ำสุด	
0.65 - 0.43	0.44	±	0.15	0.65	0.26	20.37
< 0.43	0.17	±	0.04	0.22	0.08	7.97
ฝุ่นหยาบ (10.0 - 2.1)	0.87	±	0.19	1.22	0.46	40.70
ฝุ่นละเอียด (2.1 - 0.43)	1.09	±	0.38	1.91	0.63	51.06
ฝุ่นละเอียดมาก (< 0.43)	0.18	±	0.04	0.22	0.08	8.24
ฝุ่นรวม (PM ₁₀)	2.14	±	0.51	3.19	1.30	100.00

4.3.2 รูปแบบการกระจายของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

รูปแบบการกระจายของความเข้มข้นของสารพีเอเอชเฉลี่ยที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 แสดงดังรูปที่ 18 พบว่ามีรูปแบบการกระจายของอนุภาคเป็นแบบ Unimodal distribution มีพีคหลักอยู่ในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดอนุภาค 0.65-0.43 ไมครอน



รูปที่ 18 รูปแบบการกระจายของความเข้มข้นสารพีเอเอชรวมเฉลี่ยที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในฤดูหมอกควัน ปี 2565

4.3.3 ความเข้มข้นของสารพีเอเอชแต่ละชนิด ในอนุภาคฝุ่นรวม

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นและสัดส่วนของสารพีเอเอชแต่ละชนิดในอนุภาคฝุ่นรวม พบสารพีเอเอช 5 ชนิดหลัก ได้แก่ Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 12.76 (ค่าเฉลี่ย 0.29 ± 0.09 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) Naphthalene ร้อยละ 12.05 (ค่าเฉลี่ย 0.27 ± 0.14 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) Fluorene ร้อยละ 8.55 (ค่าเฉลี่ย 0.19 ± 0.09 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) Phenanthrene ร้อยละ 7.98 (ค่าเฉลี่ย 0.18 ± 0.08 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และ Acenaphthylene ร้อยละ 7.23 (ค่าเฉลี่ย 0.16 ± 0.11 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ตามลำดับ รายละเอียดดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความเข้มข้นและสัดส่วนของสารพีเอเอช 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นรวม

ชนิดของสารพีเอเอช	ความเข้มข้น (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					สัดส่วน (%)
	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	สูงสุด	ต่ำสุด	
Naphthalene	0.27	±	0.14	0.55	0.11	12.05
Acenaphthylene	0.16	±	0.11	0.33	0.08	7.23
Acenaphthene	0.11	±	0.06	0.20	0.02	4.81
Fluorene	0.19	±	0.09	0.32	0.02	8.55
Phenanthrene	0.18	±	0.08	0.29	0.04	7.98
Anthracene	0.08	±	0.05	0.17	0.01	3.73
Fluoranthene	0.14	±	0.06	0.24	0.03	6.29
Pyrene	0.15	±	0.06	0.25	0.05	6.56
Benz[a]anthracene	0.04	±	0.03	0.11	0.00	1.55
Chrysene	0.08	±	0.06	0.21	0.01	3.71
Benzo[b]fluoranthene	0.12	±	0.06	0.25	0.02	5.42
Benzo[k]fluoranthene	0.10	±	0.06	0.23	0.02	4.45
Benzo[a]pyrene	0.12	±	0.05	0.21	0.04	5.28
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.08	±	0.08	0.28	0.01	3.64
Dibenz[a,h]anthracene	0.29	±	0.09	0.39	0.13	12.76
Benzo[g,h,i]perylene	0.14	±	0.07	0.29	0.05	6.02

4.3.4 สัดส่วนของสารพีเอเอช 16 ชนิด จำแนกตามอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

สัดส่วนของสารพีเอเอช 5 ชนิดหลัก ที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด รายละเอียดดังตารางที่ 9 พบว่า

อนุภาคฝุ่นขนาด 10.0-9.0 ไมครอน พบสัดส่วนของ Dibenz[a,h]anthracene สูงสุด ร้อยละ 12.04 รองลงมาเป็น Indeno[1,2,3-cd]pyrene ร้อยละ 10.81 Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 10.49 Naphthalene ร้อยละ 9.04 และ Fluorene ร้อยละ 8.16 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 9.0-5.8 ไมครอน พบสัดส่วนของ Dibenz[a,h]anthracene สูงสุด ร้อยละ 10.72 รองลงมาเป็น Naphthalene ร้อยละ 10.15 Benzo[a]pyrene ร้อยละ 9.99 Indeno[1,2,3-cd]pyrene ร้อยละ 8.82 และ Fluorene ร้อยละ 8.25 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน พบสัดส่วนของ Dibenz[a,h]anthracene สูงสุด ร้อยละ 10.77 รองลงมาเป็น Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 10.24 Naphthalene ร้อยละ 10.02 Indeno[1,2,3-cd]pyrene ร้อยละ 9.97 และ Benzo[k]fluoranthene ร้อยละ 7.92 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน พบสัดส่วนของ Naphthalene สูงสุด ร้อยละ 11.01 รองลงมาเป็น Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 10.50 Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 9.86 Indeno[1,2,3-cd]pyrene ร้อยละ 9.67 และ Benzo[k]fluoranthene ร้อยละ 9.09 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน พบสัดส่วนของ Naphthalene สูงสุด ร้อยละ 12.06 รองลงมาเป็น Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 11.62 Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 8.57 Fluorene ร้อยละ 8.18 และ Phenanthrene ร้อยละ 7.55 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน พบสัดส่วนของ Naphthalene สูงสุด ร้อยละ 12.49 รองลงมาเป็น Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 11.44 Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 8.09 Benzo[b]fluoranthene ร้อยละ 7.26 และ Benzo[k]fluoranthene ร้อยละ 7.05 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน พบสัดส่วนของ Benzo[b]fluoranthene สูงสุด ร้อยละ 9.98 รองลงมาเป็น Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 9.93 Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 8.91 Naphthalene ร้อยละ 8.78 และ Benzo[a]pyrene ร้อยละ 8.27 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน พบสัดส่วนของ Benzo[b]fluoranthene สูงสุด ร้อยละ 11.38 รองลงมาเป็น Benzo[g,h,i]perylene ร้อยละ 10.60 Benzo[a]pyrene ร้อยละ 9.25 Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 8.19 และ Indeno[1,2,3-cd]pyrene ร้อยละ 6.95 ตามลำดับ

อนุภาคฝุ่นขนาดน้อยกว่า 0.43 ไมครอน พบสัดส่วนของ Naphthalene สูงสุด ร้อยละ 12.74 รองลงมาเป็น Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 12.65 Fluorene ร้อยละ 9.11 Acenaphthylene ร้อยละ 8.37 และ Phenanthrene ร้อยละ 8.29 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 สัดส่วนของสารพีเอเอช 16 ชนิด จำแนกตามอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ชนิดของสารพีเอเอช	ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)								
	10.0-9.0	9.0-5.8	5.8-4.7	4.7-3.3	3.3-2.1	2.1-1.1	1.1-0.65	0.65-0.43	<0.43
Naphthalene	9.04	10.15	10.02	11.01	12.06	12.49	8.78	6.26	12.74
Acenaphthylene	5.83	4.88	4.59	3.66	4.61	5.16	4.59	4.47	8.37
Acenaphthene	4.45	4.79	4.43	4.33	5.51	4.06	3.24	2.71	4.63
Fluorene	8.16	8.25	7.81	7.58	8.18	6.77	5.55	4.81	9.11
Phenanthrene	7.19	7.41	6.82	6.39	7.55	6.70	5.64	5.09	8.29
Anthracene	3.51	3.62	3.48	3.08	3.44	2.88	2.44	2.31	3.98
Fluoranthene	4.22	4.49	4.44	4.10	4.90	5.80	6.54	5.98	4.99
Pyrene	4.28	4.50	4.38	4.17	4.83	5.98	7.30	6.85	4.36
Benz[a]anthracene	2.08	1.60	2.12	2.09	1.94	1.47	2.00	2.64	1.90
Chrysene	3.30	2.74	2.62	2.44	3.19	4.53	5.27	5.72	3.75
Benzo[b]fluoranthene	3.93	3.73	4.18	4.89	4.71	7.26	9.98	11.38	1.74
Benzo[k]fluoranthene	6.14	6.79	7.92	9.09	6.78	7.05	6.95	6.79	3.31
Benzo[a]pyrene	4.55	9.99	6.20	7.14	6.59	7.04	8.27	9.25	5.45
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	10.81	8.82	9.97	9.67	5.53	3.27	4.61	6.95	7.44
Dibenz[a,h]anthracene	12.04	10.72	10.77	10.50	11.62	11.44	9.93	8.19	12.65
Benzo[g,h,i]perylene	10.49	7.52	10.24	9.86	8.57	8.09	8.91	10.60	7.30

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบว่า ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิด มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของฝุ่นในอนุภาคฝุ่นรวม (PM_{10}) ($r=0.701$) ฝุ่นละเอียด ($2.1 - 0.43 \mu m$) ($r=0.606$) ฝุ่นที่มีขนาดอนุภาค 3.3-2.1 ไมครอน ($r=0.638$) และฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน ($r=0.606$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 รายละเอียดดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)	ค่าระดับความสัมพันธ์ (r)	ค่า p -value
10.0 - 9.0	-0.093	0.762
9.0 - 5.8	0.043	0.890
5.8 - 4.7	0.246	0.418
4.7 - 3.3	0.479	0.097
3.3 - 2.1	0.638*	0.019
2.1 - 1.1	0.447	0.126
1.1 - 0.65	0.606*	0.028
0.65 - 0.43	0.506	0.078
< 0.43	0.499	0.083
ฝุ่นหยาบ (10.0 - 2.1)	0.423	0.150
ฝุ่นละเอียด (2.1 - 0.43)	0.606*	0.028
ฝุ่นละเอียดมาก (< 0.43)	0.499	0.083
ฝุ่นรวม (PM_{10})	0.701*	0.008

* p -value < 0.05

4.5 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการเป็นมะเร็งจากการหายใจ

4.5.1 ค่าความเป็นพิษจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชรวม (TEQ) และค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการเป็นมะเร็งจากการหายใจ (ICR)

ค่าความเป็นพิษจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชรวม (TEQ) ในอนุภาคฝุ่นรวม (PM_{10}) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.83 ± 0.20 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบค่าความเป็นพิษจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชรวมสูงในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมครอน พบค่าสูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน (ค่าเฉลี่ย 0.14 ± 0.04 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งพบสูงกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดอื่น 1.1-2.0 เท่า เมื่อนำค่าความเป็นพิษจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชรวมมาประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการเป็นมะเร็งจากการหายใจ (ICR)

ตลอดช่วงระยะเวลาอายุ 70 ปี พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.19×10^{-5} แสดงว่า มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อพิจารณาตามขนาดอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบความเสี่ยงปานกลางจากการหายใจสัมผัสอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน และ 0.65-0.43 ไมครอน สำหรับอนุภาคฝุ่นขนาดอื่นพบความเสี่ยงต่ำ อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รายละเอียดดังตารางที่ 11

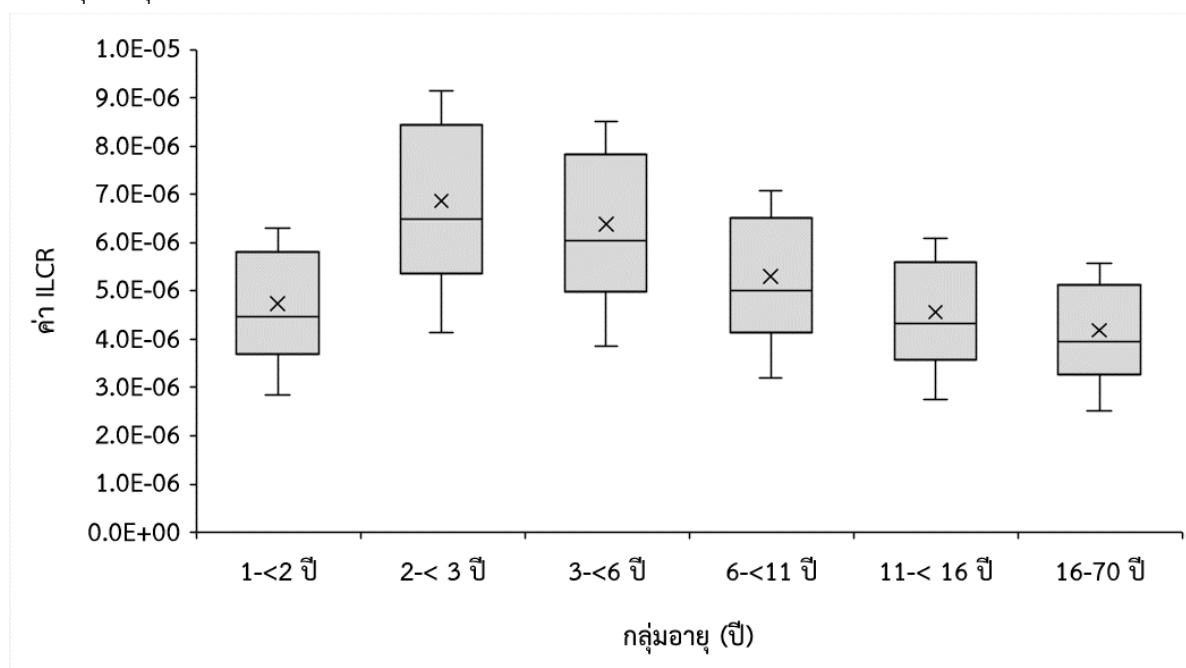
ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยความเป็นพิษของสารพีเอเอช (TEQ) และค่าเฉลี่ยความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งจากการหายใจ (ICR) ของอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)	ค่าความเป็นพิษ (นกก./ลบ.ม.)			ค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพการเป็นมะเร็ง จากการหายใจ			
	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	ค่าเฉลี่ย	±	S.D.	การแปลผล
10.0 - 9.0	0.07	±	0.02	6.40×10^{-6}	±	1.51×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
9.0 - 5.8	0.08	±	0.03	7.12×10^{-6}	±	2.32×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
5.8 - 4.7	0.08	±	0.02	6.61×10^{-6}	±	1.67×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
4.7 - 3.3	0.08	±	0.02	6.66×10^{-6}	±	1.57×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
3.3 - 2.1	0.08	±	0.02	7.36×10^{-6}	±	1.31×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
2.1 - 1.1	0.11	±	0.04	9.16×10^{-6}	±	3.05×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
1.1 - 0.65	0.13	±	0.05	1.14×10^{-5}	±	4.64×10^{-6}	เสี่ยงปานกลาง
0.65 - 0.43	0.14	±	0.04	1.18×10^{-5}	±	3.69×10^{-6}	เสี่ยงปานกลาง
< 0.43	0.07	±	0.02	6.50×10^{-6}	±	1.63×10^{-6}	เสี่ยงต่ำ
ฝุ่นรวม (PM ₁₀)	0.83	±	0.20	7.19×10^{-5}	±	1.75×10^{-5}	เสี่ยงปานกลาง

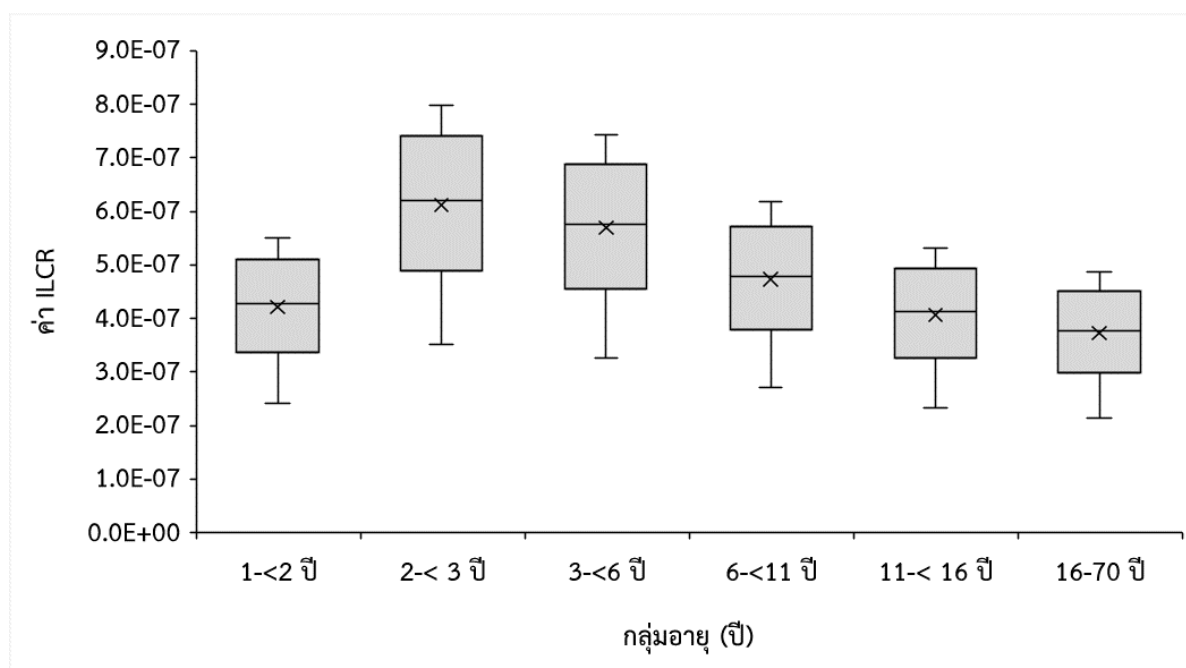
4.5.2 ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตลอดช่วงชีวิต (ILCR) จำแนกตามกลุ่มอายุและขนาดอนุภาคฝุ่น

ความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตลอดช่วงชีวิต (ILCR) ในอนุภาคฝุ่นรวม (PM₁₀) จำแนกตามกลุ่มวัย พบว่า ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตลอดช่วงชีวิตในกลุ่มวัยเด็ก (1- 15 ปี) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.8×10^{-6} - 9.2×10^{-6} (เฉลี่ย $5.6 \times 10^{-6} \pm 1.6 \times 10^{-6}$) และวัยผู้ใหญ่ (16-70 ปี) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.5×10^{-6} - 5.6×10^{-6} (เฉลี่ย $4.2 \times 10^{-6} \pm 1.0 \times 10^{-6}$) ค่า ILCR มีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-6} - 10^{-4} แสดงว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจ กลุ่มวัยเด็กมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจสูงกว่ากลุ่มวัยผู้ใหญ่ 1-2 เท่า เมื่อพิจารณาค่า ILCR ตามขนาดอนุภาคฝุ่น พบว่า อนุภาคฝุ่นขนาดเล็กจะมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจมากกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ พบค่า ILCR สูงสุดในอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน รองลงมาเป็น 1.1-0.65 ไมครอน และ 2.1-1.1 ไมครอนตามลำดับ ทั้งในวัยเด็กและวัยผู้ใหญ่ รายละเอียดดังรูปที่ 19 (ก-ญ)

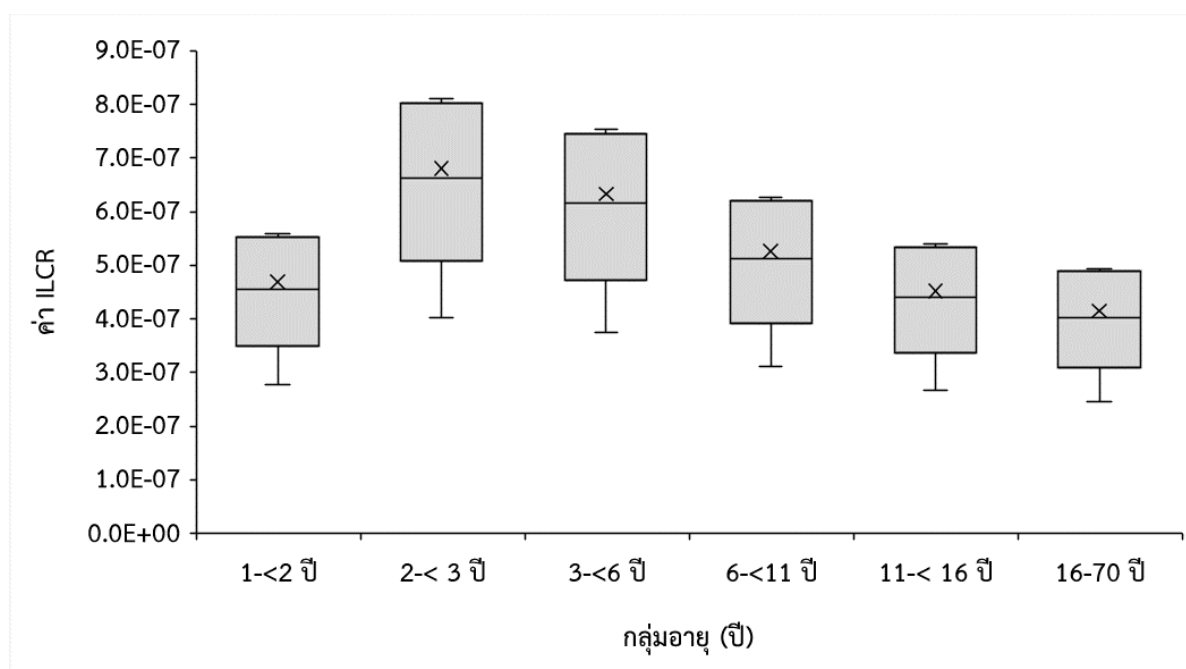
(ก) อนุภาคฝุ่นรวม



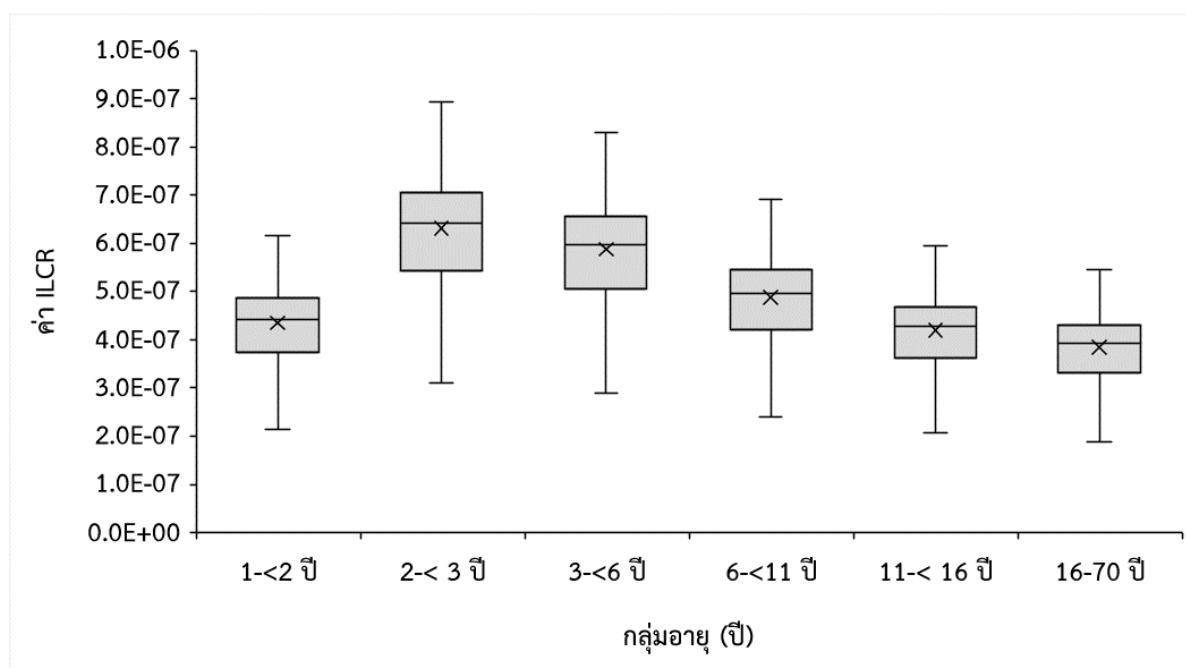
(ข) อนุภาคฝุ่นขนาด 10.0-9.0 ไมครอน



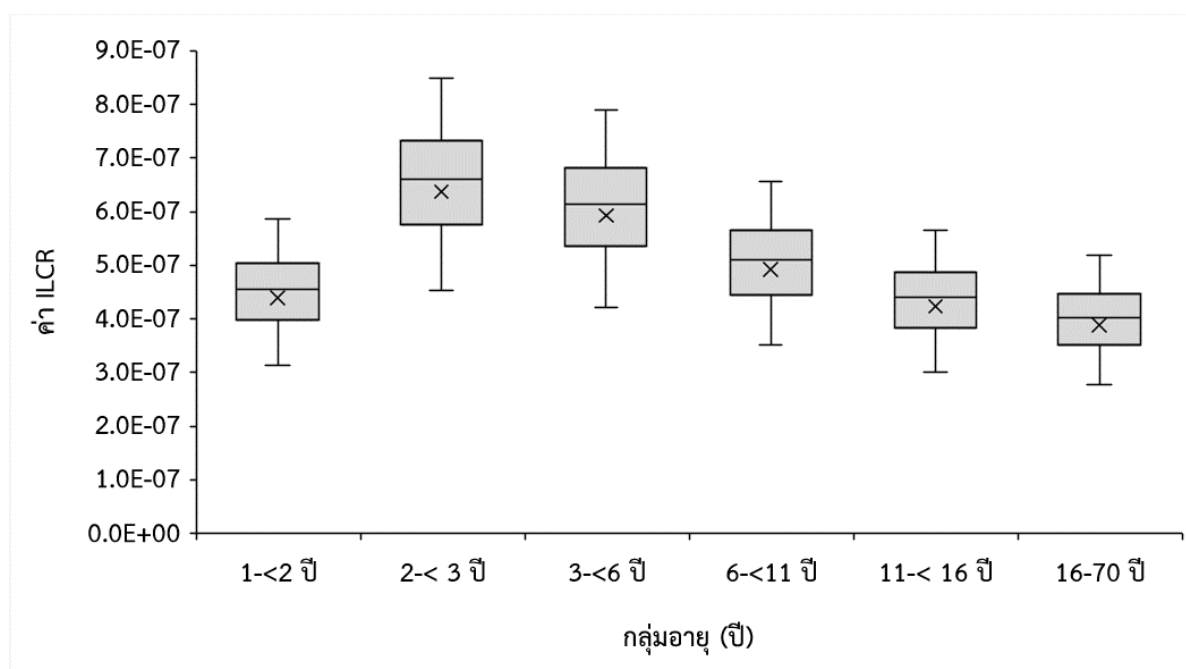
(ค) อนุภาคฝุ่นขนาด 9.0-5.8 ไมครอน



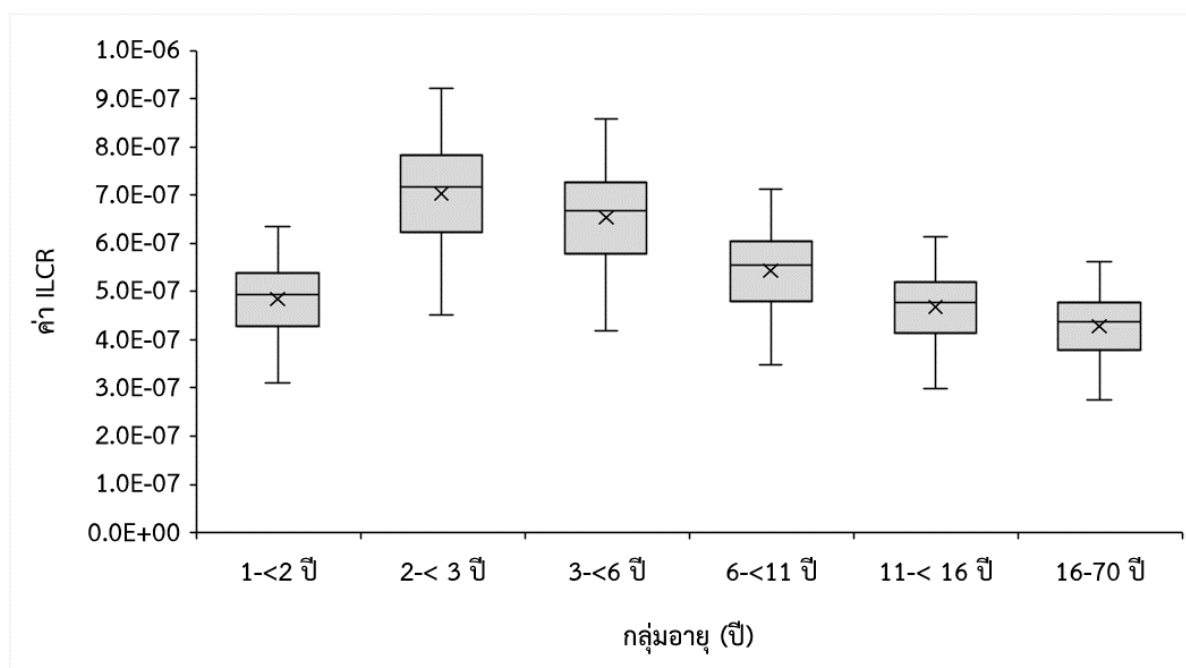
(ง) อนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน



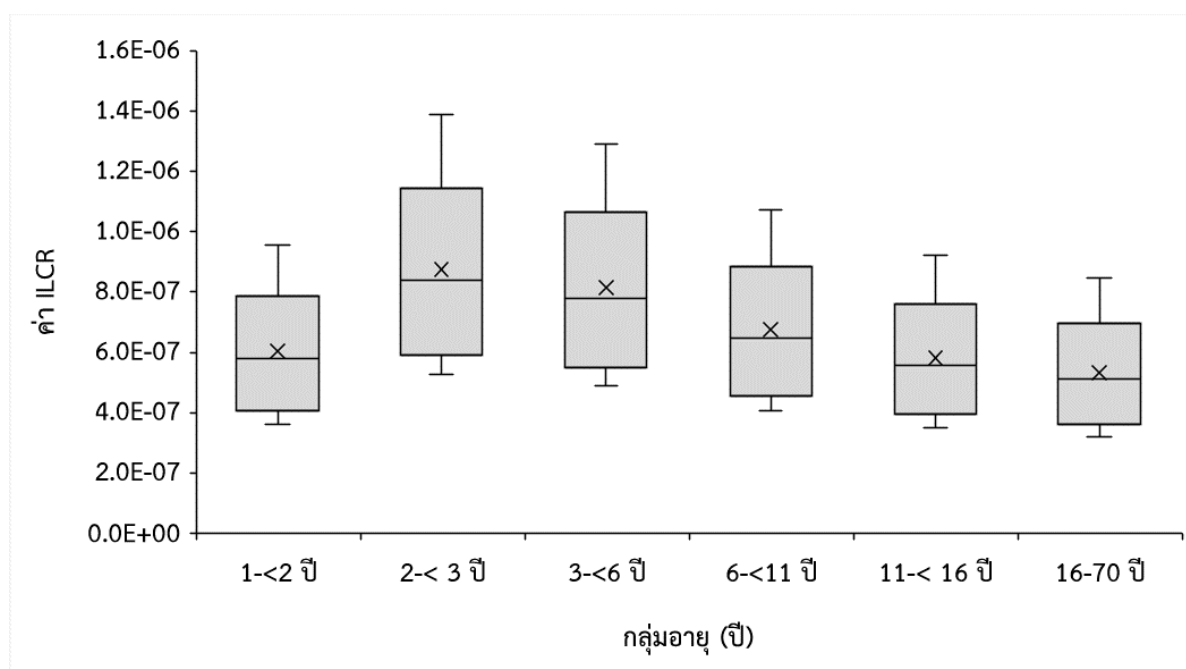
(จ) อนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน



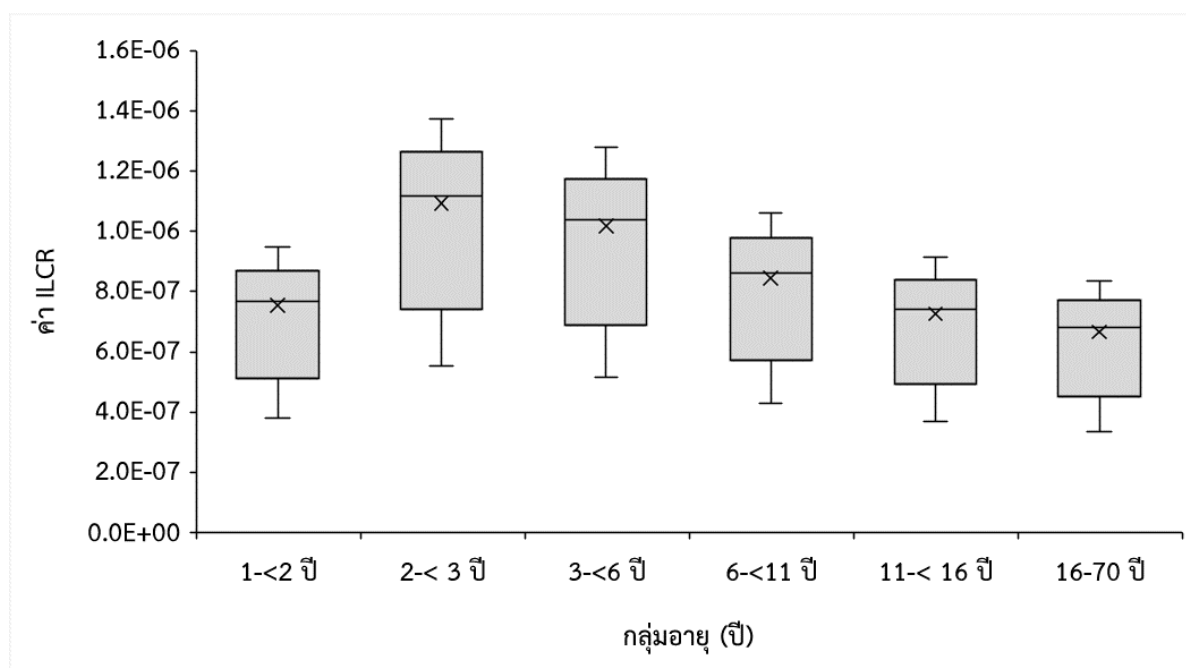
(ฉ) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน



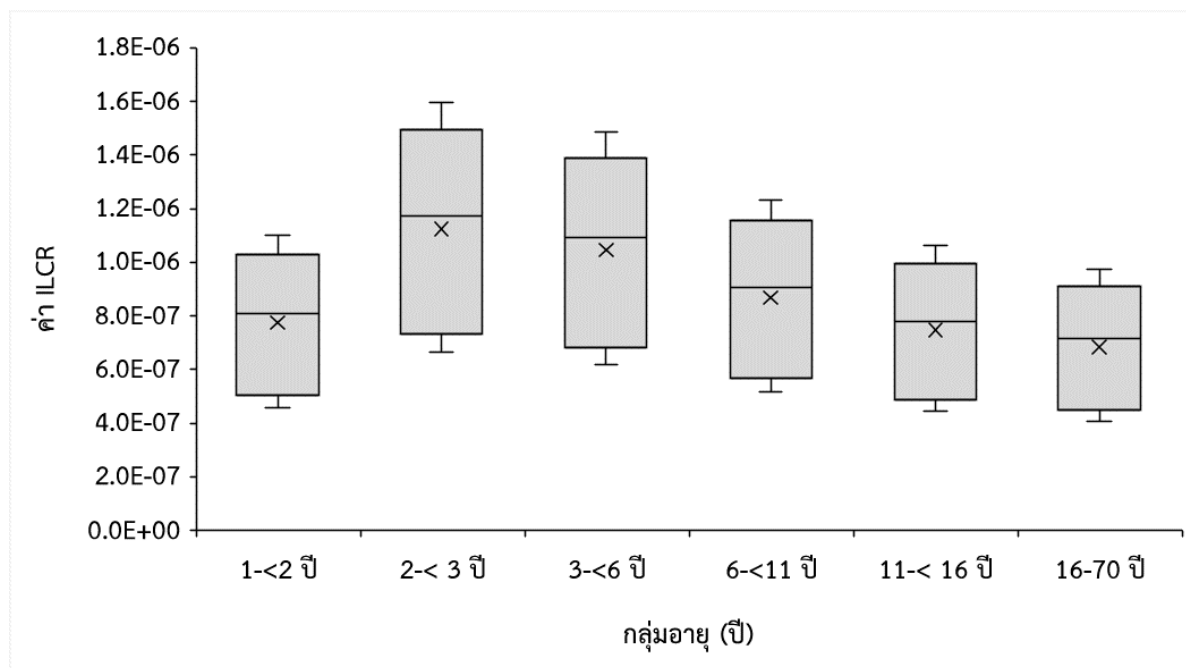
(ข) อนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน



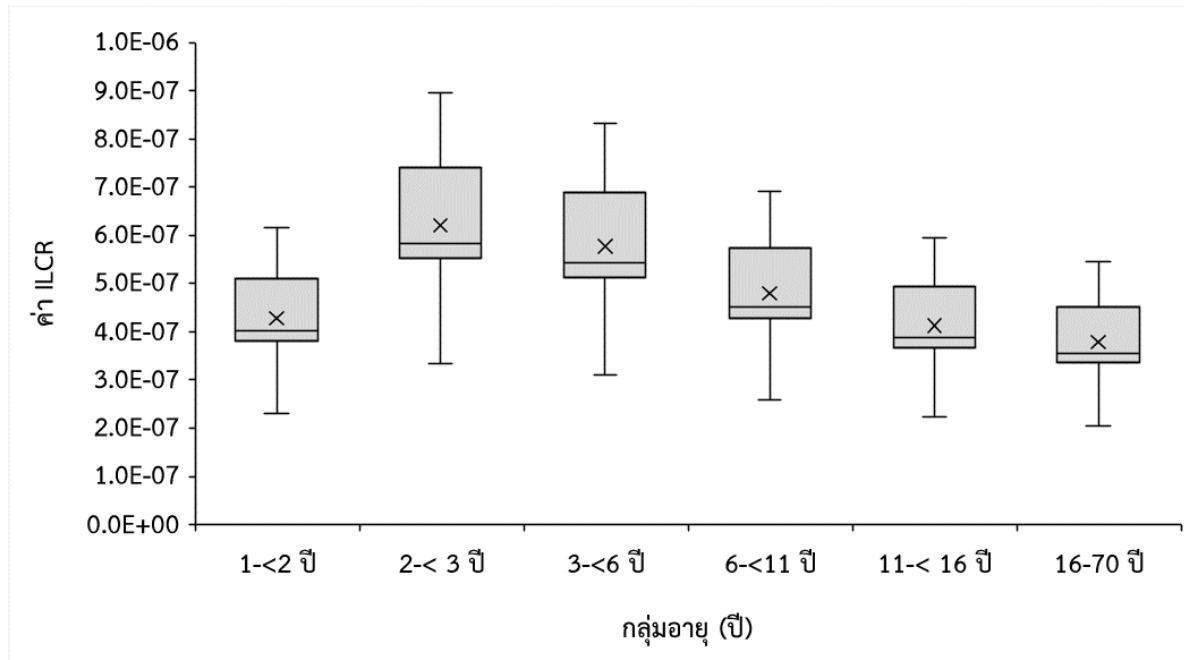
(ซ) อนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-065 ไมครอน



(ฉ) อนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน



(ญ) อนุภาคฝุ่นขนาด <0.43 ไมครอน



รูปที่ 19 (ก-ญ) ค่าประมาณการความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตลอดช่วงชีวิต (ILCR) จำแนกตามกลุ่มอายุ และขนาดอนุภาคฝุ่น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน (เดือนกุมภาพันธ์-เดือนเมษายน) ปี 2565 ด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นที่มีอัตราการไหล 28.3 ลิตรต่อนาที สามารถแยกอนุภาคฝุ่นได้ 9 ขนาด ได้แก่ 10.0-9.0, 9.0-5.8, 5.8-4.7, 4.7-3.3, 3.3-2.1, 2.1-1.1, 1.1-0.65, 0.65-0.43 และ <0.43 ไมครอน ทำการเก็บตัวอย่างในพื้นที่เขตเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เครื่องมือเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นติดตั้งบนชั้นดาดฟ้าของอาคาร 9 ชั้น ตึก 30 ปี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทำการหาความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นแยกขนาดด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำกระดาศกรองที่ทำกรเก็บตัวอย่างมาสกัดด้วยตัวทำละลาย และทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารพีเอเอช 16 ชนิด โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดด้วยวิธีวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจได้ทำการประเมินตามแนวทางขององค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมอเมริกา (U.S. EPA) สำหรับการประเมินความเสี่ยงจำแนกรายกลุ่มอายุ ใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประเมินความเสี่ยง ได้แก่ ค่าน้ำหนักตัวเฉลี่ย อัตราการหายใจ ระยะเวลาที่ได้สัมผัส ความถี่ของการสัมผัส อายุขัยเฉลี่ยของประชากรที่จะได้รับความเสี่ยงจากงานวิจัยของ Kawichai & Bootdee (2022) และ Tadsanaprasittipol *et al.* (2021) โดยมีผลการวิจัยดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ช่วงฤดูหมอกควัน (กุมภาพันธ์-เมษายน) ปี 2565 มีค่าอยู่ระหว่าง 36.86-126.87 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 84.28 ± 27.32 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบสัดส่วนของอนุภาคฝุ่นหยาบสูงสุด (10.0-2.1 ไมครอน) ร้อยละ 49.41 รองลงมาเป็นฝุ่นละเอียด (2.1-0.43 ไมครอน) ร้อยละ 44.29 และอนุภาคฝุ่นละเอียดมาก (น้อยกว่า 0.43 ไมครอน) ร้อยละ 6.30 เมื่อจำแนกตามขนาดอนุภาคฝุ่น 9 ขนาด พบสัดส่วนของอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน สูงสุด (18.08%) > 1.1-0.65 ไมครอน (14.83%) > 2.1-1.1 ไมครอน (11.38%) > 3.3-2.1 ไมครอน (10.50%) > 4.7-3.3 ไมครอน (10.43%) > 9.0-5.8 ไมครอน (10.00%) > 10.0-9.0 ไมครอน (9.85%) > 5.8-4.7 ไมครอน (8.63%) และ <0.43 ไมครอน (6.30%) ตามลำดับ

รูปแบบการกระจายของอนุภาคฝุ่นเฉลี่ยในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 เป็นแบบ Bimodal distribution มีพีคหลักอยู่ในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดอนุภาค 0.65-0.43 ไมครอน และพีครองอยู่ในฝุ่นหยาบที่มีขนาดอนุภาค 5.8-4.7 ไมครอน

ความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวม 16 ชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นรวมทั้ง 9 ขนาด มีค่าอยู่ระหว่าง 1.30-3.19 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.14 ± 0.51 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบสัดส่วนของสารพีเอเอชรวมเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียด (2.1-0.43 ไมครอน) สูงสุด ร้อยละ 51.06 รองลงมาเป็นอนุภาคฝุ่นหยาบ (10.0-2.1 ไมครอน) ร้อยละ 40.70 และอนุภาคฝุ่นละเอียดมาก (น้อยกว่า 0.43 ไมครอน) ร้อยละ 8.24 เมื่อจำแนกความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น 9 ขนาด พบสัดส่วนของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน สูงสุด (20.37%) > 1.1-0.65 ไมครอน (18.21%) > 2.1-1.1 ไมครอน (13.35%) > 3.3-2.1 ไมครอน (9.08%) > 9.0-5.8 ไมครอน (8.18%) > น้อยกว่า 0.43 ไมครอน (7.97%) > 4.7-3.3 ไมครอน (7.91%) > 5.8-4.7 ไมครอน (7.78%) และ 10.0-9.0 ไมครอน (7.15%) ตามลำดับ

รูปแบบการกระจายของความเข้มข้นของสารพีเอเอชเฉลี่ยที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดในช่วงฤดูหมอกควัน ปี 2565 เป็นแบบ Unimodal distribution มีพีคหลักอยู่ในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดอนุภาค 0.65-0.43 ไมครอน ในอนุภาคฝุ่นรวม 9 ขนาด พบสัดส่วนสารพีเอเอชเด่น 5 ชนิดหลัก ได้แก่ Dibenz[a,h]anthracene ร้อยละ 12.76 Naphthalene ร้อยละ 12.05 Fluorene ร้อยละ 8.55 Phenanthrene ร้อยละ 7.98 และ Acenaphthylene ร้อยละ 7.23 เมื่อจำแนกตามขนาดอนุภาคฝุ่น พบว่าอนุภาคฝุ่นหยาบจะพบสัดส่วนของสารพีเอเอชเด่น ไม่แตกต่างจากอนุภาคฝุ่นละเอียด

ส่วนที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น และสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบว่า มีความสัมพันธ์กันที่อนุภาคฝุ่นรวม (PM_{10}) ($r=0.701$) อนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน ($r=0.638$) และอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน ($r=0.606$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ส่วนที่ 3 การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดทางการหายใจในช่วงฤดูหมอกควัน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชผ่านการหายใจ พบมีค่าความเสี่ยงในระดับปานกลาง ค่าเฉลี่ยความเสี่ยงเท่ากับ 7.19×10^{-5} เมื่อพิจารณาตามขนาดอนุภาคฝุ่นพบมีความเสี่ยงปานกลางจากการหายใจสัมผัสอนุภาคฝุ่น ขนาด 1.1-0.65 ไมครอน และ 0.65-0.43 ไมครอน สำหรับอนุภาคฝุ่นขนาดอื่นมีความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และพบค่าความเป็นพิษ (TEQ) สูงที่สุดในอนุภาคฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 2.1 ไมครอน ค่าความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจตามกลุ่มวัย พบว่า วัยเด็ก (1-15 ปี) มีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจสูงกว่าวัยผู้ใหญ่ 1-2 เท่า การหายใจรับสัมผัสอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กมีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจมากกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ทั้งในวัยเด็กและวัยผู้ใหญ่

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัย เรื่อง การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2565 พบว่า ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นและความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดรวมทั้ง 9 ขนาดในช่วงฤดูหมอกควันปี 2565 มีค่าต่ำกว่างานวิจัยอื่นที่ทำการศึกษาก่อนหน้า ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นและสารพีเอเอชรวมในอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในพื้นที่เขตเมืองและนอกเมืองของจังหวัดเชียงใหม่ปี 2562 พบความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นรวมในเขตเมืองเท่ากับ 105.05 ± 29.78 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนอกเมืองเท่ากับ 128.42 ± 39.17 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นทุกขนาดในเขตเมืองเท่ากับ 4.30 ± 1.95 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และนอกเมืองเท่ากับ 6.56 ± 2.88 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Insian *et al.*, 2022) เนื่องจากปริมาณจุดความร้อนในพื้นที่และประเทศเพื่อนบ้าน และปรากฏการณ์เอนโซของภูมิภาคในแต่ละปี ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าปี 2562 เป็นปีที่ปรากฏการณ์เอนโซอยู่ในสภาวะเอลนีโญ ส่วนปี 2565 ปรากฏการณ์เอนโซอยู่ในสภาวะลานีญา ปีที่ปรากฏการณ์เอนโซอยู่ในสภาวะเอลนีโญจะพบความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นและสารพีเอเอชสูงกว่าลานีญา (Yabueng *et al.*, 2020) นอกจากนี้ยังพบสัดส่วนของสารพีเอเอชรวมเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียด (2.1-0.65 ไมครอน) มากกว่าในอนุภาคฝุ่นหยาบ (10.0-2.1 ไมครอน) เนื่องจากอนุภาคฝุ่นละเอียดจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าอนุภาคฝุ่นหยาบ สารพีเอเอชจึงสามารถเกาะกับอนุภาคฝุ่นละเอียดได้มากกว่า (Wang *et al.*, 2018)

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพีเอเอชรวมที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดด้วยวิธีการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน พบว่า ปริมาณฝุ่นละเอียดมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารพีเอเอชรวมสูงกว่าอนุภาคฝุ่นหยาบ เนื่องจากอนุภาคฝุ่นละเอียดมีแหล่งกำเนิดมาจากแหล่งเดียวกัน รวมถึงสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาคฝุ่น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝุ่นที่ลดลงจะเพิ่มปริมาณและพื้นที่ผิวดูดซับสารพีเอเอชบนอนุภาคฝุ่นได้มากขึ้น (Li *et al.*, 2019) จึงพบสารพีเอเอชรวมเกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอนุภาคฝุ่นที่เล็กกว่า 1.1 ไมครอน ซึ่งพบสารพีเอเอชเกาะอยู่มากกว่าร้อยละ 47 ยิ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพมากกว่าอนุภาคฝุ่นหยาบ เนื่องจากอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน จะตกสะสมในถุงลมปอด (alveoli) แล้วสามารถเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดในร่างกายของมนุษย์ได้ (Kim *et al.*, 2015; Löndahl *et al.*, 2006; Sarigiannis *et al.*, 2015)

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด พบว่ามีความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง กลุ่มวัยเด็กจะมีค่าความเสี่ยงมากกว่าวัยผู้ใหญ่ เนื่องจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ สรีรวิทยา และเส้นผ่านศูนย์กลางของระบบทางเดินหายใจ (Booddee & Muenmee, 2021) วัยเด็กมีความต้องการออกซิเจนสูง ทำให้อัตราการหายใจต่อลิตรกรัมของน้ำหนักตัวของวัยเด็กสูงขึ้นด้วย โดยพบอัตราการหายใจในกลุ่มวัยเด็กมากกว่าวัยผู้ใหญ่ 3 เท่า และเด็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเดินหายใจเล็กกว่าผู้ใหญ่ ทำให้มีอัตราการหายใจสูงกว่าจึงมี

โอกาสในการหายใจรับสัมผัสอนุภาคและสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นมากกว่า โดยเฉพาะอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กมากที่สามารถเข้าสู่ถุงลมปอด เพิ่มโอกาสในการเป็นมะเร็งจากการหายใจมากกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่

โดยสรุปจากผลการวิจัย ถึงแม้ว่าค่าความเสี่ยงของการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดทางการหายใจอยู่ในระดับปานกลาง และยอมรับได้ แต่หากในพื้นที่ที่มีแหล่งกำเนิดอนุภาคฝุ่นมากขึ้น ไม่ว่าจะเกิดจากการเผาในที่โล่ง การเผาจากประเทศเพื่อนบ้าน และจากแหล่งกำเนิดทางการจราจร ก็จะทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละเอียดสูงขึ้นในบรรยากาศ ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น สารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลต่อความเสี่ยงต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มอาการทางระบบทางเดินหายใจ และความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น โดยเฉพาะกลุ่มวัยเด็กที่อาจจะได้รับผลกระทบด้านสุขภาพมากที่สุด ดังนั้นการสื่อสารความเสี่ยงให้กับผู้ประกอบการ การส่งเสริมการใช้หน้ากากป้องกันฝุ่นสำหรับเด็ก รวมถึงการขยายการดำเนินงานห้องปลอดฝุ่นในศูนย์พัฒนาเด็กเล็ก และโรงเรียนให้มีความครอบคลุมมีความสำคัญที่จะช่วยให้เด็กลดความเสี่ยงจากการรับสัมผัสฝุ่นละอองและสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นในช่วงฤดูหมอกควันได้

5.3 ข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นเฉพาะฤดูหมอกควัน ปี 2565 เพียงฤดูกาลเดียว พื้นที่เดียว จึงไม่มีกลุ่มควบคุมเพื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ที่มีแหล่งกำเนิดอนุภาคฝุ่นและสารพีเอเอชแตกต่างกัน รวมถึงนอกช่วงฤดูหมอกควัน ที่อาจจะมีแหล่งกำเนิดจากการจราจร และการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาด พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เช่น น้ำหนักตัวโดยเฉลี่ย ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัส ความถี่ของการรับสัมผัส และระยะเวลาที่สัมผัส จะใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ไม่ได้ทำการเก็บข้อมูลจากประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ที่ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่น เนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1) การศึกษาความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับอนุภาคฝุ่น ควรมีการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นมากขึ้นครอบคลุมทุกช่วงฤดูกาล และทำการศึกษาในหลายพื้นที่เปรียบเทียบกัน เช่น พื้นที่ในเมือง ที่ได้รับผลกระทบจากการจราจรและการเผาในที่โล่ง พื้นที่นอกเมืองที่ได้รับอิทธิพลจากการเผาในที่โล่ง และพื้นที่บริเวณใกล้ชายแดนประเทศเพื่อนบ้าน ที่ได้รับอิทธิพลจากการเผาจากประเทศเพื่อนบ้าน

2) การศึกษาความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นในพื้นที่ เช่น พื้นที่การเผาไหม้ จำนวนจุดความร้อนในพื้นที่ ปริมาณน้ำฝน และทิศทางลม ในช่วงระยะเวลาเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่น

3) การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศควรศึกษาสารมลพิษทางอากาศชนิดอื่นเพิ่มเติม เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่าย รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีอื่นที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด เช่น ธาตุโลหะ ที่เป็นสารก่อมะเร็งจากการหายใจเช่นเดียวกับสารพีเอเอช

4) พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ เช่น น้ำหนักตัวโดยเฉลี่ย ระยะเวลาที่ได้รับสัมผัส ความถี่ของการรับสัมผัส และระยะเวลาที่สัมผัส ควรมีการเก็บข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามสัมภาษณ์ประชาชนที่อาศัยอยู่จริงในพื้นที่

5) ควรมีการศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพจากการการได้รับสัมผัสสารพีเอเอช และอนุภาคฝุ่นในกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคทางเดินหายใจเรื้อรัง โดยทำการเก็บข้อมูลผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในช่วงระยะเวลาเดียวกันกับการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นในอากาศ

5.5 การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลการวิจัยเกี่ยวกับความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น ความเข้มข้นของสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด และค่าความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นเข้าสู่ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ดังนี้

1) ข้อมูลเกี่ยวกับความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่น และความเข้มข้นของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกาะกับกับอนุภาคแต่ละขนาด จะเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดมาตรการควบคุมมลพิษทางอากาศในพื้นที่ รวมถึงเป็นข้อมูลสนับสนุนในการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม เช่น มาตรการห้ามเผา หรือการควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษอื่นๆ ในพื้นที่ในช่วงฤดูหมอกควัน

2) ข้อมูลความเข้มข้นอนุภาคฝุ่นแยกขนาด และสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด โดยเฉพาะอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กที่มีสารพีเอเอชเกาะอยู่ปริมาณสูงกว่าอนุภาคฝุ่นขนาดใหญ่ จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับมาตรการลดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ เช่น การจัดหาหน้ากากอนามัยที่สามารถป้องกันอนุภาคฝุ่นได้อย่างเหมาะสม สำหรับกลุ่มเปราะบาง และประชาชนในพื้นที่

3) ข้อมูลเกี่ยวกับความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการหายใจจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศในกลุ่มวัยเด็กพบสูงกว่าวัยผู้ใหญ่ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กระทรวงสาธารณสุข กระทรวงมหาดไทย กระทรวงศึกษาธิการ รวมถึงองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น สามารถนำไปออกนโยบายการจัดทำหรือขยายการดำเนินงานห้องปลอดฝุ่นในศูนย์พัฒนาเด็กเล็ก และโรงเรียนให้มีความครอบคลุมทุกพื้นที่

4) ข้อมูลความเข้มข้นของสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาด ที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในอนุภาคฝุ่น สามารถนำมาใช้ในการระบุหาแหล่งกำเนิดของอนุภาคฝุ่นและสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแต่ละขนาดว่ามีแหล่งกำเนิดจากแหล่งใด เช่น การเผาไหม้ในที่โล่ง ยานพาหนะ หรือจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิด (Source Apportionment)

บรรณานุกรม

- กรมอนามัย และกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. (2558). แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงจากมลพิษทางอากาศ กรณีหมอกควัน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด.
- กรมอุตุนิยมวิทยา กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. (2565). ประกาศการณ์เอลนีโญ-ลานีญา [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2567]; แหล่งข้อมูล:
https://www4.tmd.go.th/programs%5Cuploads%5Cphenomena%5C%E0%CD%C5%B9%D4%E2%AD_%C1%A1%C3%D2%A4%C12565.pdf
- นันทิกา สุนทรไชยกุล, เพ็ญศรี วัจฉละญาณ และสิริมา มงคลสัมฤทธิ์. (2552). การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางสุขภาพ สำหรับเจ้าหน้าที่สาธารณสุข. คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. (เอกสารอัดสำเนา).
- สมพร จันทระ, วาน วิริยา, ประภัสสร พันธสมพงษ์ และชาคริต โชติอมรศักดิ์. (2561). โครงการการติดตามตรวจสอบการเผาในที่โล่งในภาคเหนือของประเทศไทยสำหรับการประเมินการปล่อยและการเคลื่อนที่ของมลพิษทางอากาศเพื่อการวางแผนการจัดการปัญหาหมอกควัน: รายงานฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. (เอกสารอัดสำเนา).
- Becker S, Mundandhara S, Devlin RB, et al. (2005). Regulation of cytokine production in human alveolar macrophages and airway epithelial cells in response to ambient air pollution particles: Further mechanistic studies. *Toxicol Appl Pharmacol*, 207, S269-75. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.01.023>
- Bootdee, S., & Muenmee, S. (2021). Health Risk Assessment of Exposure PM_{2.5} from Industrial Area in Pluak Daeng district, Rayong province. *Health Science, Science and Technology Reviews*, 14(3), 95-110. [Cited 2024 March 1]; Available from:
<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/journalup/article/view/248513>
- Chen, R., Hu, B., Liu, Y., Xu, J., Yang, G., Xu, D., Chen, C. (2016). Beyond PM_{2.5}: The role of ultrafine particles on adverse health effects of air pollution. *Biochim Biophys Acta*, 1860, 2844-55. [Cited 2021 December 20]; Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2016.03.019>
- Goudarzi, G., Baboli, Z., Moslemnia, M., & et al. (2021). Assessment of incremental lifetime cancer risks of ambient air PM₁₀-bound PAHs in oil-rich cities of Iran. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 19(1), 319-330. [Cited 2022 January 5]; Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40201-020-00605-6>

- Kawanaka, Y., Tsuchiya, Y., Yun, S.-J., Sakamoto, K. (2009). Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere and estimation of the contribution of ultrafine particles to their lung deposition. *Environmental science technology*, 43, 6851-6856. [Cited 2023 April 5]; Available from: <https://doi.org/10.1021/es900033u>
- International Agency for Research on Cancer (IARC). (2010). Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures, *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to humans*. 92, 765-771.
- Insian, W., Yabueng, N., Wiriya, W., & Chantara, S. (2022). Size-fractionated PM-bound PAHs in urban and rural atmospheres of northern Thailand for respiratory health risk assessment. *Environmental Pollution*, 293: 118488. [Cited 2023 April 5]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118488>
- Kawichai, S., & Bootdee, S. (2022). Health Risk Assessment on Exposure to PM_{2.5}-bound PAHs from an Urban-industrial Area in Rayong City, Thailand. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 10(E), 1-10. [Cited 2023 April 5]; Available from: <https://doi.org/10.3889/oamjms.2022.9977>
- Kelly, F.J. and Fussell, J.C. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 504-526. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-43. [Cited 2022 January 5]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Lee, J. Y., Shin, H. J., Bae, S. Y., Kim, Y. P., Kang, C.-H. (2008). Seasonal variation of particle size distributions of PAHs at Seoul, Korea. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1, 57-68. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-008-0002-2>
- Li, H., Li, H., Zhang, L., & et al. (2019). High cancer risk from inhalation exposure to PAHs in Fenhe Plain in winter: A particulate size distribution-based study. *Atmospheric Environment*, 216, 116924. [Cited 2024 January 8]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116924>
- Löndahl, J., Pagels, J., Swietlicki, E., Zhou, J., Ketzel, M., Massling, A., & Bohgard, M. (2006). A set-up for field studies of respiratory tract deposition of fine and ultrafine particles in

- humans. *Journal of Aerosol Science*, 37, 1152-1163. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.11.004>
- Lv, Y., Li, X., Xu, T. T., Cheng, T. T., Yang, X., Chen, J. M., Iinuma, Y., Herrmann, H. (2016). Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere: sorption mechanism and source contributions to respiratory deposition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 2971-2983. [Cited 2021 December 20]; <https://doi.org/10.5194/acp-16-2971-2016>
- Nisbet, I. C. T., & LaGoy, P. K. (1992). Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 16, 290-300.
- Oanh K. (2007). Improving air quality in asian developing countries. Bangkok: Asian Institute of Technology. [Cited 2022 July 10]; Available from: https://www.researchgate.net/publication/266912721_Improving_Air_Quality_in_Asian_Developing_Countries_Compilation_of_Research_Findings
- Oanh K. (2017). A study in urban air pollution improvement in Asia. Bangkok: Asian Institute of Technology. [Cited 2022 July 10]; Available from: https://www.jica.go.jp/Resource/jica-ri/publication/booksandreports/l75nbg00000kjjwkk-att/Final_report.pdf
- Phoothiwut, S., Junyapoon, S. (2013). Size distribution of atmospheric particulates and particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and characteristics of PAHs during haze period in Lampang Province, Northern Thailand. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6, 397-405. [Cited 2022 July 10]; Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-012-0194-3>
- Pooltawee, J., Pimpunchat, B., Junyapoon, S. (2017). Size distribution, characterization and risk assessment of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons during haze periods in Phayao Province, northern Thailand. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1097-1112. [Cited 2022 July 10]; Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-017-0497-5>
- Pongpiachan, S. (2016). Incremental Lifetime Cancer Risk of PM_{2.5} Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) before and after the Wildland Fire Episode. *Aerosol and Air Quality Research*, 16: 2907-2919. [Cited 2022 July 10]; Available from: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.01.0011>

- R. Bruce Urch. (2010). Controlled Human Exposures to Concentrated Ambient Fine Particles and Ozone: Individual and Combined Effects on Cardiorespiratory Outcomes. [Cited 2021 December 20]; Available from:
https://www.researchgate.net/figure/Size-Distribution-of-Particulate-Matter_fig2_268328101
- Ren, Y., Zhou, B., Tao, J., Cao, J., Zhang, Z., Wu, C., Wang, J., Li, J., Zhang, L., Han, Y. (2017). Composition and size distribution of airborne particulate PAHs and oxygenated PAHs in two Chinese megacities. *Atmospheric Research*, 183, 322-330. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.015>
- Risom L, Møller P, Loft S. (2005). Oxidative stress-induced DNA damage by particulate air pollution. *Mutation Research*, 30;592(1-2), 119-37. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2005.06.012>
- Samae, H., Tekasakul, S., Tekasakul, P., Furuuchi, M. (2021). Emission factors of ultrafine particulate matter (PM_{<0.1μm}) and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass combustion for source apportionment. *Chemosphere*, 262, 127846. [Cited 2021 December 20]; Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127846>
- Chansuebsri, S., Kolar, P., Kraisitnitikul, P., Kantarawilawan, N., Yabueng, N., Wiriya, W., Thepnuan, D., & Chantara, S. (2022). Chemical composition and origins of PM_{2.5} in Chiang Mai (Thailand) by integrated source apportionment and potential source areas. *Atmospheric Environment*, Volume 327, 120517. [Cited 2024 August 13]; Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120517>
- Sarigiannis, D., Karakitsios, S. P., Zikopoulos, D., Nikolaki, S., Kermenidou, M. (2015). Lung cancer risk from PAHs emitted from biomass combustion. *Environmental Research*, 137, 147-56. [Cited 2021 December 20]; Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.12.009>
- Shen, R., Wang, Y., Gao, W., Cong, X., Cheng, L., Li, X. (2019). Size-segregated particulate matter bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) over China: Size distribution, characteristics and health risk assessment. *Science of the total environment*, 685, 116-123. [Cited 2021 December 20]; Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.436>
- Tadsanaprasittipol, A., Tonrub, P., Beverland, IJ., & Kalin, RM. (2021). Characterization of PM₁₀-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Associated Carcinogenic Risk in

- Bangkok, Thailand. *Applied Sciences*, 11(10):4501. [Cited 2022 July 10]; Available from: <https://doi.org/10.3390/app11104501>
- Thepnuan, D., Chantara, S., Lee, C. T., Lin, N. H., & Tsai, Y. I. (2019) Molecular markers for biomass burning associated with the characterization of PM_{2.5} and component sources during dry season haze episodes in Upper South East Asia. *Sci Total Environ*, 658, 708-722. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.201>
- Thepnuan, D. & Chantara S. (2020). Characterization of PM_{2.5}-bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Chiang Mai, Thailand during Biomass Open Burning Period of 2016. *Applied Environmental Research*, 42(3), 11-24. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://doi.org/10.35762/AER.2020.42.3.2>
- United State Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2005). Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. Risk Assessment Forum, Washington DC. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://www.epa.gov/risk/guidelines-carcinogen-risk-assessment>
- World Health Organization (WHO). (2000). Air Quality Guideline for Europe, second ed. WHO, Copenhagen. WHO Regional Publications 2000: European series, NO.91. [Cited 2021 December 20]; Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289013581>
- Wang, R., Liu, G., Sun, R., & *et al.* (2018). Emission characteristics for gaseous- and size-segregated particulate PAHs in coal combustion flue gas from circulating fluidized bed (CFB) boiler. *Environmental Pollution*, 238, 581-589. [Cited 2022 July 10]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.051>
- Wiriya, W., Prapamontol, T., & Chantara, S. (2013). PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Chiang Mai (Thailand): Seasonal variations, source identification, health risk assessment and their relationship to air-mass movement. *Atmospheric Research*, 124, 109-122. [Cited 2023 April 5]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.014>
- Yabueng, N., Wiriya, W., & Chantara, S. (2020). Influence of zero-burning policy and climate phenomena on ambient PM_{2.5} patterns and PAHs inhalation cancer risk during episodes of smoke haze in Northern Thailand. *Atmospheric Environment*, 232. [Cited 2022 January 5]; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117485>

Yin, G., Liu, C., Hao, L., Chen, Y., Wang, W., Huo, J., Zhao, Q., Zhang, Y., Duan, Y., Fu, Q., Chen, R., & Kan, H. (2019). Associations between size-fractionated particle number concentrations and COPD mortality in Shanghai, China. *Atmospheric Environment*, 214. [Cited 2022 January 5]; Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116875>

Zhang, J., Yang, L., Ledoux, F., & *et al.* (2019). PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and nitrated PAHs (NPAHs) in rural and suburban areas in Shandong and Henan Provinces during the 2016 Chinese New Year's holiday. *Environmental Pollution*, 250, 782-791. [Cited 2022 January 5]; Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.040>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นแยกขนาด (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จำแนกตามวันที่ทำการเก็บ
ตัวอย่างอนุภาคฝุ่น

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)								
	10.0- 9.0	9.0- 5.8	5.8- 4.7	4.7- 3.3	3.3- 2.1	2.1- 1.1	1.1- 0.65	0.65- 0.43	<0.43
6-8 ก.พ. 65	5.36	5.68	3.03	1.23	3.07	6.22	3.64	6.95	1.68
14-16 ก.พ. 65	3.91	5.36	3.93	4.81	4.83	4.60	7.03	9.84	2.90
22-24 ก.พ. 65	4.83	5.42	2.82	3.62	3.52	5.81	7.48	10.27	2.88
1-3 มี.ค. 65	8.63	8.47	7.48	6.95	7.85	7.24	12.76	17.46	2.13
6-8 มี.ค. 65	8.71	9.16	4.46	8.51	8.10	9.04	12.43	14.77	6.87
11-13 มี.ค. 65	10.76	8.79	8.79	11.86	8.51	9.32	13.13	15.91	7.48
16-18 มี.ค. 65	8.10	8.30	9.32	10.63	11.00	13.66	16.97	20.69	9.73
21-23 มี.ค. 65	7.65	6.95	10.27	9.41	9.86	9.73	10.55	15.66	7.77
26-28 มี.ค. 65	11.82	10.43	11.21	11.12	11.25	10.88	14.76	14.76	2.99
5-7 เม.ย. 65	3.66	4.15	5.83	8.24	7.81	8.30	15.13	16.99	4.93
10-12 เม.ย. 65	8.79	8.47	11.61	14.85	14.56	15.13	18.12	24.17	11.17
15-17 เม.ย. 65	13.82	14.80	11.29	11.53	12.96	13.91	16.73	16.52	2.17
25-27 เม.ย. 65	11.90	13.54	4.50	11.57	11.70	10.88	13.70	14.07	6.38
ค่าเฉลี่ย	8.30	8.42	7.27	8.79	8.85	9.59	12.49	15.24	5.31
S.D.	3.22	3.13	3.32	3.81	3.53	3.26	4.29	4.51	3.14
ค่าสูงสุด	13.82	14.80	11.61	14.85	14.56	15.13	18.12	24.17	11.17
ค่าต่ำสุด	3.66	4.15	2.82	1.23	3.07	4.60	3.64	6.95	1.68

ตาราง ก-2 ความเข้มข้นของสารฟิเอเอชรวม 16 ชนิด (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จำแนกตามวันที่ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่น

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาคฝุ่น (ไมครอน)								
	10.0- 9.0	9.0- 5.8	5.8- 4.7	4.7- 3.3	3.3- 2.1	2.1- 1.1	1.1- 0.65	0.65- 0.43	<0.43
6-8 ก.พ. 65	0.115	0.149	0.139	0.153	0.157	0.148	0.203	0.279	0.120
14-16 ก.พ. 65	0.111	0.104	0.104	0.110	0.132	0.171	0.162	0.304	0.106
22-24 ก.พ. 65	0.103	0.098	0.068	0.070	0.124	0.181	0.256	0.346	0.076
1-3 มี.ค. 65	0.110	0.119	0.164	0.200	0.162	0.384	0.472	0.650	0.172
6-8 มี.ค. 65	0.177	0.288	0.241	0.178	0.196	0.451	0.501	0.522	0.178
11-13 มี.ค. 65	0.116	0.173	0.131	0.131	0.182	0.409	0.482	0.650	0.213
16-18 มี.ค. 65	0.176	0.242	0.192	0.202	0.294	0.409	0.857	0.646	0.175
21-23 มี.ค. 65	0.176	0.183	0.192	0.182	0.179	0.177	0.365	0.377	0.175
26-28 มี.ค. 65	0.157	0.171	0.125	0.136	0.225	0.318	0.408	0.429	0.220
5-7 เม.ย. 65	0.261	0.243	0.238	0.233	0.243	0.241	0.316	0.270	0.171
10-12 เม.ย. 65	0.197	0.190	0.179	0.189	0.196	0.338	0.386	0.423	0.214
15-17 เม.ย. 65	0.162	0.170	0.200	0.201	0.196	0.284	0.411	0.501	0.183
25-27 เม.ย. 65	0.122	0.141	0.189	0.212	0.235	0.197	0.237	0.261	0.209
ค่าเฉลี่ย	0.15	0.17	0.17	0.17	0.19	0.29	0.39	0.44	0.17
S.D.	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.11	0.18	0.15	0.04
ค่าสูงสุด	0.26	0.29	0.24	0.23	0.29	0.45	0.86	0.65	0.22
ค่าต่ำสุด	0.10	0.10	0.07	0.07	0.12	0.15	0.16	0.26	0.08

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 10.0-9.0 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.029	N/A	N/A	0.019	0.016	0.007	0.012	0.009	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.024	N/A	0.115
14-16 ก.พ. 65	0.014	N/A	0.010	0.020	0.018	0.010	0.009	0.009	0.001	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.016	N/A	0.111
22-24 ก.พ. 65	0.013	N/A	0.011	0.018	0.018	0.010	0.009	0.009	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.012	N/A	0.103
1-3 มี.ค. 65	0.020	N/A	N/A	0.020	0.015	0.007	0.011	0.009	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.110
6-8 มี.ค. 65	0.057	N/A	N/A	0.027	0.024	0.009	0.014	0.015	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.031	N/A	0.177
11-13 มี.ค. 65	0.013	N/A	N/A	0.023	0.018	0.008	0.012	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.116
16-18 มี.ค. 65	0.036	N/A	0.011	0.024	0.021	0.010	0.013	0.013	0.002	0.007	N/A	N/A	N/A	N/A	0.038	N/A	0.176
21-23 มี.ค. 65	0.012	0.044	0.018	0.021	0.016	0.007	0.011	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.035	N/A	0.176
26-28 มี.ค. 65	0.030	N/A	0.011	0.024	0.018	0.008	0.012	0.013	N/A	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.037	N/A	0.157
5-7 เม.ย. 65	0.017	N/A	N/A	0.005	0.004	0.001	0.002	0.004	0.013	0.023	0.020	0.031	0.023	0.036	0.048	0.036	0.261
10-12 เม.ย. 65	0.033	N/A	0.019	0.031	0.033	0.019	0.016	0.015	N/A	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.197
15-17 เม.ย. 65	0.007	N/A	0.021	0.032	0.027	0.016	0.013	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.032	N/A	0.162
25-27 เม.ย. 65	0.015	N/A	N/A	0.002	0.006	0.002	0.002	0.005	0.010	0.016	N/A	N/A	N/A	0.018	0.029	0.017	0.122
ค่าเฉลี่ย	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.15
SD	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05
สูงสุด	0.057	0.044	0.021	0.032	0.033	0.019	0.016	0.015	0.013	0.023	0.020	0.031	0.023	0.036	0.048	0.036	0.261
ต่ำสุด	0.007	0.000	0.000	0.002	0.004	0.001	0.002	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.018	0.012	0.017	0.103

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-2 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 9.0-5.8 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.043	N/A	N/A	0.020	0.021	0.008	0.014	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.149
14-16 ก.พ. 65	0.009	N/A	0.011	0.018	0.018	0.010	0.009	0.009	0.001	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.015	N/A	0.104
22-24 ก.พ. 65	0.010	N/A	0.010	0.018	0.017	0.011	0.009	0.009	0.001	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.012	N/A	0.098
1-3 มี.ค. 65	0.025	N/A	N/A	0.020	0.015	0.007	0.012	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.028	N/A	0.119
6-8 มี.ค. 65	0.017	N/A	0.020	0.037	0.033	0.023	0.020	0.020	N/A	0.002	0.009	0.017	0.043	N/A	0.031	0.016	0.288
11-13 มี.ค. 65	0.040	N/A	N/A	0.025	0.021	0.008	0.014	0.016	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.047	N/A	0.173
16-18 มี.ค. 65	0.086	N/A	0.011	0.030	0.027	0.010	0.015	0.018	0.002	0.006	N/A	N/A	N/A	N/A	0.037	N/A	0.242
21-23 มี.ค. 65	0.022	0.040	0.018	0.023	0.016	0.008	0.019	0.010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.183
26-28 มี.ค. 65	0.034	N/A	0.017	0.028	0.024	0.009	0.015	0.016	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.025	N/A	0.171
5-7 เม.ย. 65	0.016	N/A	0.000	0.004	0.006	0.002	0.002	0.005	0.013	0.023	0.016	0.029	0.023	0.030	0.043	0.032	0.243
10-12 เม.ย. 65	0.038	N/A	0.020	0.031	0.031	0.017	0.013	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.026	N/A	0.190
15-17 เม.ย. 65	0.007	N/A	0.023	0.035	0.028	0.016	0.014	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.032	N/A	0.170
25-27 เม.ย. 65	0.011	0.001	0.001	0.002	0.006	0.001	0.002	0.005	0.010	0.015	0.006	0.010	0.016	0.018	0.025	0.014	0.141
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.17
SD	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
สูงสุด	0.086	0.040	0.023	0.037	0.033	0.023	0.020	0.020	0.013	0.023	0.016	0.029	0.043	0.030	0.047	0.032	0.288
ต่ำสุด	0.007	0.001	0.000	0.002	0.006	0.001	0.002	0.005	0.000	0.002	0.006	0.010	0.016	0.018	0.012	0.014	0.098

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-3 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 5.8-4.7 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.039	N/A	N/A	0.021	0.019	0.008	0.014	0.012	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.026	N/A	0.139
14-16 ก.พ. 65	0.011	N/A	0.012	0.019	0.016	0.011	0.009	0.009	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.014	N/A	0.104
22-24 ก.พ. 65	0.011	N/A	0.000	0.010	0.012	0.004	0.008	0.008	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.013	N/A	0.068
1-3 มี.ค. 65	0.037	N/A	N/A	0.027	0.023	0.012	0.017	0.016	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.164
6-8 มี.ค. 65	0.058	N/A	0.016	0.026	0.023	0.011	0.014	0.016	N/A	0.001	0.009	0.017	0.009	N/A	0.042	N/A	0.241
11-13 มี.ค. 65	0.024	N/A	N/A	0.024	0.018	0.009	0.012	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.131
16-18 มี.ค. 65	0.052	N/A	0.015	0.026	0.023	0.010	0.017	0.016	N/A	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.192
21-23 มี.ค. 65	0.025	0.037	0.018	0.023	0.017	0.008	0.017	0.012	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.035	N/A	0.192
26-28 มี.ค. 65	0.015	N/A	0.018	0.024	0.018	0.008	0.012	0.011	N/A	0.001	N/A	N/A	N/A	N/A	0.019	N/A	0.125
5-7 เม.ย. 65	0.017	0.000	0.000	0.003	0.007	0.002	0.003	0.005	0.012	0.022	0.015	0.028	0.023	0.028	0.042	0.031	0.238
10-12 เม.ย. 65	0.037	N/A	0.019	0.030	0.026	0.014	0.013	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.026	N/A	0.179
15-17 เม.ย. 65	0.016	N/A	0.021	0.038	0.034	0.023	0.017	0.016	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.033	N/A	0.200
25-27 เม.ย. 65	0.011	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001	0.002	0.004	0.011	0.019	0.011	0.019	0.018	0.025	0.038	0.024	0.189
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.17
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.05
สูงสุด	0.058	0.037	0.021	0.038	0.034	0.023	0.017	0.016	0.012	0.022	0.015	0.028	0.023	0.028	0.042	0.031	0.241
ต่ำสุด	0.011	0.000	0.000	0.002	0.004	0.001	0.002	0.004	0.000	0.001	0.009	0.017	0.009	0.025	0.013	0.024	0.068

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-4 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 4.7-3.3 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.050	N/A	N/A	0.023	0.021	0.008	0.014	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.025	N/A	0.153
14-16 ก.พ. 65	0.012	N/A	0.012	0.020	0.019	0.012	0.009	0.010	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.013	N/A	0.110
22-24 ก.พ. 65	0.012	N/A	0.008	0.014	0.004	0.002	0.008	0.007	0.000	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.013	N/A	0.070
1-3 มี.ค. 65	0.057	N/A	N/A	0.029	0.025	0.010	0.020	0.019	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.040	N/A	0.200
6-8 มี.ค. 65	0.060	N/A	N/A	0.025	0.023	0.010	0.015	0.015	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.178
11-13 มี.ค. 65	0.017	N/A	N/A	0.027	0.020	0.008	0.013	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.032	N/A	0.131
16-18 มี.ค. 65	0.060	N/A	0.018	0.028	0.026	0.010	0.016	0.017	N/A	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.024	N/A	0.202
21-23 มี.ค. 65	0.028	0.031	0.017	0.022	0.016	0.007	0.010	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.040	N/A	0.182
26-28 มี.ค. 65	0.024	N/A	0.016	0.022	0.016	0.008	0.011	0.010	N/A	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.028	N/A	0.136
5-7 เม.ย. 65	0.013	0.001	0.000	0.005	0.006	0.004	0.004	0.007	0.012	0.022	0.015	0.027	0.021	0.029	0.044	0.027	0.233
10-12 เม.ย. 65	0.038	N/A	0.020	0.033	0.028	0.014	0.014	0.013	N/A	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.028	N/A	0.189
15-17 เม.ย. 65	0.027	N/A	0.021	0.033	0.031	0.019	0.016	0.014	N/A	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.035	N/A	0.201
25-27 เม.ย. 65	0.012	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.002	0.004	0.012	0.022	0.013	0.025	0.020	0.027	0.041	0.029	0.212
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.17
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05
สูงสุด	0.060	0.031	0.021	0.033	0.031	0.019	0.020	0.019	0.012	0.022	0.015	0.027	0.021	0.029	0.044	0.029	0.233
ต่ำสุด	0.012	0.001	0.000	0.002	0.003	0.001	0.002	0.004	0.000	0.000	0.013	0.025	0.020	0.027	0.013	0.027	0.070

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-5 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 3.3-2.1 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.050	N/A	N/A	0.021	0.020	0.008	0.013	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.031	N/A	0.157
14-16 ก.พ. 65	0.014	N/A	0.011	0.019	0.015	0.010	0.009	0.008	0.000	0.002	0.006	0.009	0.012	N/A	0.014	N/A	0.132
22-24 ก.พ. 65	0.013	N/A	0.007	0.010	0.012	0.005	0.010	0.009	0.001	0.003	0.007	0.010	0.015	0.001	0.013	0.010	0.124
1-3 มี.ค. 65	0.035	N/A	N/A	0.026	0.022	0.010	0.019	0.016	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.035	N/A	0.162
6-8 มี.ค. 65	0.067	N/A	N/A	0.030	0.026	0.009	0.016	0.018	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.196
11-13 มี.ค. 65	0.046	N/A	N/A	0.027	0.026	0.012	0.017	0.016	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.039	N/A	0.182
16-18 มี.ค. 65	0.046	N/A	0.017	0.027	0.027	0.010	0.019	0.019	0.001	0.006	0.020	0.020	0.023	0.001	0.027	0.029	0.294
21-23 มี.ค. 65	0.023	0.036	0.018	0.023	0.015	0.008	0.011	0.009	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.035	N/A	0.179
26-28 มี.ค. 65	0.035	N/A	0.017	0.025	0.020	0.008	0.014	0.013	N/A	0.004	0.013	0.017	0.013	N/A	0.027	0.018	0.225
5-7 เม.ย. 65	0.018	0.001	0.000	0.003	0.007	0.002	0.004	0.007	0.012	0.023	0.016	0.027	0.021	0.030	0.044	0.029	0.243
10-12 เม.ย. 65	0.035	N/A	0.022	0.032	0.029	0.015	0.015	0.013	N/A	0.005	N/A	N/A	N/A	N/A	0.032	N/A	0.196
15-17 เม.ย. 65	0.017	N/A	0.023	0.036	0.033	0.019	0.018	0.017	N/A	0.003	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.196
25-27 เม.ย. 65	0.014	0.001	0.016	0.002	0.006	0.001	0.003	0.006	0.011	0.022	0.013	0.024	0.021	0.028	0.041	0.027	0.235
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.19
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.05
สูงสุด	0.067	0.036	0.023	0.036	0.033	0.019	0.019	0.019	0.012	0.023	0.020	0.027	0.023	0.030	0.044	0.029	0.294
ต่ำสุด	0.013	0.001	0.000	0.002	0.006	0.001	0.003	0.006	0.000	0.002	0.006	0.009	0.012	0.001	0.013	0.010	0.124

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-6 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 2.1-1.1 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.042	N/A	N/A	0.021	0.019	0.009	0.014	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.148
14-16 ก.พ. 65	0.014	N/A	0.011	0.019	0.020	0.013	0.012	0.012	0.001	0.005	0.012	0.011	0.013	0.002	0.015	0.012	0.171
22-24 ก.พ. 65	0.015	N/A	0.008	0.011	0.013	0.004	0.017	0.017	0.003	0.011	0.018	0.013	0.019	0.005	0.015	0.014	0.181
1-3 มี.ค. 65	0.044	N/A	N/A	0.031	0.035	0.013	0.034	0.036	0.006	0.022	0.035	0.025	0.032	0.011	0.033	0.029	0.384
6-8 มี.ค. 65	0.149	N/A	N/A	0.027	0.021	0.008	0.019	0.020	0.003	0.010	0.028	0.024	0.019	0.003	0.092	0.030	0.451
11-13 มี.ค. 65	0.056	0.025	0.016	0.026	0.027	0.010	0.026	0.030	0.004	0.015	0.029	0.027	0.034	0.011	0.043	0.030	0.409
16-18 มี.ค. 65	0.044	0.026	0.016	0.027	0.029	0.009	0.032	0.034	0.004	0.020	0.038	0.029	0.026	0.011	0.032	0.032	0.409
21-23 มี.ค. 65	0.032	0.027	0.017	0.022	0.017	0.008	0.010	0.010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.034	N/A	0.177
26-28 มี.ค. 65	0.042	0.020	0.016	0.023	0.021	0.008	0.022	0.020	0.003	0.014	0.029	0.024	0.021	0.001	0.027	0.026	0.318
5-7 เม.ย. 65	0.014	0.001	0.000	0.004	0.006	0.001	0.007	0.009	0.012	0.023	0.017	0.027	0.022	0.029	0.041	0.030	0.241
10-12 เม.ย. 65	0.034	N/A	0.021	0.033	0.034	0.016	0.021	0.020	0.004	0.014	0.027	0.023	0.022	0.006	0.038	0.027	0.338
15-17 เม.ย. 65	0.016	N/A	0.023	0.036	0.032	0.019	0.020	0.020	0.001	0.005	0.010	0.023	0.018	N/A	0.035	0.026	0.284
25-27 เม.ย. 65	0.012	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.004	0.006	0.011	0.020	0.012	0.021	0.020	0.025	0.037	0.025	0.197
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.03	0.29
SD	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.11
สูงสุด	0.149	0.027	0.023	0.036	0.035	0.019	0.034	0.036	0.012	0.023	0.038	0.029	0.034	0.029	0.092	0.032	0.451
ต่ำสุด	0.012	0.001	0.000	0.001	0.003	0.001	0.004	0.006	0.001	0.005	0.010	0.011	0.013	0.001	0.015	0.012	0.148

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-7 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 1.1-0.65 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.038	N/A	N/A	0.021	0.020	0.008	0.017	0.015	0.002	0.006	N/A	N/A	0.017	0.002	0.033	0.024	0.203
14-16 ก.พ. 65	0.009	N/A	0.011	0.018	0.017	0.011	0.012	0.013	0.001	0.005	0.013	0.012	0.015	0.002	0.012	0.012	0.162
22-24 ก.พ. 65	0.013	N/A	0.007	0.011	0.016	0.005	0.024	0.026	0.005	0.017	0.030	0.020	0.032	0.012	0.016	0.021	0.256
1-3 มี.ค. 65	0.037	N/A	N/A	0.029	0.032	0.011	0.042	0.047	0.015	0.033	0.061	0.032	0.038	0.022	0.038	0.035	0.472
6-8 มี.ค. 65	0.084	N/A	N/A	0.031	0.029	0.014	0.033	0.050	0.010	0.028	0.059	0.035	0.041	0.014	0.029	0.044	0.501
11-13 มี.ค. 65	0.045	0.030	0.021	0.027	0.026	0.009	0.035	0.042	0.008	0.024	0.044	0.031	0.038	0.022	0.038	0.041	0.482
16-18 มี.ค. 65	0.074	0.015	0.017	0.030	0.033	0.011	0.066	0.068	0.018	0.054	0.102	0.047	0.064	0.051	0.121	0.086	0.857
21-23 มี.ค. 65	0.051	0.041	0.016	0.027	0.023	0.009	0.021	0.018	0.002	0.004	0.020	0.020	0.026	0.004	0.052	0.032	0.365
26-28 มี.ค. 65	0.036	0.027	0.016	0.024	0.021	0.010	0.026	0.025	0.007	0.024	0.042	0.029	0.033	0.019	0.031	0.038	0.408
5-7 เม.ย. 65	0.011	0.001	0.000	0.003	0.007	0.002	0.011	0.018	0.016	0.029	0.029	0.034	0.030	0.039	0.046	0.040	0.316
10-12 เม.ย. 65	0.036	N/A	0.022	0.034	0.033	0.017	0.024	0.026	0.006	0.017	0.036	0.026	0.039	0.009	0.035	0.028	0.386
15-17 เม.ย. 65	0.017	N/A	0.021	0.039	0.038	0.022	0.028	0.030	0.003	0.015	0.036	0.028	0.041	0.018	0.036	0.040	0.411
25-27 เม.ย. 65	0.013	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.006	0.009	0.012	0.023	0.017	0.025	0.023	0.030	0.041	0.031	0.237
ค่าเฉลี่ย	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.39
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.18
สูงสุด	0.084	0.041	0.022	0.039	0.038	0.022	0.066	0.068	0.018	0.054	0.102	0.047	0.064	0.051	0.121	0.086	0.857
ต่ำสุด	0.009	0.001	0.000	0.001	0.004	0.001	0.006	0.009	0.001	0.004	0.013	0.012	0.015	0.002	0.012	0.012	0.162

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-8 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด 0.65-0.43 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.034	N/A	N/A	0.022	0.021	0.009	0.020	0.021	0.005	0.010	0.024	0.024	0.025	0.006	0.030	0.030	0.279
14-16 ก.พ. 65	0.012	N/A	0.011	0.020	0.020	0.013	0.019	0.020	0.007	0.016	0.037	0.021	0.030	0.024	0.022	0.032	0.304
22-24 ก.พ. 65	0.015	N/A	0.000	0.010	0.016	0.005	0.030	0.033	0.012	0.026	0.049	0.025	0.043	0.028	0.020	0.036	0.346
1-3 มี.ค. 65	0.075	N/A	N/A	0.031	0.039	0.022	0.048	0.057	0.020	0.037	0.083	0.039	0.057	0.039	0.038	0.065	0.650
6-8 มี.ค. 65	0.010	N/A	N/A	0.023	0.025	0.009	0.033	0.039	0.014	0.032	0.085	0.037	0.053	0.053	0.038	0.070	0.522
11-13 มี.ค. 65	0.054	0.038	0.016	0.029	0.028	0.009	0.040	0.047	0.017	0.037	0.075	0.038	0.068	0.042	0.047	0.065	0.650
16-18 มี.ค. 65	0.028	0.020	0.018	0.027	0.026	0.009	0.044	0.050	0.018	0.046	0.087	0.041	0.062	0.054	0.049	0.068	0.646
21-23 มี.ค. 65	0.031	0.039	0.015	0.023	0.021	0.008	0.017	0.018	0.002	0.006	0.026	0.022	0.031	0.015	0.057	0.045	0.377
26-28 มี.ค. 65	0.043	0.023	0.015	0.024	0.021	0.010	0.025	0.029	0.009	0.021	0.047	0.031	0.034	0.022	0.029	0.044	0.429
5-7 เม.ย. 65	0.015	0.001	0.000	0.003	0.005	0.002	0.010	0.013	0.014	0.027	0.021	0.029	0.025	0.031	0.041	0.035	0.270
10-12 เม.ย. 65	0.015	N/A	0.022	0.033	0.037	0.018	0.032	0.036	0.012	0.025	0.047	0.029	0.040	0.017	0.022	0.038	0.423
15-17 เม.ย. 65	0.022	N/A	0.023	0.033	0.033	0.021	0.026	0.026	0.011	0.024	0.061	0.034	0.046	0.041	0.042	0.057	0.501
25-27 เม.ย. 65	0.012	0.001	0.001	0.002	0.004	0.001	0.008	0.011	0.014	0.026	0.021	0.027	0.028	0.033	0.043	0.033	0.261
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.44
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.15
สูงสุด	0.075	0.039	0.023	0.033	0.039	0.022	0.048	0.057	0.020	0.046	0.087	0.041	0.068	0.054	0.057	0.070	0.650
ต่ำสุด	0.010	0.001	0.000	0.002	0.004	0.001	0.008	0.011	0.002	0.006	0.021	0.021	0.025	0.006	0.020	0.030	0.261

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ตาราง ข-9 ความเข้มข้นสารพีเอเอชแต่ละชนิดที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นขนาด < 0.43 ไมครอน (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

วันที่ทำการเก็บ ตัวอย่าง	NAP	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLA	PYR	BaA	CHR	BbF	BkF	BaP	IND	DbA	BPER	tPAHs
6-8 ก.พ. 65	0.029	0.001	0.001	0.020	0.016	0.008	0.010	0.010	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.027	0.001	0.120
14-16 ก.พ. 65	0.014	N/A	0.011	0.019	0.018	0.011	0.009	0.009	0.001	0.002	N/A	N/A	N/A	N/A	0.012	N/A	0.106
22-24 ก.พ. 65	0.015	N/A	0.001	0.010	0.015	0.004	0.010	0.009	0.001	0.001	N/A	N/A	N/A	N/A	0.013	N/A	0.076
1-3 มี.ค. 65	0.049	N/A	N/A	0.028	0.025	0.009	0.017	0.015	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.172
6-8 มี.ค. 65	0.047	N/A	N/A	0.028	0.023	0.010	0.015	0.015	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.040	N/A	0.178
11-13 มี.ค. 65	0.045	0.053	0.018	0.023	0.019	0.009	0.013	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.024	N/A	0.213
16-18 มี.ค. 65	0.026	0.023	0.017	0.023	0.021	0.009	0.013	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.031	N/A	0.175
21-23 มี.ค. 65	0.032	0.030	0.016	0.021	0.017	0.008	0.012	0.009	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.030	N/A	0.175
26-28 มี.ค. 65	0.062	0.031	0.018	0.035	0.032	0.014	0.016	0.011	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.220
5-7 เม.ย. 65	0.017	0.001	0.000	0.002	0.002	0.001	0.006	0.003	0.011	0.021	0.001	0.001	0.018	0.026	0.038	0.026	0.171
10-12 เม.ย. 65	0.025	N/A	0.018	0.031	0.032	0.018	0.017	0.014	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.043	0.016	0.214
15-17 เม.ย. 65	0.015	N/A	0.021	0.038	0.032	0.020	0.015	0.013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.029	N/A	0.183
25-27 เม.ย. 65	0.015	0.001	0.001	0.001	0.004	0.001	0.002	0.003	0.011	0.020	0.012	0.023	0.020	0.027	0.041	0.027	0.209
ค่าเฉลี่ย	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.17
SD	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04
สูงสุด	0.062	0.053	0.021	0.038	0.032	0.020	0.017	0.015	0.011	0.021	0.012	0.023	0.020	0.027	0.043	0.027	0.220
ต่ำสุด	0.014	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.012	0.001	0.076

N/A หมายถึง ความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าค่า LOD

ภาคผนวก ค

การวิจัยเรื่อง การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพทางการหายใจจากการรับสัมผัสสารพีเอเอชที่เกาะกับอนุภาคฝุ่นแยกขนาดในอากาศช่วงฤดูหมอกควัน พื้นที่เขตเมืองจังหวัดเชียงใหม่ ปี 2565 เป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพและการตอบสนองของเซลล์เยื่อปอดจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศในฝุ่นแยกขนาดในภาคเหนือของประเทศไทย ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย กรมควบคุมโรค โครงการวิจัยไม่เกี่ยวกับมนุษย์ วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2565 ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก กองทุนวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านกองทุนนวัตกรรมและวิจัย กรมควบคุมโรค ปีงบประมาณ พ.ศ. 2565-2566 รายละเอียดดังรูปที่ ค-1

แบบเสนอโครงการวิจัย เพื่อรับการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย กรมควบคุมโรค

1. ชื่อโครงการวิจัย

(ภาษาไทย)

การประเมินผลกระทบต่อสุขภาพและการตอบสนองของเซลล์เยื่อปอดจากการรับสัมผัสสารมลพิษทางอากาศในฝุ่นแยกขนาดในภาคเหนือของประเทศไทย

(ภาษาอังกฤษ)

Health impact assessment and responses of human lung epithelial cells exposed to air pollutants in size-fractionated particulate matter in Northern Thailand.

2. ชื่อและตำแหน่งของผู้วิจัยหลัก ผู้ร่วมวิจัยและที่ปรึกษา

ลำดับที่	ชื่อ-สกุล	ตำแหน่งในโครงการ	หน่วยงาน	สัดส่วนการมีส่วนร่วม
นาย	วิทวัส อินเลี่ยน	ผู้วิจัยหลัก	กลุ่มโรคไม่ติดต่อ สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 1 เชียงใหม่ e-mail : wittawat_dk@hotmail.com โทร. 053-140773, 094-5931878	30%
รศ.ดร.	สมพร จันทระ	ผู้วิจัยร่วม	ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โทร: 053-943470, 081-5310375 e-mail : sompom.chantara@cmu.ac.th	20%
อ.ดร.	นัตติพร ยะบัง	ผู้วิจัยร่วม	ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โทร: 053-943479, 085-0369915 e-mail : nuttipon.y@cmu.ac.th	20%
อ.ดร.	ดวงเดือน เทพนวล	ผู้วิจัยร่วม	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ โทร: 053-885620-1, 095-6760484 e-mail : duangdueanthe@gmail.com	20%
นาง	เจียรนัย ชันติพงษ์	ผู้วิจัยร่วม	กลุ่มห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ด้าน ควบคุมโรค สำนักงานป้องกันควบคุมโรค ที่ 1 เชียงใหม่ โทร: 081-0280005 e-mail : Jkhantipong3C@yahoo.com	10%

1



รับรองโครงการวิจัยไม่เกี่ยวกับมนุษย์
11 กพ. 2565
อนุมัติ

รูปที่ ค-1 แบบเสนอโครงการวิจัย เพื่อรับการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย กรมควบคุมโรค