

การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ในตัวอย่างอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ตามแนวดิ่งในชั้นบรรยากาศ ตัวเมืองจังหวัดเชียงใหม่

ศิริวัช พงษ์เพียจันทร์^{a,b*} สุรัตน์ บัวเลิศ^b กิตติชัย ดวงมัลย์^c และ เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล^{a,d}

Vertical Variations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM₁₀ Samples from Chiang-Mai City Atmosphere

Siwatt Pongpiachan^{a,b*}, Surat Bualert^b, Kittichai Duangmal^c and Penjai Sompongchaiyakul^{a,d}

^aหน่วยวิจัยชีวธรณีเคมีและการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

^bภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

^cวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10903

^dศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

^aBiogeochemical and Environmental Change Research Unit, Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand.

^bDepartment of General Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

^cCollege of Environment, Kasetsart University, Bangkok 10903, Thailand.

^dNational Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management-PSU Satellite Center, Prince of Songkla University, Songkla 90112, Thailand.

*Corresponding author. E-mail address: pongpiajun@gmail.com (S. Pongpiachan)

Received 17 December 2008; accepted 15 December 2009

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) ในอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM₁₀) ตามแนวดิ่ง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของสารเหล่านี้ในชั้นบรรยากาศตัวเมืองเชียงใหม่ โดยตัวอย่างอากาศถูกเก็บทุก 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วันที่ 3 ระดับความสูง (จุดเก็บที่ 1: 12 เมตร; จุดเก็บที่ 2: 52 เมตร; จุดเก็บที่ 3: 152 เมตร) ณ โรงแรมดิอิมพีเรียลแม่งปิง สำหรับจุดเก็บที่ 2 และโรงแรมเซ็นทาราดวงตะวัน สำหรับจุดเก็บที่ 1 และ 3 ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ 2551 สำหรับการวิเคราะห์ พีเอเอช เริ่มจาก การนำตัวอย่างไปสกัดด้วยอุปกรณ์ ซอกซ์เล็ท โดยใช้ ไดคลอโรมีเทน เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ แล้วนำไปคำนวณหาระดับความเข้มข้นต่อโดย GC/MS ผลการวิจัย พบว่า ค่าเฉลี่ยระดับความเข้มข้นรวมของ พีเอเอช ณ จุดเก็บที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 6.387 ± 5.309 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, 6.588 ± 5.690 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 6.764 ± 6.665 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ระดับความเข้มข้นของ B[a]P มีค่าสูงกว่า ค่ามาตรฐานสากล UK-EPAQS ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 2-3 เท่า จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นในรอบวัน พบว่า พีเอเอช มีค่าสูงสุดในช่วงเช้า (06.00-09.00 นาฬิกา) และช่วงหลังเที่ยงคืน (00.00-03.00 นาฬิกา) ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนของ พีเอเอช, สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน และ *t*-test พบว่า 1. ไอเสียจากยานพาหนะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในชั้นบรรยากาศของทุกระดับความสูง 2. เขม่าควันจากการเผาชีวมวลและการลดระดับของความสูงผสมอาจเป็นสาเหตุสำคัญในการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้น พีเอเอช ในรอบวันของทุกระดับความสูง

คำสำคัญ: โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน; อนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร; การเปลี่ยนแปลงในช่วงวัน; การกระจายตัวตามแนวดิ่ง

Abstract

Vertical variations of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations in PM₁₀ were investigated in order to assess the factors controlling their behaviors in urban atmosphere of Chiang-Mai city, Thailand. Air samples were collected every three hours for three days at three different levels (i.e. site-1: 12 m; site-2: 52 m; site-3: 152 m above the ground level) at the Imperial Mae Ping Hotel (site-2) and Centara Duangtawan Hotel (site-1 and site-3) in February 25th-28th 2008. PAH extraction was conducted by Soxhlet in dichloromethane and quantification by GC-MS. The total PAH concentrations (15 species) measured at site-1, site-2 and site-3 were 6.387 ± 5.309 ng m⁻³, 6.588 ± 5.690 ng m⁻³ and 6.764 ± 6.665 ng m⁻³ respectively. The B[a]P concentrations showed, at all levels, values 2-3 fold higher than the United Kingdom Expert Panel on Air Quality Standard (i.e. 0.25 ng m⁻³). PAHs exhibited a diurnal variation with maximums in day time (06.00 am - 09.00 am) and night time (00.00 am - 03.00 am). Pearson correlation analysis, *t*-test and binary ratio analysis of PAHs revealed following results; 1. Traffic emissions appear to be responsible for diurnal variations of PAHs at all levels, 2. Smoke from biomass burnings coupled with the decrease of mixing height might play an important role in diurnal variation of PAHs at all levels.

Keywords: Polycyclic aromatic hydrocarbons; PM₁₀; Diurnal variation; Vertical distribution

บทนำ

ในปัจจุบัน ทั้งภาครัฐและเอกชน ได้ตระหนักถึงความสำคัญของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาจากสารมลพิษในอากาศ ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ในบรรดากลุ่มสารมลพิษที่ตกค้างยาวนาน (Persistent Organic Pollutants: POPs) โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) เป็นกลุ่มสารพิษ ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง และก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ซึ่งตกค้างอยู่ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด และมีแหล่งกำเนิดมาจากทั้งแหล่งธรรมชาติ เช่น ไฟไหม้ป่าตามธรรมชาติ การระเบิดของภูเขาไฟ รวมทั้งกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทต่างๆ ในระบบขนส่งมวลชน โรงงานอุตสาหกรรม โรงงานไฟฟ้า โรงงานเผาขยะ และโรงงานถลุงแร่อลูมิเนียม (Cheng et al., 2008; Geptner et al., 2006; Healy et al., 2001; Kim et al., 2003) ผลจากงานวิจัยในอดีต พบว่า จำนวนของผู้ป่วยโรคมะเร็งในปอดแปรผันโดยตรงกับระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในอากาศ (Mensah et al., 2005) นอกจากนี้ รายงานหลายฉบับได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้เสียชีวิตจากโรคมะเร็งทางเดินหายใจและโรคเส้นเลือดหัวใจตีบ กับระดับความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยในอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมครอน หรือฝุ่น PM₁₀ (Particulate Matter 10: PM₁₀) ซึ่งมี ฟีเอเอช เป็นองค์ประกอบสำคัญ (Saarnio et al., 2008)

จากรายงานประจำปี พ.ศ. 2538-2540 ของสถาบันวิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer) พบว่า จังหวัดเชียงใหม่ มีอัตราผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งในปอดและระบบทางเดินหายใจสูงเป็นอันดับสองในประเทศไทย รองจากจังหวัดลำปาง โดยมีค่า 35.3 และ 26.1 คน ต่อจำนวนประชากรเพศชายและหญิง 1 แสนคน ตามลำดับ ซึ่งนับเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับอัตราผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งในปอดและระบบทางเดินหายใจในกลุ่มประเทศเอเชียอื่นๆ เช่น ฮานอย (เพศชาย: 34.4, เพศหญิง: 7.2), การากี (เพศชาย: 21.0, เพศหญิง: 2.9), โซล (เพศชาย: 49.0, เพศหญิง: 12.7), อิโรซิมา (เพศชาย: 4.3, เพศหญิง: 11.8) และ นิวเดลี (เพศชาย: 13.4, เพศหญิง: 2.9) หากเปรียบเทียบความแตกต่างในเชิงภูมิศาสตร์ ระหว่างตัวเมืองเชียงใหม่กับส่วนเมืองในภูมิภาคอื่น จะพบว่ามลอากาศในตัวเมืองเชียงใหม่ มีโอกาส

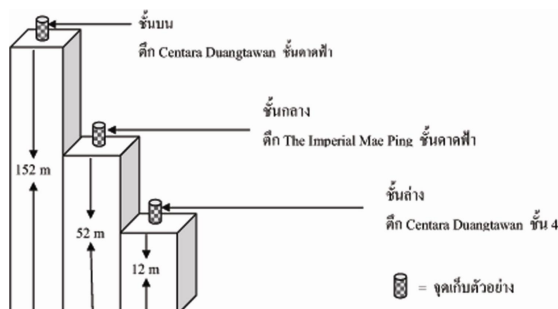
ที่จะถูกกักขังได้ง่ายเป็นพิเศษ เนื่องจาก ถูกรายล้อมด้วยภูเขาทำให้สภาพภูมิประเทศมีลักษณะคล้ายแอ่งกระทะ ส่งผลให้เกิดการสะสมของสารมลพิษในชั้นบรรยากาศ ในขณะที่อำเภอหาดใหญ่ หรือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร มีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มและได้รับอิทธิพลของมวลอากาศบริสุทธิ์ จากทะเลไหลหมุนเวียนเข้ามาตลอดทำให้ปริมาณการสะสมของสารมลพิษในอากาศน้อยกว่าจังหวัดที่มีภูมิประเทศเป็นแอ่งกระทะ เช่น จังหวัดลำปาง หรือ จังหวัดเชียงใหม่ นอกจากนี้ ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศและความเข้มของแสง ยูวี ระหว่างฤดูกาลอาจเป็นสาเหตุสำคัญต่อการผันผวนของอัตราการย่อยสลายของ ฟีเอเอช ในชั้นบรรยากาศของ จังหวัดเชียงใหม่

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยหลายชิ้นได้ทำการวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นและอัตราส่วนของ ฟีเอเอช ในชั้นบรรยากาศของตัวเมืองต่างๆ แต่ส่วนใหญ่ มักเป็นการเก็บตัวอย่างในแนวราบจำนวนหลายจุดโดยใช้ เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง (Ding et al., 2007; Esen et al., 2008; Scheyer et al., 2008) ส่งผลให้ทางวิทยาศาสตร์ยังขาดองค์ความรู้เกี่ยวกับการกระจายตัวของ ฟีเอเอช ในแนวตั้งตามช่วงเวลาของแต่ละวัน รวมทั้ง ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา เช่น ความเข้มข้นของรังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และเงื่อนไขทางภูมิประเทศที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในแต่ละระดับความสูง

วัตถุประสงค์และวิธีการ

1. จุดเก็บตัวอย่างของพื้นที่ศึกษา

การศึกษาวิจัยในพื้นที่นี้ จะทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศชนิดไฮโดรลัม ที่มีหัวคัดแยกฝุ่นละออง ขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน จำนวน 3 เครื่อง บนชั้นดาดฟ้าของแต่ละอาคารในระดับความสูงที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ชั้นล่าง มีความสูงประมาณ 12 เมตร จากระดับพื้นดิน (อาคารเซ็นทาราดวงตะวัน) ชั้นกลาง มีความสูงประมาณ 52 m จากระดับพื้นดิน (อาคารอิมพีเรียลแมกปีง) และ ชั้นบน มีความสูงประมาณ 122 เมตร จากระดับพื้นดิน (อาคารเซ็นทาราดวงตะวัน) ทุก 3 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 วัน ติดต่อกัน (25-28 ก.พ. 2551) ในชั้นบรรยากาศของตัวเมืองเชียงใหม่ (ดังรูปที่ 1)



รูปที่ 1 แผนผังจุดเก็บตัวอย่าง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

2. วิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ พีเอเอช

2.1 วิธีการเก็บตัวอย่าง

การศึกษาวิจัยในพื้นที่นี้ จะทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างอากาศชนิดไฮโดรลัม ที่มีหัวคัดแยกฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ตามมาตรฐานของ US EPA โดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัด แบบความละเอียดสูง เพื่อทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง ทุก 3 ชั่วโมง ต่อเนื่องตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ที่ความสูง 3 ระดับโดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 24 ตัวอย่างต่อ 1 ระดับความสูงรวมทั้งสิ้น 72 ตัวอย่าง (ดังรูปที่ 1)

2.2 วิธีการวิเคราะห์ พีเอเอช

2.2.1 การสกัดตัวอย่าง

ตัวทำละลายอินทรีย์ทั้งหมด เป็นสารเคมีชนิด HPLC grade จากบริษัท Fisher Scientific และสารมาตรฐาน เนทีฟ-พีเอเอช 15 ชนิด ได้แก่ Phenanthrene (Ph), Anthracene (An), Fluoranthene (Fluo), Pyrene (Pyr), 11H-Benzo[a]fluoranthene (11H-B[a]F), 11H-Benzo[b]fluoranthene (11H-B[b]F), Benzo[a]anthracene (B[a]A), Chrysene (Chry), Benzo[b]fluoranthene (B[b]F), Benzo[k]fluoranthene (B[k]F), Benzo[e]pyrene (B[e]P), Benzo[a]pyrene (B[a]P), Indeno[1,2,3,c,d]pyrene (Ind), Dibenzo[a,h]anthracene (D[a,h]A) และ Benzo[g,h,i]perylene (B[g,h,i]P) ซึ่งละลายอยู่ในเมทานอล (100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) และใช้ ดิวทีเรท-Fluorene (deut-Fl) และ ดิวทีเรท-Perylene (deut-Per) เป็น สารมาตรฐานภายใน โดยสารมาตรฐาน เนทีฟ-พีเอเอช และ ดิวทีเรท-พีเอเอช ซึ่งจัดจำหน่ายโดย บริษัท Chiron ส่วน ซิลิกาเจล (0.040-0.063 มิลลิเมตร) จากบริษัท Merck และ ซอกส์เล็ท ทิมเบอร์ ที่ใช้ในการสกัดและไลแอกซ์ จากบริษัท Whatman อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์จะถูกนำไปสกัด ด้วยวิธี ซอกส์เล็ท โดยใช้ไดคลอโรมีเทน (DCM) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์และทำการสกัดเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ส่วน กระดาษกรองใยหิน (QFFs) จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่บนกระดาษกรอง นอกจากนี้ อุปกรณ์เครื่องแก้วทุกชิ้นจะถูกทำความสะอาดโดยการนำไปล้าง ด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Milli-Q Water) ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แล้วจะล้างต่อด้วย ดีซีเอม ก่อนนำไปใช้

2.2.2 ขั้นตอนการแยกองค์ประกอบ/ทำความสะอาด (Fractionation/Cleanup) และ โบลว์ดาวน์ (Blowdown)

ตารางที่ 1 ค่า ขีดจำกัดของเครื่องมือ (IDL) ระยะเวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ (RT) ความละเอียดในการแยกพีค (R) ความยาวของคอลัมน์ (L) ค่าจำนวนเพลท (N) และความหนาของเพลท (HETP)

PAHs	RT (min)	IDL (pg ul ⁻¹)	R	L (mm)	N	HETP (mm)
Ph	26.53	2.63	1.44	60000	931693	0.064
An	26.63	2.80	1.44	60000	936934	0.067
Fluo	30.13	1.47	7.62	60000	2136956	0.029
Pyr	30.83	1.35	7.62	60000	1624902	0.037
11H-B[a]F	31.83	0.77	2.10	60000	1577749	1.227
11H-B[b]F	32.03	0.79	2.10	60000	1133837	1.498
B[a]A	34.45	0.86	0.94	60000	2418061	0.026
Chry	34.58	0.84	0.94	60000	1962729	0.032
B[b]F	38.45	48.66	1.35	60000	2102556	0.034
B[k]F	38.65	43.42	1.35	60000	2112533	0.038
B[e]P	39.80	49.04	2.40	60000	2096553	0.030
B[a]P	40.05	61.25	2.40	60000	2176625	0.036
Ind	46.89	61.25	2.45	60000	3913510	0.017
D[a,h]A	47.11	45.39	2.45	60000	2244480	0.489
B[g,h,i]P	48.93	2.21	-	60000	403043	3.930

ขั้นตอนการแยกองค์ประกอบ/ทำความสะอาด ทำตามวิธีของ Yunker & Macdonald (2003) คือ หลังจากทำการสกัด ด้วยวิธี ซอกส์เล็ท ตัวทำละลาย ดีซีเอม จะถูกรวบรวมแล้วนำไปลดปริมาณลง ด้วยเครื่องระเหยสาร แล้วนำไปลดปริมาณลงอีกครั้ง ด้วยการ โบลว์ดาวน์โดยก๊าซไนโตรเจน เพื่อเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายจาก ดีซีเอม เป็น เฮกเซน นำสารละลายที่ได้ไปทำการแยกองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบ พีเอเอช ออก ด้วยวิธี แฟลชโครมาโตกราฟี โดยใช้ ซิลิกาเจลคอลัมน์ ซึ่งมีขนาด 30 x 0.7 เซนติเมตร และบรรจุ ซิลิกาเจล หนัก 1.5 กรัม ผ่านการอบ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับตัวทำละลายที่ใช้ในการแยกสารประกอบ แบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) สารละลาย เฮกเซน ในปริมาตร 15 มิลลิลิตร เพื่อแยก พีเอเอช ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย เช่น Ph, An, Fluo, Pyr, 11H-B[a]F, 11H-B[b]F, B[a]A, Chry และ 2) สารละลายผสมระหว่าง โทลูอีน กับ เฮกเซน ในอัตราส่วน 96 ต่อ 54 โดยปริมาตร เพื่อแยก พีเอเอช ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น B[b]F, B[k]F, B[e]P, B[a]P, Ind, D[a,h]A และ B[g,h,i]P หลังจากทำการแยกองค์ประกอบ สารละลายจะถูกนำไปลดปริมาณ โดยการใช้เครื่องระเหยสาร แล้วนำไประเหยด้วยแก๊สไนโตรเจน (ตั้งค่าอัตราการไหลที่ 1.0 มิลลิบาร์) ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS

2.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS

งานวิจัยชิ้นนี้ ได้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Varian ประกอบด้วย ส่วนที่เป็น แมสสเปกโตรมิเตอร์ ชนิด ไอออน แทรป รุ่น Saturn 2200 และส่วนที่เป็น แก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น CP-3800 สำหรับ แคปิลารี คอลัมน์ ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Agilent รุ่น DB-5 (ความยาว 60 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร) เคลือบด้วย เฟนิล 5 เปอร์เซนต์ และ ไดมัททิวโพลีซิลอกเซน 95 เปอร์เซนต์ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์กลุ่มสารประกอบไร้ขั้ว สำหรับเงื่อนไขในการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ใน GC/MS เริ่มจากการตั้งค่าอุณหภูมิของ อินเจกเตอร์ พอร์ท, ทรานสเฟอร์ไลน์, มานิโฟลด์ และ ไอออน แทรป ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 200 องศาเซลเซียส 200 องศาเซลเซียส และ 280 เซลเซียส ตามลำดับ และ ก๊าซตัวนำพา คือ ฮีเลียมกับความดันที่หัวคอลัมน์ คือ 25 พิเอสไอ สำหรับโปรแกรม ซี้-แรมป์ ได้ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้น เร่งอุณหภูมิให้สูงขึ้นด้วย อัตรา 8 องศาเซลเซียส ต่อ นาที จนระดับอุณหภูมิขึ้นสูงถึง 300 องศาเซลเซียส และ รักษาอุณหภูมิให้คงที่ เป็นเวลา 50 นาที รายละเอียดของเงื่อนไขในการวิเคราะห์ (ดังตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึง ชีตจำกัดของเครื่องมือ (IDL) ในการวิเคราะห์สาร พีเอเอช แต่ละชนิด รวมทั้งระยะเวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ (RT) ความละเอียดในการแยกพีค (R) ค่าจำนวนเพลท (N) และความหนาของเพลท (HETP) ผลการคำนวณ พบว่า สาร พีเอเอช ทุกตัวมีค่า IDL ต่ำกว่า 100 pg ul^{-1} ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐาน (100 นาโนกรัมต่อไมโครลิตร) ที่ใช้ในการคำนวณระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในสารตัวอย่างถึงหนึ่งพันเท่า นอกจากนี้ ค่า R ของสาร พีเอเอช ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่า 1.5 ซึ่งหมายถึง มีความละเอียดในการแยกพีคสูง ส่วนสาร พีเอเอช ที่มีค่า R ต่ำกว่า 1.5 เช่น Phe, An, B[a]A, Chry, B[b]F, B[k]F ผู้วิเคราะห์ ควรใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษขณะที่ทำการคำนวณ เพราะอาจอินที่เกเรต พีคที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงได้ ส่วนของระยะเวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ จำนวนของเพลท และความหนาของเพลทมีค่าใกล้เคียงกับรายงานที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติหลายฉบับ (Kalaitzoglou et al., 2004; Lim et al., 1999; Yunker et al., 2003)

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

ลักษณะการกระจายตัวของ พีเอเอช

1. ชั้นล่าง

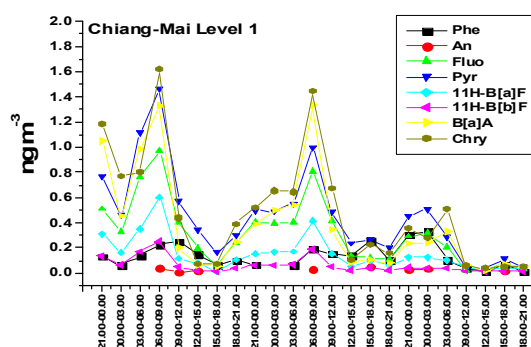
ผลการตรวจวัดค่า พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณตลาดฟ้า อาคารจอดรถ โรงแรมเซ็นทาราดวงตะวัน พบว่ามีค่าระหว่าง 0.005-4.579 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.387 ± 5.309 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงที่สุดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.524 ± 0.469 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P = 0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนด โดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 2.10 เท่า (ตารางที่ 5 และรูปที่ 2-3)

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย, ค่ามาตรฐานเบี่ยงเบน, ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดของ พีเอเอช ใน PM_{10} ที่จังหวัดเชียงใหม่ทั้ง 3 ระดับชั้น (25/02/08-28/02/08)

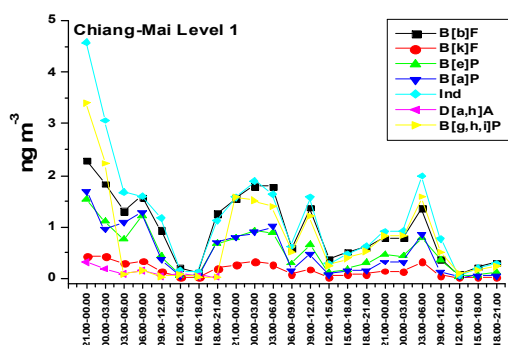
	ชั้นล่าง				ชั้นกลาง				ชั้นบน			
	AVER	STDEV	MIN	MAX	AVER	STDEV	MIN	MAX	AVER	STDEV	MIN	MAX
Phe	0.282	0.180	0.022	0.668	0.376	0.324	0.058	1.120	0.250	0.132	0.038	0.562
An	0.060	0.038	0.010	0.138	0.260	0.176	0.102	0.798	0.100	0.052	0.014	0.238
Fluo	0.638	0.510	0.040	1.942	0.528	0.506	0.004	1.640	0.320	0.342	N.D.	1.316
Pyr	0.922	0.708	0.060	2.922	0.808	0.672	0.010	2.304	0.730	0.698	0.044	2.904
11H-B[a]F	0.316	0.280	0.024	1.202	0.238	0.172	0.040	0.594	0.216	0.212	0.012	0.664
11H-B[b]F	0.130	N.D.	0.026	0.500	0.130	N.D.	0.016	0.344	0.140	N.D.	N.D.	0.764
B[a]A	0.770	0.812	0.034	2.666	0.834	0.818	0.038	2.762	1.848	1.916	0.030	5.798
Chry	0.982	0.896	0.074	3.250	0.978	0.802	0.064	2.752	1.238	1.434	0.106	5.074
B[b]F	1.968	1.328	0.162	4.586	2.254	1.852	0.106	5.896	1.668	1.478	0.024	4.686
B[k]F	0.346	0.272	0.026	0.864	0.316	0.296	0.014	0.950	0.574	0.712	N.D.	3.026
B[e]P	1.126	0.822	0.092	3.092	1.220	0.882	0.170	3.312	1.360	1.328	0.022	4.666
B[a]P	1.048	0.938	0.060	3.346	1.106	1.178	0.046	4.232	1.870	2.310	0.028	9.346
Ind	2.388	2.116	0.110	9.158	2.292	2.126	0.074	6.906	1.452	1.210	0.118	4.304
D[a,h]A	0.240	N.D.	0.072	0.624	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.002	N.D.	0.002	0.002
B[g,h,i]P	1.558	1.718	0.060	6.810	1.816	1.576	0.100	5.980	1.760	1.306	0.152	4.066

AVER: ค่าเฉลี่ย, STDEV: ค่ามาตรฐานเบี่ยงเบน, MIN: ค่าต่ำสุด, MAX: ค่าสูงสุด, N.D.: Not Detected

Phe: Phenanthrene, An: Anthracene, Fluo: Fluoranthene, Pyr: Pyrene, 11H-B[a]F: 11H-Benzo[a]fluoranthene, 11H-B[b]F: 11H-Benzo[b]fluoranthene, B[a]A: Benzo[a]anthracene, Chry: Chrysene, B[b]F: Benzo[b]fluoranthene, B[k]F: Benzo[k]fluoranthene, B[e]P: Benzo[e]pyrene, B[a]P: Benzo[a]pyrene, Ind: Indeno[1,2,3-cd]perylene, D[a,h]A: Dibenzo[a,h]anthracene, B[g,h,i]P: Benzo[g,h,i]perylene



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นล่างของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นล่างของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่

นอกจากนี้ อัตราส่วนของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ได้แก่ Ind (18.7%), B[b]F (15.4%), B[g,h,i]P (12.2%), B[e]P (8.81%) และ B[a]P (8.20%) ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จะสังเกตเห็นได้ว่า Ind ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของชีวมวลมีค่าสูงสุดที่สถานี เชียงใหม่ แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเผาชีวมวลเพื่อการเกษตร

มีอิทธิพลต่อระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศใจกลาง เมืองเชียงใหม่มากกว่า พีเอเอช ที่เกิดจากยานพาหนะ ลักษณะเฉพาะ อีกประการของสถานีเชียงใหม่ คือ มีอัตราส่วนของ B[b]F และ B[g,h,i]P อยู่ในระดับที่สูงใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในสถานีกรุงเทพฯ สะท้อนให้เห็นถึงการผสมของมวลอากาศจากสองแหล่งกำเนิดที่สำคัญ กล่าวคือ “ไอเสียจากยานพาหนะ” และ “เขม่าควันจากการเผาชีวมวล”

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของ พีเอเอช ใน PM₁₀ ที่สถานีจังหวัดเชียงใหม่ ชั้นล่าง

ชั้นล่าง	
อัตราส่วนของระดับความเข้มข้น [%]	
Phe	2.21
An	0.47
Fluo	4.99
Pyr	7.22
11H-B[a]F	2.47
11H-B[b]F	1.02
B[a]A	6.03
Chry	7.69
B[b]F	15.41
B[k]F	2.71
B[e]P	8.81
B[a]P	8.20
Ind	18.69
D[a,h]A	1.88
B[g,h,i]P	12.20

2. ชั้นกลาง

ผลการตรวจวัดค่า พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณ ดาดฟ้า โรงแรมดิอิมพีเรียลแม่ปิง พบว่า มีค่าระหว่าง ND-3.453 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.588 ∇ 5.690 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.553 ∇ 0.589 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P = 0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนดโดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 2.21 เท่า (ตารางที่ 5)

นอกจากนี้ อัตราส่วนของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ได้แก่ Ind (17.4%),

B[b]F (17.1%), B[g,h,i]P (13.8%), B[e]P (9.26%) และ B[a]P (8.39%) ตามลำดับ (ตารางที่ 3) จะสังเกตเห็นได้ว่า การกระจายตัวของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก ทั้งระดับล่างและกลาง มีการเรียงลำดับอัตราส่วนที่เหมือนกัน กล่าวคือ Ind > B[b]F > B[g,h,i]P > B[e]P > B[a]P สะท้อนให้เห็นถึง

1. ความเสถียรหรือความทนทานของ พีเอเอช เหล่านี้ต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแสง และปฏิกิริยาทางชีวภาพ กับก๊าซโอโซน อนุมูลอิสระโอเอช และก๊าซน็อกซ์

2. มวลอากาศชั้นล่างกับชั้นกลางผสมเป็นเนื้อเดียวกันจนไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างในอัตราส่วนของ พีเอเอช ทั้ง 5 ชนิด Ind ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของชีวมวลมีค่าสูงสุดที่ระดับล่างและกลาง แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากการเผาชีวมวลเพื่อการเกษตรที่มีต่อระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศใจกลาง เมืองเชียงใหม่ทั้งสองระดับชั้น

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของ พีเอเอช ใน PM_{10} ที่สถานีจังหวัดเชียงใหม่ ชั้นกลาง

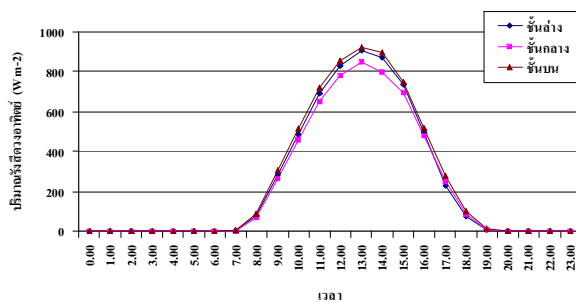
ชั้นกลาง	
อัตราส่วนของระดับความเข้มข้น [%]	
Phe	2.85
An	2.13
Fluo	4.01
Pyr	6.13
11H-B[a]F	1.81
11H-B[b]F	0.99
B[a]A	6.33
Chry	7.42
B[b]F	17.11
B[k]F	2.40
B[e]P	9.26
B[a]P	8.39
Ind	17.40
D[a,h]A	N.D.
B[g,h,i]P	13.78

3. ชั้นบน

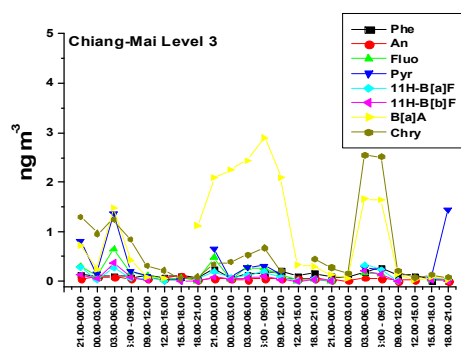
ผลการตรวจวัดค่า พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณตลาดฟ้า โรงแรมเซ็นทาราดวงตะวัน พบว่า มีค่าระหว่าง ND-4.673 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.764 ± 6.665 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.935 ± 1.155 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P = 0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนด โดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 3.74 เท่า (ตารางที่ 5 และรูปที่ 9-11)

นอกจากนี้ อัตราส่วนของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ได้แก่ B[a]P (13.8%),

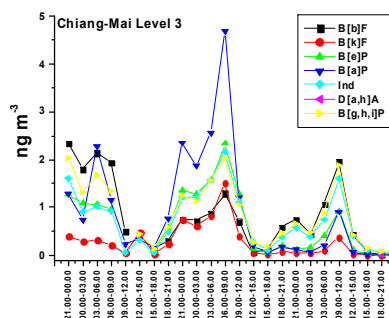
B[a]A (13.7%), B[g,h,i]P (13.0%), B[b]F (12.3%) และ Ind (10.7%) ตามลำดับ (ตารางที่ 4) สังเกตได้ว่า การกระจายตัวของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด 5 อันดับแรก ในชั้นบนแตกต่างจากชั้นกลาง และชั้นล่าง กล่าวคือ อัตราส่วนของ Ind ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่อัตราส่วนของ B[a]P, B[a]A, B[g,h,i]P และ B[b]F กลับเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึง แหล่งกำเนิดของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นบน อาจแตกต่างจากมวลอากาศชั้นกลางกับชั้นล่าง และ/หรือ มีกลไกบางอย่างที่คอยทำลายโครงสร้างทางเคมีของ B[b]F และ Ind ส่งผลให้ระยะเวลาการคงอยู่ ในชั้นบรรยากาศของ พีเอเอช ทั้งสองชนิดลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์โดยใช้องค์ความรู้ของอัตราส่วนระหว่าง พีเอเอช เพียงไม่กี่ชนิด อาจไม่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์หาแหล่งกำเนิดของ พีเอเอช เนื่องจาก มีหลายปัจจัยที่ทำให้โครงสร้างของ พีเอเอช แต่ละชนิดถูกทำลายลงด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศในรอบวันเฉลี่ย ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณพื้นที่ศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นบนของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นบนของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของ พีเอเอช ใน PM₁₀ ที่สถานีจังหวัดเชียงใหม่ ชั้นบน

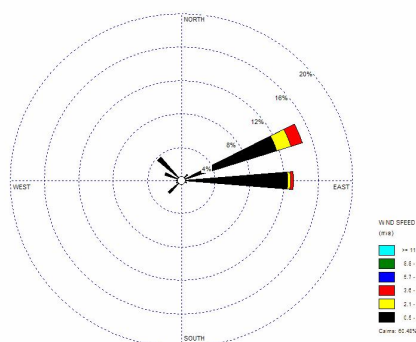
ชั้นบน	
อัตราส่วนของระดับความเข้มข้น %)	
Phe	1.85
An	0.74
Fluo	2.37
Pyr	5.40
11H-B[a]F	1.60
11H-B[b]F	1.03
B[a]A	13.66
Chry	9.15
B[b]F	12.33
B[k]F	4.24
B[e]P	10.05
B[a]P	13.82
Ind	10.73
D[a,h]A	0.01
B[g,h,i]P	13.01

2. ชั้นกลาง

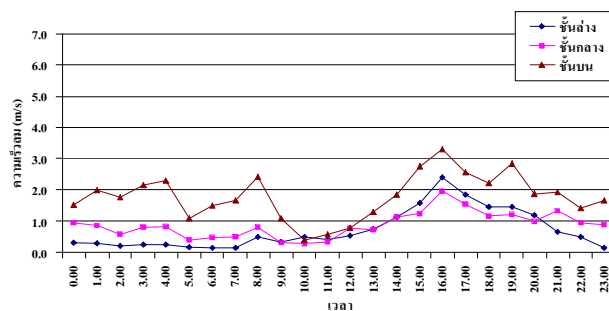
ผลการตรวจวัดค่า พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณ ดาดฟ้า โรงแรมดิอิมพีเรียลแม่ปิง พบว่า ความเร็วลม มีค่าระหว่าง 0.0-3.6 เมตรต่อวินาที และมีทิศทางลมพัดจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือและทิศตะวันออกเฉียงใต้ (รูปที่ 5-6) และเมื่อนำผลการตรวจวัด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยเพื่อแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน พบว่าในช่วงการศึกษามีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 เมตรต่อวินาที ในช่วงเวลา 16.00 นาฬิกา ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่ พีเอเอช ส่วนใหญ่ เช่น Fluo, Pyr, B[a]A, Chry, B[b]F, B[k]F, B[e]P, B[a]P, Ind และ B[g,h,i]P มีระดับความเข้มข้นต่ำสุด ในช่วงเวลา 15.00-18.00 นาฬิกา สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของ "การเจือจาง" ที่มีต่อระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลาง

จากการวิเคราะห์ *t*-test พบว่า แหล่งกำเนิดที่สำคัญของ Phe, 11H-B[b]F, B[a]A, Chry, B[b]F, B[k]F, B[e]P, B[a]P, Ind

และ B[g,h,i]P ในมวลอากาศชั้นกลาง น่าจะมาจากการลอยตัวของ มวลอากาศจากชั้นล่าง ซึ่งมีไอเสียของยานพาหนะเป็นองค์ประกอบหลัก และเขม่าควันจากการเผาไหม้ชีวมวลเป็นองค์ประกอบรอง เนื่องจากค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มข้นระหว่างกลุ่ม พีเอเอช ทั้ง 10 ชนิดดังกล่าว ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกระดับความเชื่อมั่น (ตารางที่ 6) ในขณะที่กลไกควบคุมระดับความเข้มข้นของ An, Fluo, Pyr และ 11H-B[a]F อาจมาจากแหล่งกำเนิดชนิดอื่น เช่น การไหลย้อนกลับของมวลอากาศจากดอยสุเทพในช่วงเวลา กลางคืน เนื่องจากค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มข้นระหว่าง พีเอเอช ทั้ง 4 ชนิด ดังกล่าว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ (ตารางที่ 6) และ พีเอเอช ทั้ง 4 ชนิด ยังเป็นตัวแทนของไอเสียจากยานพาหนะ (Liu et al., 2007) อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าสังเกตว่า ไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง พีเอเอช ทุกชนิดในมวลอากาศชั้นล่างกับชั้นกลางที่ระดับความเชื่อมั่น 99.5 เปอร์เซนต์ (ตารางที่ 6)



รูปที่ 5 ทิศทางและความเร็วลม ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณชั้น 4 อาคารจอดรถ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในรอบวันเฉลี่ย ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณพื้นที่ศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 6 ผลวิเคราะห์ค่า t -test ระหว่างระดับความเข้มข้นของ ฟิเอเอช ในชั้นล่างและชั้นกลางตามค่า p ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%, 99% และ 99.5%

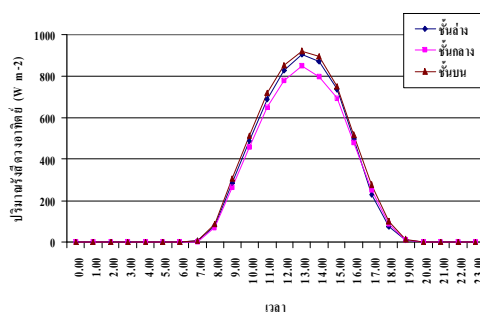
	$p < 0.05$	$p < 0.01$	$p < 0.005$
Phe _{ชั้นล่าง} - Phe _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
An _{ชั้นล่าง} - An _{ชั้นกลาง}	S	N.S.	N.S.
Fluo _{ชั้นล่าง} - Fluo _{ชั้นกลาง}	S	S	N.S.
PyT _{ชั้นล่าง} - PyT _{ชั้นกลาง}	S	S	N.S.
11H-B[a]F _{ชั้นล่าง} - 11H-B[a]F _{ชั้นกลาง}	S	N.S.	N.S.
11H-B[b]F _{ชั้นล่าง} - 11H-B[b]F _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[a]A _{ชั้นล่าง} - B[a]A _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
Chry _{ชั้นล่าง} - Chry _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[b]F _{ชั้นล่าง} - B[b]F _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[k]F _{ชั้นล่าง} - B[k]F _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[e]P _{ชั้นล่าง} - B[e]P _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[a]P _{ชั้นล่าง} - B[a]P _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
Ind _{ชั้นล่าง} - Ind _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.
B[ghi]P _{ชั้นล่าง} - B[ghi]P _{ชั้นกลาง}	N.S.	N.S.	N.S.

¹S: แสดงต่างอย่างมีนัยสำคัญ

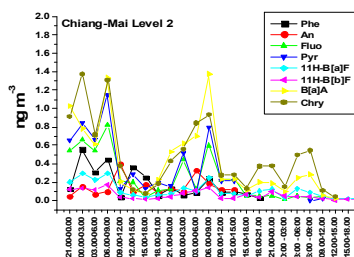
²NS: ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ผลการตรวจวัดรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2551 บริเวณตลาดฟ้า โรงแรมดิอิมพีเรียล แม่ปิง พบว่า ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าระหว่าง 4-947 วัตต์ต่อตารางเมตร และเมื่อนำผลการตรวจวัด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยเพื่อแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน พบว่า ในระหว่างการศึกษารังสีดวงอาทิตย์ ในชั้นกลางมีค่าสูงสุด เท่ากับ 850 วัตต์ต่อตารางเมตร ในช่วงเวลา 13.00 นาฬิกา และมีค่าต่ำสุด เท่ากับ 2 วัตต์ต่อตารางเมตร ในช่วงเวลา 07.00 นาฬิกา (รูปที่ 4) สอดคล้องกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ ฟิเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลาง

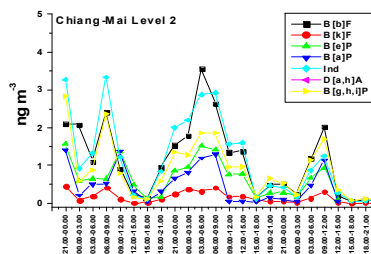
เกือบทุกชนิด โดยมีค่าอัตราส่วนระดับความเข้มข้น ระหว่างช่วง เวลา 06.00-09.00 นาฬิกา และ 12.00-15.00 นาฬิกา หรือ ฟิเอเอช_[06.00-09.00 นาฬิกา] / ฟิเอเอช_[12.00-15.00 นาฬิกา] สูงมากกว่า 1 เป็นที่น่ายินดีได้ว่า ระดับความเข้มข้นของ ฟิเอเอช ที่มีวงแหวนมากกว่า 4 วงขึ้นไป จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงเวลาที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าสูงสุดหรือช่วงเวลา 13.00 นาฬิกา ซึ่งถูกจัดอยู่ในช่วง เวลา 12.00-15.00 นาฬิกา (ดังรูปที่ 7-8) สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแสงที่มีต่อการย่อยสลายของกลุ่มฟิเอเอช ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากในมวลอากาศชั้นกลาง



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในรอบวันเฉลี่ย ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณพื้นที่ศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลางของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลางของแต่ละช่วงเวลา ณ สถานีเชียงใหม่

ผลวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณแบบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในชั้นล่างและชั้นกลาง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้นตรง (R) ระหว่าง ฟีเอเอช_{ชั้นล่าง} กับ ฟีเอเอช_{ชั้นกลาง} มีค่าค่อนข้างสูง (ตารางที่ 7) เนื่องจาก Phe และ An จัดอยู่ในกลุ่ม ฟีเอเอช ที่สามารถคงอยู่ได้ทั้งในวัฏภาคก๊าซและอนุภาค ดังนั้น ความดันไอของ Phe และ An จึงมีค่าสูงกว่า กลุ่ม ฟีเอเอช ที่มีจำนวนวงแหวนเบนซิน 4 วงขึ้นไปส่งผลให้ค่า R แตกต่างจาก ฟีเอเอช ชนิดอื่น การที่ค่า R ของ Fluo, Pyr, 11H-B[a]F, 11H-B[b]F, B[a]A และ Chry มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ ฟีเอเอช ทั้ง 6 ชนิด มีทิศทางเดียวกันสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบจากการลอยตัวของไอเสียยานพาหนะจากชั้นล่างต่อระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลางเนื่องจาก ฟีเอเอช ทั้ง 6 ชนิด เป็นดัชนีของการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ในเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซิน (Lim et al., 1999; Vasconcellos et al., 2003) นอกจากนี้การที่ระดับความ

เข้มข้นของ ฟีเอเอช ทั้ง 6 ชนิด ในมวลอากาศชั้นล่างแปรผันกับมวลอากาศชั้นกลางอย่างมีนัยสำคัญน่าจะแสดงถึงแหล่งกำเนิดของไอเสียจากยานพาหนะซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ t -test กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของ ฟีเอเอช 15 ชนิดในมวลอากาศชั้นล่างและชั้นกลางไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระดับความเชื่อมั่น 99.5 เปอร์เซนต์ ซึ่งหมายถึง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ฟีเอเอช ในมวลอากาศชั้นกลางถูกควบคุมด้วยกลไกเดียวกันกับมวลอากาศชั้นล่าง นั่นคือ การปลดปล่อยของไอเสียจากยานพาหนะ อย่างไรก็ตาม การที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้นตรงของ B[a]P, Ind และ B[a,h,i]P ในมวลอากาศชั้นกลางและชั้นล่าง มีค่าน้อยกว่า 0.5 (ตารางที่ 7) แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่อาจได้รับจากเขม่าควันของการเผาไหม้เพื่อการเกษตรรอบตัวเมืองเชียงใหม่ เนื่องจาก ฟีเอเอช ทั้ง 4 ชนิด เป็นองค์ประกอบสำคัญของ ฟีเอเอช ในกลุ่มควันที่เกิดจากการเผาชีวมวล (Mandalakis et al., 2005)

ตารางที่ 7 ผลวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงเส้นตรงโดยใช้การคำนวณแบบ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างระดับความเข้มข้นของ ฟีเอเอช ในชั้นล่างและชั้นกลาง

		Phe ชั้นบน	An ชั้นบน	Fluo ชั้นบน	Pyr ชั้นบน	11H- B[a]F ชั้นบน	11H- B[b]F ชั้นบน	B[a]A ชั้นบน	Chry ชั้นบน	B[b]F ชั้นบน	B[k]F ชั้นบน	B[e]P ชั้นบน	B[a]P ชั้นบน	Ind ชั้นบน	B[a,h,i]P ชั้นบน
Phe	ชั้นล่าง	-0.052	-0.132	0.069	-0.267	-0.044	0.051	-0.078	0.025	0.139	0.000	0.034	0.007	0.041	0.124
An	ชั้นล่าง	0.129	-0.464	0.426	0.506	0.013	0.428	0.095	0.377	0.102	-0.106	-0.227	-0.047	0.085	-0.076
Fluo	ชั้นล่าง	0.221	0.240	0.604	0.163	0.422	0.513	0.487	0.354	0.782	0.585	0.762	0.722	0.716	0.839
Pyr	ชั้นล่าง	0.160	0.263	0.591	0.170	0.396	0.529	0.368	0.368	0.798	0.482	0.667	0.628	0.635	0.789
11H-B[a]F	ชั้นล่าง	0.146	0.181	0.507	0.175	0.380	0.462	0.368	0.385	0.800	0.500	0.663	0.636	0.669	0.779
11H-B[b]F	ชั้นล่าง	0.156	0.233	0.568	0.241	0.430	0.526	0.375	0.404	0.809	0.505	0.660	0.661	0.665	0.784
B[a]A	ชั้นล่าง	0.210	0.228	0.589	0.243	0.538	0.540	0.503	0.466	0.847	0.623	0.778	0.755	0.801	0.887
Chry	ชั้นล่าง	0.257	0.227	0.468	0.088	0.465	0.407	0.508	0.467	0.836	0.606	0.802	0.707	0.801	0.881
B[b]F	ชั้นล่าง	0.304	0.099	0.434	0.122	0.492	0.384	0.496	0.517	0.742	0.359	0.658	0.437	0.685	0.780
B[k]F	ชั้นล่าง	0.244	0.194	0.463	0.150	0.530	0.505	0.379	0.650	0.826	0.270	0.570	0.367	0.621	0.757
B[e]P	ชั้นล่าง	0.242	0.095	0.418	0.142	0.467	0.390	0.347	0.556	0.829	0.279	0.588	0.370	0.650	0.776
B[a]P	ชั้นล่าง	0.225	0.172	0.528	0.251	0.571	0.541	0.367	0.607	0.839	0.265	0.564	0.390	0.626	0.776
Ind	ชั้นล่าง	0.254	0.158	0.395	0.183	0.539	0.400	0.260	0.600	0.800	0.223	0.522	0.283	0.602	0.737
B[a,h,i]P	ชั้นล่าง	0.366	0.061	0.260	0.064	0.478	0.169	0.305	0.486	0.550	0.284	0.460	0.243	0.598	0.599

3. ขั้นตอน

ผลวิเคราะห์ที่ได้ จากการคำนวณแบบ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ระหว่างระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในชั้นล่างและชั้นบน พบว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ระหว่าง พีเอเอช_{ชั้นล่าง} กับ พีเอเอช_{ชั้นบน} มีค่าระหว่าง -0.052 - 0.742 (ตารางที่ 8) จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า R ของ Phe และ An ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม พีเอเอช ที่สามารถคงอยู่ได้

ทั้งในวัฏภาคก๊าซและอนุภาค มีค่า R ที่ติดลบซึ่งแตกต่างจาก พีเอเอช ชนิดอื่น โดยสิ้นเชิงคล้ายกับสิ่งที่เกิดขึ้นในมวลอากาศชั้นกลาง ลักษณะเฉพาะอีกประการ คือ ค่า R ของ พีเอเอช เกือบทุกชนิดมีแนวโน้มลดลงสะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบจากการเจือจาง โดยมวลอากาศบริสุทธิ์ ที่บริเวณชั้นบน สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามระดับ ความสูง

ตารางที่ 9 อัตราส่วนของ พีเอเอช (Binary Ratio) ใน PM₁₀ ที่เชียงใหม่ทั้ง 3 ระดับชั้น

อัตราส่วนของ พีเอเอช	เอกสารอ้างอิง	อากาศในเมือง อุตสาหกรรม	การสันดาปของ น้ำมันปิโตรเลียม	การสันดาปของ น้ำมันดีเซล	แหล่งกำเนิด การสันดาปของ เชื้อเพลิงฟอสซิล	การเผาไหม้ของ ชีวมวล	เชียงใหม่		
							ชั้นล่าง AVER	ชั้นกลาง AVER	ชั้นบน AVER
Fluo/(Fluo+Pyr)	Okuda et al., 2002 Yunker & Macdonald, 2003 Pongpiachan, 2007	0.50	< 0.40		0.40 ⁰ 0.50	> 0.50	0.82	0.57	0.71
B[e]P/(B[e]P+B[a]P)	Simcik et al., 1998			0.40.5			0.52	0.52	0.42
Ph/(Ph + An)	Kalaitzoglou et al., 2004 Manoli et al., 2004	0.50 ⁰ 0.80			0.84	0.89	0.82	0.57	0.71
B[a]A/Chry	Manoli et al., 2004				0.89	0.72	0.78	0.85	1.49
Ind/(Ind + B[g,h,i]P)	Okuda et al., 2002 Yunker & Macdonald, 2003		< 0.20		0.20 ⁰ 0.50	> 0.50	0.61	0.56	0.45

AVER: ค่าเฉลี่ย, N.D.: Not Detected

Phe: Phenanthrene, An: Anthracene, Fluo: Fluoranthene, Pyr: Pyrene, B[a]A: Benzo[a]anthracene, Chry: Chrysene, B[e]P: Benzo[e]pyrene, B[a]P: Benzo[a]pyrene, Ind: Indeno[1,2,3-cd]perylene,

B[g,h,i]P: Benzo[g,h,i]perylene

สรุปผลการศึกษา

ผลวิเคราะห์ระดับความเข้มข้น พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ระหว่างวันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 บริเวณตลาดฟ้า โรงแรมดิอิมพีเรียลแม่ปิง และโรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน พบว่า

1. ในมวลอากาศชั้นล่าง พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าระหว่าง 0.005-4.579 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.387 ∇ 5.309 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.524 ∇ 0.469 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P=0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนดโดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 2.10 เท่า

2. ในมวลอากาศชั้นกลาง พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าระหว่าง ND-3.453 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.588 ∇ 5.690 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.553 ∇ 0.589 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P = 0.25 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนดโดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 2.21 เท่า

3. ในมวลอากาศชั้นบน พีเอเอช ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร มีค่าระหว่าง ND-4.673 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำผลรวมของ พีเอเอช 15 ชนิด ในระยะเวลา 3 วัน มาเฉลี่ยพบว่า มีค่าอยู่ที่ 6.764 ∇ 6.665 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยระดับความเข้มข้นของ B[a]P ซึ่งเป็น พีเอเอช ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.935 ∇ 1.155 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานสากล (B[a]P=0.25 นาโนกรัมต่อ

ลูกบาศก์เมตร) ที่ถูกกำหนดโดย UK-EPAQS (United Kingdom-Expert Panel on Air Quality Standard) ถึง 3.74 เท่า

4. อัตราส่วนของ พีเอเอช ที่พบมากที่สุด อันดับแรก ในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร ในมวลอากาศทั้ง 3 ระดับชั้น ได้แก่ ชั้นล่าง: Ind (18.7%)>B[b]F (15.4%)>B[g,h,i]P (12.2%)>B[e]P (8.81%)>B[a]P (8.20%)

ชั้นกลาง: Ind (17.4%)>B[b]F (17.1%)>B[g,h,i]P (13.8%)>B[e]P (9.26%)>B[a]P (8.39 %)

ชั้นบน: B[a]P (13.8%)>B[a]A (13.7%)>B[g,h,i]P (13.0%)>B[b]F (12.3%) > Ind (10.7 %)

จะสังเกตเห็นได้ว่า Ind, B[a]P, B[b]F และ B[a]A คือ กลุ่มพีเอเอช ที่พบมาก เป็นอันดับต้นในมวลอากาศของทั้ง 3 ระดับชั้น เป็นตัวแทนของกลุ่ม พีเอเอช ที่เกิดจากไอเสียยานพาหนะและการเผาไหม้ของชีวมวล

5. กลไกสำคัญในการลดระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในมวลอากาศของเชียงใหม่ ในช่วงที่ทำการเก็บตัวอย่างน่าจะเป็น "การเจือจาง" เนื่องจากการพัดพาของชั้นบรรยากาศ และ/หรือ "การย่อยสลายโดยแสง" มากกว่า "การตกลงโดยแรงโน้มถ่วงของโลก" และ/หรือ "การชะล้างโดยน้ำฝน "

6. สาเหตุที่ทำให้ระดับความเข้มข้นของ พีเอเอช ในช่วงเวลา 00.00-03.00 นาฬิกา สูงขึ้นน่าจะมาจากการลดระดับของความสูงผสม เนื่องจาก การกีดตัวของมวลอากาศเย็น มากกว่าการไหลย้อนกลับของมวลอากาศ จากตอยสุเทพในรูปแบบของ "ลมภูเขา" เพราะในช่วงเวลาดังกล่าวระดับความเร็วลมมีแนวโน้มที่ลดลง

7. PAHs มาจากแหล่งไอเสียรถยนต์เนื่องจากจุดเก็บตัวอย่างระดับล่างและระดับกลางมีระดับความเข้มข้นของ PAHs จากท่อไอเสียรถยนต์เหมือนกัน

8. นอกจากอิทธิพลของไอเสียรถยนต์แล้วระดับความเข้มข้นของ PAHs ในชั้นบรรยากาศยังได้รับอิทธิพลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นปัญหาหมอกควันเป็นประจำทุกปีของเมืองเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาลักษณะของชั้นบรรยากาศและผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของมลสารทางอากาศสำหรับประเทศไทย (Characteristic of Atmospheric Profile and its Effects on variation of air pollution in Thailand: CAPE) ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ. ดร. ขาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ ในการวิเคราะห์ไอ้ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ นางสาวสุพร มณฑาสวรรณ นางสาวจิราภรณ์ ทิพคุณ และ นางสาวอิตา อินทเสน สำหรับความทุ่มเทในการสกัดและวิเคราะห์สาร พีเอเอช

เอกสารอ้างอิง

Bignal, K. L., Langridge, S., & Zhou, J. L. (2008). Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions. *Atmospheric Environment*, 42, 8863–8871.

Chen, J. C., Huang, J. S., Chen, C. M., & Guo, J. S. (2008). Emission characteristics of PAH, benzene and phenol group hydrocarbons in O2/RFG waste incineration processes. *Fuel*, 87, 2787–2797.

Ding, X., Wang, X. M., Xie, Z. Q., Xiang, C. H., Mai, B. X., Sun, L. G., et al. (2007). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons observed over the North Pacific Ocean and the Arctic area: Spatial distribution and source identification. *Atmospheric Environment*, 41, 2061–2072.

Esen, F., Cindoruk, S. S., & Tasdemir, Y. (2008). Bulk deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in an industrial site of Turkey. *Environmental Pollution*, 152, 461–467.

Esen, F., Tasdemir, Y., & Vardar, N. (2008). Atmospheric concentrations of PAH, their possible sources and gas-to-particle partitioning at a residential site of Bursa, Turkey. *Atmospheric Research*, 88, 243–255.

Geptner, A. R., Richter, B., Piskovskii, Y. I., Chernyansky, S. S., & Alexeeva, T. A. (2006). Polycyclic aromatic hydrocarbons as evidence of hydrocarbon migration in marine and lagoon sediments of a recent rift zone, Iceland. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 66, 213–225.

Healy, J., Bradley, S. D., Northage, C., & Scobbie, E. (2001). Inhalation exposure in secondary aluminium smelting. *The Annals of occupational hygiene*, 45, 217–225.

Kalaitzoglou, M., Terzi, E., & Samara, C. (2004). Patterns and sources of particle-phase aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and rural sites of western Greece.

Atmospheric Environment, 38, 2545–2560.

Kim, E. J., Oh, J. E., & Chang, Y. S. (2003). Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAH in soil. *Science of The Total Environment*, 311, 177–189.

Lim, H. L., Harrison, M. R., & Harrad, S. (1999). The contribution of traffic to atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Technology*, 33, 3538–3542.

Liu, Y., Tao, S., Yang, Y., Dou, H., Yang, Y., & Coveney, R. M. (2007). Inhalation exposure of traffic police officers to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) during the winter in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 383, 98–105.

Mandalakis, M., Gustafsson, Ö., Alsberg, T., Egeback, A. L., Reddy, C. M., Xu, L., et al. (2005). Contribution of biomass burning to atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons at three European Background Sites. *Environmental Science and Technology*, 39, 2976–2982.

Mensah, K. B. O., Battershill, J., Boobis, A., & Fielder, R. (2005). An approach to investigating the importance of high potency polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the induction of lung cancer by air pollution. *Food Chemistry and Toxicology*, 43, 1103–1116.

Saarnio, K., Sillanpää, M., Hillamo, R., Sandell, E., Pennanen, A. S., & Salonen, R. O. (2008). Polycyclic aromatic hydrocarbons in size-segregated particulate matter from six urban sites in Europe. *Atmospheric Environment*, 42, 9087–9097.

Sathikunarat, S., Wongwises, P., Pan-Aram, R., & Zhang, M. (2008). Numerical simulation of terrain-induced mesoscale circulation in the Chiang Mai area, Thailand. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 113–121.

Scheyer, A., Morville, S., Mirabel, P., & Millet, M. (2008). Gas/particle partitioning of lindane and current-used pesticides and their relationship with temperature in urban and rural air in Alsace region (east of France). *Atmospheric Environment*, 42, 7695–7705.

Sullivan, R., & Greeley, R. (1993). Comparison of aerodynamic roughness measured in a field experiment and in a wind tunnel simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 48, 25–50.

Vasconcellos, P. C., Zacarias, D., Pires, M. A. F., Pool, C. S., & Carvalho, L. R. F. (2003). Measurements of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particles from the metropolitan area of Sao Paulo City, Brazil. *Atmospheric Environment*, 37, 3009–3018.

Yunker, B. M., & Macdonald, W. R. (2003). Petroleum biomarker sources in suspended particulate matter and sediments from the Fraser River Basin and Strait of Georgia, Canada. *Organic Geochemistry*, 34, 1525–1541.