หัวข้อดุษฎีนิพนธ์	การปล่อยพีเอ็ม 2.5 พอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และก๊าซมลพิษจากการเผาธูป
ผู้เขียน	นายศุษิระ บุตรดี
ปริญญา	วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
คณะกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร จันทระ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร. ทิพวรรณ ประภามณฑล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.อุไร เต็งเจริญกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญา มังกรอัศวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

การจุดธูปเพื่อการกราบไหว้บูชา ถือเป็นธรรมปฏิบัติในประเทศแถบเอเชีย ซึ่งจัดเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการเกิดมลพิษทางอากาศภายในอาคาร การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) หาปริมาณของสารมลพิษที่ปล่อยมาจากการจุดธูป ทั้งในรูปของอนุภาคฝุ่นและก๊าซ 2) หารายละเอียดของสารมลพิษและค่าแฟคเตอร์การปล่อยสารมลพิษ จากการจุดธูปแต่ละประเภท 3) ตรวจวัดสารมลพิษอากาศ ที่ปล่อยจากการจุดธูปในศาลเจ้า ในการศึกษาใช้ธูปหลายชนิด และวัตถุดิบในการผลิตธูป ได้แก่ ขี้เลื่อย ผงจันทน์ขาว ผงเปลือกไม้มียาง ผงไม้ไผ่บด และผงสีย้อม สำหรับทำการทดลองเผาในตู้จำลองการเผา ทำการเก็บตัวอย่างอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (พีเอ็ม 2.5) บนกระดาษกรองชนิดควอทซ์ ด้วยเครื่องเก็บอากาศแบบปริมาตรต่ำและวิเคราะห์หาปริมาณสารพอลิไซคลิคอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (พีเอเอช) 16 ตัว ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรมิเตอร์ ตรวจวัดหาปริมาณก๊าซ (คาร์บอนมอนอกไซด์ ไนโตรเจนมอนอกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์) ด้วยเครื่องตรวจวัดก๊าซ พบว่าค่าแฟคเตอร์การปล่อยของฝุ่นพีเอ็ม 2.5 จากการจุดธูปแต่ละชนิดในเตาเผา เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ ธูปหอมแบบก้อน (20.8±3.6 ถึง 30.0±4.7 กรัมต่อกิโลกรัม) > ธูปดั้งเดิมแบบก้าน (5.0±0.2 ถึง 17.9±0.9 กรัมต่อกิโลกรัม) > ธูปหอมแบบก้าน (3.4±0.2 ถึง 13.0±0.5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

กรัมต่อกิโลกรัม) ทั้งนี้ธูปไร้ควันซึ่งอยู่ในกลุ่มธูปหอมแบบก้านให้ค่าแฟคเตอร์การปล่อยของฝุ่นพีเอ็ม 2.5 น้อยที่สุด ส่วนค่าแฟคเตอร์การปล่อยของสารพีเอเอชจากการจุดธูป เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ธูปดั้งเดิมแบบก้าน (1.14±0.36 ถึง 4.04±0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) > ธูปหอมแบบก้อน (3.56±0.21 ถึง 3.60±0.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) > ธูปหอมแบบก้าน (1.42±0.05 ถึง 2.72±0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากรูปแบบการปล่อยสารพีเอเอชจากการจุดธูปเจอองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีวงแหวน 4 ถึง 5 วง โดยพบ ฟลูโอเรนทีน ไพรีน เบนโซ(เอ)ไพรีน เบนโซ(เอ)แอนทราซีน และไคซีน อัตราการปล่อยฝุ่นพีเอ็ม 2.5 (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง) และ สารพีเอเอชที่ตรึงอยู่กับฝุ่นพีเอ็ม 2.5 (ไมโครกรัมต่อชั่วโมง) จากการจุดธูปเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ธูปหอมแบบก้อน > ธูปหอมแบบก้าน > ธูปดั้งเดิมแบบก้าน นอกจากนี้ธูปที่ผลิตจากเปลือกลำไย และธูปหอมไร้ควัน มีค่าอัตราการปล่อยที่ต่ำ ขณะที่ธูปหอมแบบก้อน มีค่าอัตราการปล่อยที่สูง

การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์จากการได้รับสารพีเอเอช แสดงได้จากค่าสมมูลความเป็นพิษ (ทีอีคิว) และค่าสมมูลการเบี่ยงเบนพันธุกรรม (เอ็มอีคิว) เมื่อนำค่าแฟคเตอร์การปล่อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ของพีเอเอชมาคำนวณค่าสมมูลความเป็นพิษและค่าสมมูลการเบี่ยงเบนพันธุกรรม พบว่าธูปที่ผลิตจากดอกไม้แห้ง และ ธูปหอมแบบก้อน มีค่าสมมูลความเป็นพิษและค่าสมมูลการเบี่ยงเบนพันธุกรรมที่สูง ขณะที่ธูปดั้งเดิมแบบก้าน ธูปที่ผลิตจากเปลือกลำไย และธูปหอมไร้ควัน มีค่าทั้งสองต่ำ นอกจากนี้ ค่าสมมูลความเป็นพิษและค่าสมมูลการเบี่ยงเบนพันธุกรรมที่คำนวณได้จากค่าอัตราการปล่อย (ไมโครกรัมต่อชั่วโมง) จากการจุดธูปที่ผลิตจากเปลือกลำไย และธูปหอมไร้ควันให้ค่าทั้งสองแบบต่ำ ขณะที่ธูปหอมแบบก้อนให้ค่าทั้งสองสูง จึงสรุปได้ว่า การจุดธูปหอมแบบก้อน เป็นการเพิ่มปริมาณการปล่อยสารพีเอเอชที่ก่อมะเร็ง ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์

ค่าแฟคเตอร์การปล่อยของฝุ่นพีเอ็ม 2.5 จากการเผาวัตถุดิบในการผลิตธูป เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ ผงจันทน์ขาว (44.7±3.2 กรัมต่อกิโลกรัม) > ขี้เลื่อย (31.5±2.2 กรัมต่อกิโลกรัม) > ผงเปลือกไม้มียาง (24.7±0.9 กรัมต่อกิโลกรัม) > ไม้ไผ่บด (13.9±2.2 กรัมต่อกิโลกรัม) > ผงสีย้อม (2.0±0.5 กรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนค่าแฟคเตอร์การปล่อยของสารพีเอเอชจากการเผาขี้เลื่อย (1.44±0.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และจันทน์ขาว (1.46±0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงเมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่เหลือ โดยวัตถุดิบทั้งสองชนิดดังกล่าวเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในการผลิตธูปในประเทศไทย ในส่วนของก๊าซ พบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซหลักที่ปล่อยมาจากการจุดธูปทุกชนิดและการเผาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตธูป ตามมาด้วยก๊าซไนตริกออกไซด์

การติดตามตรวจสอบสารมลพิษจากการจุดธูปในพื้นที่จริง ทำโดยเลือกศาลเจ้า 2 แห่งในเมืองเชียงใหม่เป็นที่เก็บตัวอย่าง ทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นพีเอ็ม 2.5 ภายในอาคารศาลเจ้าเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (8.00-17.00 น.) และ 24 ชั่วโมง บนกระดาษกรองแบบเทฟลอน โดยใช้เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศแบบปริมาตรต่ำ เพื่อหาปริมาณสารพีเอเอช ทำการเก็บก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ทั้งในและนอกอาคาร

ด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแบบแพสซิฟ ทำการเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษที่เก็บในช่วงเทศกาล (ตรุษจีน และเทศกาลอื่นๆ) และช่วงเวลาปกติ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นพีเอ็ม 2.5 ทั้งสองศาลเจ้า สูงที่สุดในช่วงเทศกาลตรุษจีน (524±110 and 625±147 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (8 ชม.) และ 317±109 และ 406±159 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (24 ชม.)) ซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับจำนวนผู้เข้าสักการะและปริมาณการจุดธูป ($p<0.05$) ส่วนปริมาณความเข้มข้นของสารพีเอเอช (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) พบสูงที่สุดในช่วงเทศกาลตรุษจีนเช่นกัน ทั้งที่ศาลเจ้าที่ 1 (168±60 (8 ชม.) และ 102±26 (24ชม.)) และศาลเจ้าที่ 2 (90±41 (8 ชม.) และ 45±29 (24 ชม.)) ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ในช่วงเทศกาลมีค่าสูงกว่าช่วงปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *($p<0.05$)* อย่างไรก็ตามไม่พบความแตกต่างระหว่างค่าตรวจวัดที่บริเวณภายในและภายนอกของศาลเจ้า พบว่าในทุกช่วงเทศกาล ความเข้มข้นของฝุ่นพีเอ็ม 2.5 และสารพีเอเอช มีความสัมพันธ์กันสูง (r = 0.658 - 0.843) และยังพบความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่นพีเอ็ม 2.5 และสารพีเอเอชที่ก่อมะเร็ง (r = 0.451-0.802) แสดงให้เห็นว่าสารพีเอเอชที่ก่อมะเร็งเป็นองค์ประกอบหลักของสารพีเอเอชในฝุ่น ที่ปล่อยมาจากการจุดธูป พบค่าสมมูลความเป็นพิษ (ทีอีคิว) สูงในช่วงเทศกาลตรุษจีน (31-32 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (8 ชม.) และ10-20 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (24 ชม.)) ซึ่งบ่งชี้ชัดว่าในช่วงเทศกาลมีปริมาณสารมลพิษทางอากาศสูงกว่าในช่วงปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าจำนวนธูปที่จุดมีผลต่อปริมาณการปล่อยสารมลพิษ และส่งผลต่อระดับความรุนแรงของมลพิษอากาศและความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์ นอกจากนี้ ค่าอัตราส่วนของสารพีเอเอชบางตัวซึ่งใช้วิเคราะห์แหล่งกำเนิดของมลพิษ ยังชี้ว่าฝุ่นพีเอ็ม 2.5 และสารพีเอเอชที่ตรึงกับฝุ่นพีเอ็ม 2.5 ถูกปล่อยมาจากการจุดธูป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Dissertation Title	Emissions of $PM_{2.5}$, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Pollutant Gases from Incense Burning	
Author	Mr. Susira Bootdee	
Degree	Doctor of Philosophy (Environmental Science)	
Advisory Committee	Asst. Prof. Dr. Somporn Chantara	Advisor
	Dr. Tippawan Prapamontol	Co-advisor
	Dr. Urai Tengjaroenkul	Co-advisor
	Asst. Prof. Dr. Pitchaya Mungkornasawakul	Co-advisor

ABSTRACT

Incense burning has been a common practice in Asian countries, which is found to be one of major indoor air pollution sources. This study aims to 1) determine air pollutants both in forms of particulates and gases emitted from incense burning 2) investigate pollutant profiles and emission factors (EFs) of pollutants from burning of different incense types and 3) measure air pollutants emitted from incense burning in the selected shrines. Various types of incenses and their ingredients including sawdust, wood powder (Chan Kao), plant-based glutinous powder, ground bamboo and dye powder were chosen to perform the burning experiment in the constructed chamber. Samples of particulate matter with diameters less than 2.5 μm ($PM_{2.5}$) emitted from incense burning were collected on quartz filters contained in a mini-volume air sampler and analyzed for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by GC-MS. Concentrations of gases (CO, NO and SO_2) were continuously measured using a gas analyzer. It was found that the EFs values of $PM_{2.5}$ from burning of different types of incenses in a descending order were aromatic incense cones (20.8±3.6 to 30.0±4.7 g/kg) > traditional incense sticks (5.0±0.2 to 17.9±0.9 g/kg) > aromatic incense sticks (3.4±0.2 to 13.0±0.5 g/kg). The smoke-free incense stick (H) belonged to the group of aromatic incense

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

sticks emitted the lowest amount of $PM_{2.5}$. The EFs of total 16-PAHs (t-PAHs) released from incense burning in descending order were tradition incense sticks (1.14±0.36 to 4.04±0.05 mg/kg) > aromatic incense cones (3.56±0.21 to 3.60±0.49 mg/kg) > aromatic incense sticks (1.42±0.05 to 2.72±0.02 mg/kg). Four and five rings PAHs were found to be major constituents of $PM_{2.5}$. Dominant species of PAHs generated from incense burning were FLA, PYR, BaP, BaA and CHR. The values of emission rates (ERs) of $PM_{2.5}$ (mg/hr) and $PM_{2.5}$-bound PAHs (µg/hr) from incense burning in a descending order were aromatic incense cones > aromatic incense sticks > traditional incense sticks. Longan peel based incense and smoke-free incense presented low values of ERs, while aromatic incense cone showed relatively higher values.

Toxicity equivalent (TEQ) and mutagenic equivalent (MEQ) concentrations were calculated to indicate human health risk from PAHs inhalation. Based on EFs values (mg/kg), TEQ and MEQ were calculated. It was found that dried-flower based incenses and aromatic incense cones showed high TEQ and MEQ values, while traditional incense stick, longan peel based incense and smoke-free incense presented low concentrations. Apart from that, TEQ and MEQ were also calculated based on ERs values (µg/hr). It was found that longan peel based incense and smoke-free incense presented low TEQ and MEQ values, while aromatic incense cones showed high values. It can be concluded that burning of aromatic incense cone could induce high emission of c-PAHs, which adversely affects human health.

In the case of raw materials for incense production, EFs values of $PM_{2.5}$ emitted from the burning in a descending order were wood powders (44.7±3.2 g/kg) > sawdust (31.5±2.2 g/kg) > plant-based glutinous powders (24.7±0.9 g/kg) > ground bamboo (13.9±2.2 g/kg) > dye powders (2.0±0.5 g/kg). The EFs of t-PAHs values from sawdust (1.44±0.09 mg/kg) and wood powder (1.46±0.19 mg/kg) were relatively high in comparison with the rest. It should be noted that they are major ingredients used for incense production in Thailand. In terms of gas emission, CO was the major gas emitted from all types of incense and raw material burning followed by NO.

In order to monitor toxic pollutants emitted from incense burning in the real environment, two shrines in Chiang Mai City were selected. $PM_{2.5}$ samples were collected inside the shrines for 8 hrs (8 am – 4 pm) and 24 hrs on Teflon filters packed in the mini volume air samplers prior to PAHs analysis, while indoor and outdoor NO_2

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

were collected by tube type passive samplers. The study was conducted to compare the pollutant values obtained during special occasions (Chinese New Year and other special occasions) and normal period. The highest average $PM_{2.5}$ concentrations were found during the Chinese New Year at both shrines (524±110 and 625±147 μg/m^3 (8 hrs) and 317±109 and 406±159 μg/m^3 (24 hrs)). Their concentrations were significantly different between occasions due to the number of visitors and amounts of incense being burned (*p>0.05*). The highest total PAHs concentrations for 8 and 24 hours were also found during the Chinese New Year at shrine 1 (168±60 and 90±41 ng/m^3) and shrine 2 (102±26 and 45±29 ng/m^3). The NO_2 concentrations on the special occasions were significantly higher than the values measured during the normal period (*p<0.05*). However, no significant difference of indoors and outdoors was found. Concentrations of NO_2 and $PM_{2.5}$ were well correlated (r = 0.658 - 0.843) in all occasions. Correlations between concentrations of $PM_{2.5}$ and total PAHs as well as carcinogenic PAHs were relatively strong at both sampling sites. In addition, $PM_{2.5}$ concentrations were highly correlated (r = 0.451-0.802) with c-PAHs indicated that carcinogenic compounds were dominant in particulate PAHs and generated from incense burning. TEQ values were also relatively high during the Chinese New Year (31-32 ng/m^3 (8 hrs) and 10-20 ng/m^3 (24 hrs)). It was clearly seen that levels of pollutants were significantly higher on special occasions than during the normal periods. Therefore, it can be concluded that the amount of incense being burned plays a significant role in the amount of emitted pollutants and degrees of air pollution and human health risk. Moreover, isometric ratios of some PAHs revealed that the emission from incense burning was the main source of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$-bound PAHs.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved