บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) จำนวน 16 ชนิด ในควันธูปจำนวน 11 ชนิด และวัตถุดิบจำนวน 20 ชนิด โดยการสกัดด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน การกำจัดสิ่งรบกวน (Clean up) ออกจากสาร PAHs ด้วยการใช้คอลัมน์ซิลิกาเจล (Silica column) และตัวทำละลายผสมไดคลอโรมีเทน : เฮกเซน (40:60) และตรวจวัดด้วย GC-MS สามารถสรุปได้ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

1. วิธีการเก็บตัวอย่างฝุ่นและควันจากธูปและวัตถุดิบ

อุปกรณ์ชุดเก็บควันจากธูปและวัตถุดิบภายใต้กระบอกแก้ว เหมาะสมกว่าชุดเก็บควันจากธูปและวัตถุดิบภายใต้กรวยแก้ว เนื่องจากไม่มีควันสูญหายออกมาจากกระบอกแก้ว โดยการจุดธูปให้ติดแล้วนำเข้าไว้ภายในกระบอกแก้ว ส่วนวัตถุดิบใส่ในถ้วยครูซิเบิ้ล แล้วให้ความร้อนแก่ถ้วยจากเตาไฟฟ้า (hotplate) ที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดควันโดยมีอัตราเร็วในการดูดควันประมาณ 12 ลิตรต่อนาที

2. การทดสอบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์สาร PAHs ด้วยเครื่อง GC-MS การสกัด (Extraction) การกำจัดสิ่งรบกวน (Clean up) มีดังนี้

2.1 เครื่อง GC-MS สามารถตรวจวัดสาร PAHs 16 ชนิดและสารมาตรฐานภายใน 2 ชนิด โดยมีลำดับสารที่ถูกชะออกจากคอลัมน์ คือ Nap, Acy, Ace, Ace-d10, Flu, Phen, Anth, Flt, Pyr, p-Ther-d14, BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, Ind, DBahA และ BghiP สารมาตรฐาน PAHs ที่ความเข้มข้น0.005 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร หรือมีปริมาณสารเท่ากับ 5 พิโคกรัม ให้ค่า signal to noise (S/N) ตั้งแต่ 3 ถึง 53 และมีช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานแบบ internal standard plot method ที่ 0.005- 2 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Correlation of determination, R^2) มากกว่า 0.99 โดยให้สาร Acenaphthene-d10 เป็นสารมาตรฐานภายในแก่สาร Nap, Acy, Ace, Flu, Phen, Anth, Flt และ Pyr และให้สาร p-Therphenyl-d14 เป็นสารมาตรฐานภายในแก่สาร BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, Ind, DBahA และ BghiP

2.2 ประสิทธิภาพของวิธีการสกัดสาร PAHs 16 ชนิด ใน PTFE filter membrane และ XAD-2 resin ด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน ที่ปริมาณ 0.05 ไมโครกรัม มีค่า S/N มากกว่า 3 และ

มีค่าเปอร์เซ็นต์คืนกลับ (% recovery) ที่ระดับปริมาณสาร 2.5 และ 3.75 ไมโครกรัม ใน PTFE filter membrane มากกว่า 81.76 และ 106.09 เปอร์เซ็นต์ และใน XAD-2 resin มากกว่า 68.28 และ 80.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.3 ประสิทธิภาพของการกำจัดสิ่งรบกวนสาร PAHs ในคอลัมน์ซิลิกาเจล โดยใช้ตัวทำละลายผสมไดคลอโรมีเทน : เฮกเซน (40:60) ที่ระดับความเข้มข้น 0.25, 2.0 และ 4.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าเปอร์เซ็นต์คืนกลับ มากกว่า 70.89, 70.61 และ 64.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสาร PAHs ในควันธูปและวัตถุดิบ

3.1 ลักษณะของตัวอย่างธูปและวัตถุดิบที่มีการเผาไหม้ พบว่า ลักษณะของควันที่เกิดขึ้นมีทั้งสีขาว เหลืองอ่อน น้ำตาลอ่อน เถ้าของตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้แล้วส่วนใหญ่มีสีเทา อนุภาคฝุ่นที่ดักเก็บได้ใน PTFE membrane filter ขนาด 0.2 ไมครอน มีสีเหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม ยกเว้นตัวอย่างน้ำมันหอมระเหยทั้ง 2 ชนิด คือ กลิ่นจำปีและกลิ่นกุหลาบที่มีลักษณะเป็นคราบน้ำมันอยู่บน PTFE filter membrane ควันของทุกตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากการเผาได้ผ่านเข้าไปใน sorbent tube ทำให้ใยแก้วและ XAD-2 resin ในส่วนต้นของ tube มีสีเหลืองอ่อนจาง ๆ จนถึงสีคล้ำ ระยะเวลาที่ตัวอย่างเริ่มมีควันจนถึงควันหมด และปริมาณน้ำหนักของอนุภาคฝุ่น มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ชนิดขนาดและรูปแบบของตัวอย่าง โดยนำน้ำหนักตัวอย่างในส่วนที่ถูกเผาใช้สำหรับการคำนวณปริมาณสาร PAHs ที่มีในตัวอย่าง

3.2 ชนิดและปริมาณของสาร PAHs เมื่อทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสาร PAHs ในตัวอย่างที่ผ่านการสกัดและการกำจัดสิ่งรบกวนแล้วเทียบกับสารละลายมาตรฐาน PAHs 16 ชนิด ด้วย GC-MS พบว่า ทั้ง PTFE filter membrane, XAD-2 resin และจากการชะอุปกรณ์แก้วที่ใช้เก็บควันทุกตัวอย่างของทุกตัวอย่างธูปและวัตถุดิบที่ถูกเผาไหม้แล้ว สามารถตรวจพบสาร PAHs ในทุกตัวอย่างสกัด โดยพบว่า มีสาร PAHs เกาะอยู่ที่อนุภาคฝุ่นบน PTFE filter membrane และที่ด้านข้างในกระบอกแก้ว แต่ส่วนใหญ่จะพบน้อยกว่าใน XAD-2 resin ซึ่งแสดงว่า สาร PAHs ที่อยู่ในควันของตัวอย่างธูปและวัตถุดิบที่ถูกเผาไหม้แล้ว จะมีส่วนหนึ่งไปเกาะกับอนุภาคฝุ่นและบริเวณที่ควันสัมผัสอีกด้วย จากผลการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ดังนี้

3.2.1 ธูปที่มีการเผาไหม้แล้ว ทั้งประเภท (ก) คือ ธูปที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีควันน้อยหรือไร้ควัน และประเภท (ข) คือ ธูปที่ผลิตจากวัตถุดิบทั่วไปหรือไม่ได้ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พบสาร PAHs หลายชนิดทั้งในควันและฝุ่น และสาร PAHs ที่พบในปริมาณสูง คือ สาร Nap, Acy และสารที่ถูกจัดให้อยู่ใน Group 3 คือสารที่ไม่ก่อมะเร็งในคน คือ Phen, Flu, Anth, Ace, Pyr, Flt และ BghiP และพบว่าควันธูปทุกชนิดที่

ทำการศึกษา มีสาร BaP ที่เป็นสาร Group 1 คือสารที่ก่อมะเร็งในคน รวมทั้งมีสาร Group 2A คือ สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคนและหรือสาร Group 2B คือสารที่อาจก่อมะเร็งด้วย โดยมีลำดับของปริมาณสาร PAHs รวม ในควันธูปทั้ง 2 ประเภท จากมากไปหาน้อย ดังนี้

ธูปหอมกลิ่นกุหลาบ ธูปหอมกลิ่นแก่นจันทน์ ธูปไร้ควัน ธูปไหว้พระสีเหลือง กำยานรูปทองก้อน ธูปหอมกลิ่นจำปี ธูปไหว้พระกลิ่นจันทน์ ธูปไหว้พระสีครีมอ่อน ธูปหอมรูปโคนกลิ่นกุหลาบ ธูปกำยาน และธูปสมุนไพรไล่ยุง

จากข้อมูลที่เปรียบเทียบ พบว่า สาร PAHs รวม ในธูปหอมกลิ่นกุหลาบ ซึ่งเป็นธูปที่ระบุให้เป็นประเภท (ข) สูงกว่า ธูปหอมกลิ่นแก่นจันทน์และธูปไร้ควัน ที่ระบุเป็นธูปประเภท (ก) แต่ธูปสองชนิดนี้ พบสาร PAHs รวมสูงกว่า ธูปไหว้พระสีเหลือง ธูปหอมกลิ่นจำปี และธูปไหว้พระสีครีมอ่อน ที่ระบุเป็นธูปประเภท (ข) เช่นเดียวกับกำยานรูปทองก้อน ที่ระบุเป็นธูปประเภท (ก) พบสาร PAHs รวมสูงกว่าธูปหอมรูปกรวย ที่ระบุเป็นธูปประเภท (ข) แสดงว่า ธูปประเภท stick และกำยานที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีควันน้อยหรือไร้ควัน บางยี่ห้อนั้น มีสาร PAHs มากกว่า ธูปและกำยานที่ผลิตจากวัตถุดิบทั่วไปหรือไม่ได้ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

3.2.2 สาร PAHs ที่พบในตัวอย่างวัตถุดิบที่เผาไหม้แล้วจากวัตถุดิบตามภูมิปัญญาหรือจากธรรมชาติกับวัตถุดิบจากอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 3 ประเภท คือวัตถุดิบที่ช่วยให้เกิดการลุกไหม้ วัตถุที่ช่วยในการยึดติด และให้กลิ่นหอม มีดังนี้

พบว่าวัตถุดิบทั้ง 20 ชนิด มีสาร PAHs อย่างน้อย 1 ชนิด ที่เป็นสารที่ก่อมะเร็งในคน สารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน หรือสารที่อาจก่อมะเร็งในคน และพบว่าขี้เลื่อยไม้ยางพาราและจันขาวเป็นวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมที่ช่วยให้เกิดการลุกไหม้นั้น พบสาร PAHs ทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งพบสาร BaP และ DBahA ในขี้เลื่อยไม้ยางพาราสูงที่สุดจากวัตถุดิบทุกชนิดที่มีการทดสอบ โดยพบ BaP ปริมาณ 0.5715 ไมโครกรัมต่อกรัม และ DBahA ปริมาณ 1.9545 ไมโครกรัมต่อกรัม

ลำดับปริมาณสาร PAHs รวม ของวัตถุดิบจากมากไปหาน้อย คือ จันทน์เหลี่ยว ซังข้าวโพด ไม้จันทน์หอม ขี้เลื่อยไม้อัดบางนา น้ำมันหอมกลิ่นจำปี ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ชะลูด สะเดา ดอกมะลิ กำยานจันทน์ผสม ขี้เลื่อยไม้มะม่วง มะกรูด อบเชย ยางบงหรือโกวบั๊วะ ดอกกุหลาบ จันทน์พม่า จันขาว ตะไคร้ กาวอัลฟ่า และน้ำมันหอมกลิ่นกุหลาบ

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษา พบว่า

1. การเก็บตัวอย่างฝุ่นและควันจากธูปและวัตถุดิบ

จากการศึกษา วิธีการเก็บควันด้วยอุปกรณ์ชุดเก็บควันจากธูปและวัตถุดิบภายใต้กระบอกแก้ว เป็นชุดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสาร PAHs หรือสารอื่น ๆ เนื่องจากควันที่เกิดจากการเผาไหม้ ไม่ได้สูญหายไปในระหว่างการเก็บควัน แต่ชุดเก็บควันจากธูปและวัตถุดิบภายใต้กรวยแก้ว เหมาะสมในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ เนื่องจากควันที่เกิดจากการเผาไหม้มีการสูญหายไปในระหว่างการเก็บควัน (Tran, & Marriot. 2007 : 5758) แม้ว่ากรวยแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร แต่ยังไม่สามารถครอบคลุมควันที่เกิดขึ้นได้

เมื่อนำอุปกรณ์ชุดเก็บควันจากธูปและวัตถุดิบภายใต้กระบอกแก้ว มาใช้เก็บควันจากธูปและวัตถุดิบที่เป็นของแข็ง พบว่า มีอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก (particle matter, PM) อยู่บน PTFE filter membrane ขนาด 2.0 ไมครอน มีสีเหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม ควันของทุกตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากการเผาได้ผ่านเข้าไปใน sorbent tube ทำให้ใยแก้วและ XAD-2 resin ในส่วนต้นของ tube มีสีเหลืองอ่อนจาง ๆ จนถึงสีคล้ำ ยกเว้นตัวอย่างน้ำมันหอมที่มีลักษณะเป็นคราบน้ำมันอยู่บน PTFE filter membrane ที่เป็นลักษณะเช่นนี้ เนื่องจากน้ำมันหอมมีสารอินทรีย์ที่สามารถระเหยในอากาศได้ และสามารถระเหยได้มากขึ้นเมื่อได้รับความร้อน จึงทำให้บน PTFE filter membrane มีลักษณะเป็นคราบน้ำมัน สำหรับฝุ่นละอองบางส่วนที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 2.0 ไมครอน ไม่สามารถผ่านเข้าไปใน Filter ได้ ฝุ่นเหล่านั้น จึงลอยคลุ้งอยู่ในกระบอกแก้วเก็บควัน และไปติดกับผนังด้านในกระบอกแก้ว ดังนั้น เพื่อให้ผลการทดสอบสาร PAHs คลอบคลุมทั้งในส่วนที่อยู่ในสภาวะแก๊ส (G-PAHs) และที่ติดกับฝุ่น (S-PAHs) จึงได้ทำการชะด้านในกระบอกแก้วด้วยตัวทำละลาย (R-PAHs) แล้วนำไปทำการกำจัดสิ่งรบกวน และวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีทดสอบ

การตรวจวัดสารละลายมาตรฐานผสม PAHs 16 ชนิด โดยเทคนิค GC-MS เป็นการใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph, GC) ซึ่งมี Mass Spectrometer (MS) เป็นตัวตรวจวัด ใช้สาร Acenathene-d10 และ p-Terphenyl-d14 ซึ่งเป็นสาร isotopically labeled เติมลงไปเพื่อใช้เป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) โดยให้สาร Acenaphthene-d10 เป็นสารมาตรฐานภายในแก่สาร Nap, Acy, Ace, Flu, Phen, Anth, Flt และ Pyr และให้สาร p-Therphenyl-d14 เป็นสารมาตรฐานภายในแก่สาร BaA, Chr, BbF, BkF, BaP, Ind, DBahA และ BghiP เพื่อทำการวิเคราะห์มวลของสารของสาร PAHs ดังกล่าว เนื่องจากการใช้ isotopically labeled เป็นสาร

มาตรฐานภายใน สามารถชดเชยการสูญหายหรือการสลายตัวของสารที่สนใจที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้

การตรวจวัดหาปริมาณสาร PAHs 16 ชนิด ด้วย Internal standard plot method นี้ ยังพบว่า มีพีคของสาร 5 ชุด คือ สาร Ace กับ Ace-d10 (IS1) สาร Phen กับ Anth สาร BaA กับ Chr สาร BbF, BkF และ BaP สาร Ind, DBahA และ BghiP ที่มีความยากในการแยกเพียงการพิจารณาด้วย retention time (RT) และมวลต่อประจุ (m/z) อย่างเดียว ดังนั้น ในการวิเคราะห์สาร PAHs แต่ละชนิดในตัวอย่างควันธูปและวัตถุดิบ จึงต้องพิจารณาทั้ง RT และมวลต่อประจุ โดยมีการควบคุมคุณภาพด้วยการกำหนด RT ของสารที่สนใจที่ตรวจพบในตัวอย่าง แตกต่างจาก RT ของสารมาตรฐานได้ไม่เกิน ± 0.1 นาที และคำนวณปริมาณสาร PAHs 16 ชนิด ในตัวอย่างธูปและวัตถุดิบ โดยเปรียบเทียบกับค่า RT และ primary mass ion ของสารละลายมาตรฐาน PAHs แบบ Internal standard plot method เพื่อให้การตรวจสอบมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์คืนกลับของสาร PAHs จากการทดสอบประสิทธิภาพการสกัดและการกำจัดสิ่งรบกวน ได้ค่าเปอร์เซ็นต์คืนกลับอยู่ในเกณฑ์ 60-120 เปอร์เซ็นต์ ตาม Method TO-13A (U.S. EPA, 1999)

3. การศึกษาชนิดและปริมาณสาร PAHs ในควันธูปและวัตถุดิบ

จากการเผาไหม้ของธูป 11 ชนิด มีสาร PAHs อยู่ในควันทุกตัวอย่าง สาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 2-3 วง น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 200 ได้แก่ Nap, Phen, Acy, Flu, Anth และ Ace เป็นสารที่พบในทุกตัวอย่างควันธูป สาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง ส่วนใหญ่ที่พบในตัวอย่างควันธูปทั้ง 11 ชนิดได้แก่ Flt, Pyr, BaA, Chr, BbF และ BaP สำหรับสาร BkF และ DBahA เป็นสารที่พบเพียงในบางตัวอย่างควันธูป สำหรับสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 6 วง คือ สาร BghiP และ Ind นั้น ได้พบสาร BghiP ในจำนวนตัวอย่างควันธูปมากกว่าสาร Ind ซึ่งสอดคล้องกับที่ Guo และคณะ (2004 : 188) ตรวจพบสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 2-3 วง มากที่สุดในทุกตัวอย่างควันธูปที่ทำการศึกษา โดยพบ Nap 38 ถึง 68 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณ PAHs ทั้งหมด จากการศึกษาของ Li และ Ro (2000 : 614) พบสาร Nap, Flu และ Phen 87.1, 30.6, 26.2 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สูงเป็นตามลำดับในบ้านที่มีการจุดธูปของกรุงไทเป ประเทศไต้หวัน ขณะที่ Lin และคณะ (2002 : 8) พบสาร Acy ในฝุ่นและอากาศภายในวัดที่ไต้หวันสูงที่สุด ส่วน Navasumrit และคณะ (2008 :19) พบสาร PAHs ที่คนงานในวัด 3 แห่งในประเทศไทยได้รับสัมผัส ได้แก่ Chr, BghiP, BaP, BaF และ Flu จากมากไปหาน้อย เมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้วัตถุดิบ 20 ชนิด มีสาร PAHs อยู่ในควันทุกตัวอย่าง และพบสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 2-3 วง มากที่สุดในทุกตัวอย่างควันเช่นเดียวกับตัวอย่างธูป สำหรับสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง ส่วนใหญ่ที่พบในตัวอย่างควันวัตถุดิบ คือ Flt และ Pyr สำหรับสาร BaA, Chr, BbF, BaP BkF และ DBahA เป็นสารที่พบเพียงในบางตัวอย่างควันวัตถุดิบ และสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน

6 วง พบสาร BghiP ในจำนวนตัวอย่างควันวัตถุดิบมากกว่าสาร Ind การศึกษาของ Lung และ Hu. (2003 : 678) พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง เป็นส่วนมากในการเผาไม้ (wood combustion) และควันบุหรี่ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าวัตถุดิบส่วนใหญ่ มีสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง น้อยกว่าในควันธูป ส่วนวัตถุดิบชนิดที่สังเกตว่ามีส่วนประกอบไม้เป็นแหล่งกำเนิด คือ ขี้เลื่อย ยางบงที่ได้จากเปลือกไม้ ไม้จันทน์ที่มีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก มะกรูดและสะเดา จะพบชนิดสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง ค่อนข้างมาก แต่ขี้เลื่อยไม้มะม่วงจะพบสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง น้อย เมื่อเทียบกับขี้เลื่อยไม้ยางพาราและไม้อัด อาจเป็นเพราะขี้เลื่อยไม้มะม่วงมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งมากกว่าอีก 2 ชนิดดังกล่าว ส่วนธูปหอมกลิ่นแก่นจันทน์ ธูปกำยาน กำยานรูปทองก้อน และธูปหอมรูปโคนกุลิ่นกุหลาบ ถึงแม้จะไม่มีก้านธูปอยู่ในเนื้อธูป แต่พบสาร PAHs ที่มีวงเบนซีน 4-5 วง หลายชนิดเช่นเดียวกับธูปอื่น ๆ ที่มีก้านไม้ไผ่เป็นแกนกลาง และในการศึกษานี้ ไม่ได้ทำการตรวจหาสาร PAHs ในก้านธูป แต่ Lee และ Lin.(1996 : 361)ได้มีการศึกษาสาร aliphatic aldehydes ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาก้านธูปที่ทำจากไม้ไผ่ พบว่ามีสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองและก่อมะเร็ง คือ formaldehyde ในควัน ปริมาณ 7.5 mg. aldehyde/g. material burn

การศึกษาของ See และคณะ (2007 : 25-32) ได้ศึกษาอนุภาคฝุ่นจากธูป 4 ชนิด ได้แก่ ธูปที่มีส่วนประกอบเป็นไม้กฤษณา (aloewood) ผลิตจากประเทศไต้หวันและญี่ปุ่น ธูปที่มีส่วนประกอบเป็นไม้จันทน์ (sandalwood) ผลิตจากประเทศอินเดีย และธูปหอมจากไม้จันทน์ที่อ้างว่าไร้ควันของประเทศจีน พบว่า ถึงแม้ว่าธูปจะมีส่วนประกอบหลักเป็นไม้เนื้อหอม แต่ยังมีวัตถุดิบอื่นที่ถูกปกปิดไว้จากผู้ผลิต มีความแตกต่างของอนุภาคฝุ่น ไม้กฤษณาเป็นไม้ที่มีเนื้อไม้หอมมากกว่าไม้จันทน์ และธูปที่มีส่วนประกอบเป็นไม้กฤษณา มีควันน้อยกว่าธูปที่มีส่วนประกอบเป็นไม้จันทน์ด้วย ดังนั้นธูปไม้จันทน์จากอินเดียจึงมีปริมาณอนุภาคฝุ่นรวมขนาดตั้งแต่ 5.6 ถึง 560 นาโนเมตร มากกว่าธูปอื่น ๆ สำหรับธูปไม้จันทน์ที่อ้างว่าเป็นธูปไร้ควันนั้น มีอนุภาคฝุ่นรวมน้อยกว่าธูปอื่น อีก 3 ชนิด แต่มีอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กมาก (ultrafines) คือ 5.6 ถึง 50 นาโนเมตร สูงกว่าธูปชนิดอื่น ๆ ธูปไม้จันทน์จากอินเดียมีค่าการปลดปล่อย (emission factor) มาก อาจเนื่องมาจากปริมาณของส่วนผสมที่ใช้ผลิตธูปมากและมีกลิ่นหอมแรงกว่าธูปไม้จันทน์จากไต้หวัน ธูปไม้กฤษณาจากจีนและญี่ปุ่น ซึ่งเป็นไปได้ว่าจะมีการเติมสารให้กลิ่นหอม (fragrance) ในปริมาณมาก เมื่อมีการเผาไหม้จะทำให้มีการปล่อยอนุภาคฝุ่นมาก รวมทั้งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างธูปที่มีส่วนประกอบเป็นไม้กฤษณาที่ผลิตจากไต้หวันและญี่ปุ่น ธูปจากญี่ปุ่นมีสารสกัดลาเวนเดอร์รวมอยู่ด้วย เนื้อธูปมีสีน้ำเงินเข้ม (navy blue) ซึ่งคาดว่าผู้ผลิตได้มีการเติมน้ำมันหอมและสี ทำให้เป็นสาเหตุให้มีการเพิ่มการปลดปล่อยฝุ่นละอองเพิ่มขึ้น ธูปไม้กฤษณาจากญี่ปุ่นจึงมีปริมาณอนุภาคฝุ่นมากกว่าธูปไม้กฤษณาจากไต้หวัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษา

ในครั้งนี้ พบว่า ธูปไหว้พระสีครีมอ่อน (S1-1) มีปริมาณอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน สูงที่สุด คิดเป็น 4.32 เปอร์เซ็นต์ อันดับรองลงมาจนถึงต่ำสุด คือ กำยานรูปทองก้อน (C5-1) ธูปไหว้พระสีเหลือง (S1-2) ธูปหอมรูปกรวยกลิ่นกุหลาบ (C3-1) ธูปหอมกลิ่นกุหลาบ (S3-2) ธูปไหว้พระกลิ่นจันทน์ (S2-1) ธูปหอมกลิ่นแก่นจันทน์ (S4-1) ธูปกำยาน (S5-1) ธูปสมุนไพรไล่ยุง (S6-1) ธูปหอมกลิ่นจำปี (S3-1) และ ธูปไร้ควัน (S7-1) เท่ากับ 3.59, 3.21, 2.35, 2.32, 1.65, 1.42, 1.27, 0.91, 0.72 และ 0.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาสาร PAHs ที่เกี่ยวข้องเป็นสารก่อมะเร็งในคน ธูปที่ทำการศึกษา 11 ชนิด จาก 8 ยี่ห้อ และวัตถุดิบ 20 ชนิด ซึ่งถูกเก็บจากแหล่งผลิตและจำหน่ายในเขตกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัด มีสาร BaP ที่เป็นสาร Group 1 คือสารที่ก่อมะเร็งในคน รวมทั้งมีสาร DBahA ที่เป็นสาร Group 2A คือสารที่น่าจะก่อมะเร็งในคน และหรือสาร Chr, BaA, BbF, BkF และInd ที่เป็นสาร Group 2B คือสารที่อาจก่อมะเร็ง ซึ่งสอดคล้องกับธูปจีน 9 ชนิด ที่ Yang และคณะ (2007:606) ทำการศึกษา ได้พบสารที่ก่อมะเร็งในควันธูปทุกชนิดเช่นกัน

จากการเผาไหม้ของธูปและวัตถุดิบต่าง ๆ มีสาร PAHs อยู่ในอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก ในควันและที่ติดกับภาชนะกระบอกแก้วทุกตัวอย่าง แสดงว่า ธูปเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดสารอันตราย และถ้ามีการจุดธูปภายในที่อยู่อาศัย จะเป็นการเพิ่มระดับสาร PAHs ขึ้นจากแหล่งอื่น ๆ เช่น การปรุงอาหาร การสูบบุหรี่อีกด้วย ซึ่งการจุดธูปเพียง 1 ดอก สามารถแพร่กระจายอนุภาคฝุ่นมากกว่าการสูบบุหรี่และการปรุงอาหาร (See, et al. 2007 : 30) ซึ่งยังไม่พบมีหน่วยงานใดที่กำหนดให้มีค่ามาตรฐานสาร PAHs ในบรรยากาศของบ้านที่อยู่อาศัยมีเพียงมาตรฐานค่าสาร PAHs ในบรรยากาศของสถานที่ทำงาน (occupational work setting) เช่น หน่วยงาน The Occupational Safety and Health Administration (OSHA) ได้กำหนดค่า PAHs ในอากาศ ไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Bureau of Environmental Health Health Assessment Section, 2010)

เมื่อพิจารณาธูปจำนวน 11 ชนิด จาก 8 ยี่ห้อ ที่นำมาทำการศึกษาสาร PAHs ในครั้งนี้ แต่ละชนิดมีความแตกต่างของปริมาณน้ำหนัก สีของเนื้อธูป อนุภาคฝุ่น และสาร PAHs พบว่าในธูปประเภทที่มีก้านและก้อนกำยานที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีควันน้อยหรือไร้ควัน บางยี่ห้อนั้น มีสาร PAHs มากกว่า ธูปและกำยานที่ผลิตจากวัตถุดิบทั่วไปหรือไม่ได้ระบุว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถอธิบายได้ว่า ธูปแต่ละชนิดหรือแต่ละรุ่นผลิต ผลิตมาจากวัตถุดิบที่หลากหลาย (Lung, & Hu. 2003 : 678) และมาจากหลายประเทศ ปัญหาก็คือ วัตถุดิบเหล่านั้นไม่มีคุณภาพที่มีมาตรฐาน มาจากต้นไม้ที่แต่ละต้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติ รวมทั้งต้นไม้อาจมีการดูดซึมสิ่งต่าง ๆ จากดิน หรือที่ธูปบางชนิดมีปริมาณการกระจายของฝุ่นมาก อาจเกิดจากปริมาณของน้ำมันหอมที่ใส่ไว้ในธูปมีปริมาณมาก การมีสีต่าง ๆ อาจเกิดจากการใส่สีลงในส่วนผสมของธูป (See, et

al. 2007 : 30) นั่นแสดงว่า ปริมาณฝุ่น และ PAHs ของธูปแต่ละอัน ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาด ความยาว และรูปแบบ และในการควบคุมผลการทดสอบสาร PAHs ในตัวอย่างธูปและวัตถุดิบ ในการศึกษาครั้งนี้ด้วยการพิจารณาค่าความเที่ยง (precision) ของการทดสอบตัวอย่างซ้ำ (duplicate) พบว่ามีค่า Relative percent difference (RPD) เท่ากับ 3.2 และ 18.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างธูปหอมกลิ่นแก่นจันทน์ (S4-1) และวัตถุดิบชนิดยางบง (M4-2) ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า

วิธีการเก็บควันจากน้ำมันหอมเพื่อทำการตรวจวิเคราะห์สาร PAHs ต้องมีการปรับปรุงเทคนิคและอุปกรณ์ให้เป็นที่เหมาะสม รวมทั้งเทคนิคการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-MS ควรใช้ที่มีเทคนิคที่สามารถแยกสารได้มากขึ้น เช่น การตรวจสารด้วย GCxGC-MS ในโหมด SIM หรือ GCxGC-TOFMS ที่ค่ากำลังการแยกมวลสารได้สูง

ธูปชนิดต่าง ๆ รวมทั้งวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติและอุตสาหกรรม มีการปนเปื้อนหรือสามารถก่อให้เกิดสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เนื่องจากธูปทำมาจากขี้เลื่อย น้ำมันหอม ไม้หอม ใบไม้ เปลือกไม้ และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เป็นความลับของผู้ผลิต พอกอยู่บนก้านไม้ ธูปที่มีหลายรูปแบบหลายขนาด ตั้งแต่เล็กถึงใหญ่มาก เมื่อมีการจุดธูป จะใช้เวลาในการเผาไหม้ต่างกัน และมีควันเกิดขึ้นมากมาย ดังนั้นการจุดธูปไหว้พระ บูชาสิ่งที่เคารพนับถือ หรือในจุดประสงค์อื่น ๆ เช่น การสื่อถึงจิตวิญญาณ การทำให้ร่างกายรู้สึกผ่อนคลาย ถ้าการจุดธูปนั้นอยู่ในบ้าน วัด หรือสถานที่อื่น ๆ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก ควันธูปจะอบอวลและลอยคลุ้งปะปนไปในอากาศที่ไม่มีทางระบายออก ระดับของสาร PAHs จะมีการสะสมหรือเพิ่มขึ้นในสถานที่เหล่านั้น ทำให้ผู้ที่สูดดมเกิดความระคายเคือง สำลักควัน จนเกิดอาการไอได้ ด้วยสาเหตุเหล่านี้จึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกายของผู้สูดดมอย่างแน่นอน โดยเฉพาะผู้ที่เป็นโรคภูมิแพ้หรือโรคทางเดินหายใจ และก่อให้เกิดโรคโรคมะเร็งในระยะยาวได้ อีกทั้งถ้าปราศจากการกำจัดเถ้าของธูปอย่างเหมาะสม จะทำให้ปริมาณสาร PAHs สามารถกระจายเข้าสู่สิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ฉะนั้น เพื่อให้ประชาชนมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น และมีส่วนช่วยในการลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ เช่น ฝุ่นละออง สาร PAHs และแก๊สเรือนกระจก ลดภาวะวิกฤติโลกร้อน และยังช่วยลดอุบัติการณ์การเกิดมะเร็งได้ ผู้ใช้ธูปควรปรับเปลี่ยนพฤติกรรม ได้แก่

อาจสักการะสิ่งศักดิ์สิทธิ์ที่นับถือโดยการพนมมือหรือถือธูปไว้ได้แต่ไม่จุดแล้วระลึกถึงสิ่งที่เราจะสักการะ

หากจำเป็นต้องจุดธูป ควรตั้งกระถางธูปไว้ภายนอกอาคารที่โล่ง หรือที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก

ใช้ธูปที่มีขนาดสั้นลง หรือเป็นแบบชนิดไฟฟ้า

ดับธูปทันทีเมื่อการบูชาเสร็จสิ้น เช่น จุ่มธูปลงในน้ำ หรือกระบะทราย เพื่อดับธูปและไม่ทำให้ไม่เกิดควันสะสมในบริเวณดังกล่าว แทนการปักธูปลงในกระถางธูปตามการปฏิบัติเดิม

โรงงานผู้ผลิต ควรลดขนาดธูปให้สั้นลง ไม่ใช้ก้านไม้เป็นแกนกลางธูป หรือเปลี่ยนส่วนผสมอันตรายออกออก และหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องควรออกข้อกำหนดเพื่อใช้สำหรับการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายในประเทศและต่างประเทศ เพื่อให้สามารถส่งออกสู่ตลาดโลกได้