

การนำฉนวนกันความร้อนเหลือทิ้งประยุกต์เป็นไส้กรองเครื่องฟอกอากาศ Utilization of PU Foam Insulation Waste to Air Purifier Filter

กมลชัย ยงประพัฒน์^{1*}, นิดา ชัยมูล², มณีรัตน์ องค์กรธรณ์³

Kamonchai Yongprapat^{1*}, Nida Chaimoon², Maneerat Ongwandee³

¹หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³วิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพมหานคร

¹Master of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

²Division of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

³Institute of Metropolitan Development, Navamindradhiraj University

* Corresponding author e-mail: 61010351006@msu.ac.th

(Received: 24 May 2020, Revised: 3 December 2020, Accepted: 17 December 2020)

บทคัดย่อ

ในปี 2560 ประเทศไทยผลิตขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงถึง 0.4 ล้านตัน ซึ่งในจำนวนนี้เป็นตู้เย็นที่หมดสภาพโดยมีการคัดแยกชิ้นส่วนที่มูลค่าไปจำหน่าย ในขณะที่ฉนวนกันความร้อนโฟมพียูปริมาณกว่า 20,000 ลบ.ม. ถูกทิ้งในบ่อขยะของชุมชนหรือถูกลักลอบเผาทิ้ง งานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มมูลค่าขยะโฟมพียูด้วยการใช้เป็นไส้กรองเครื่องฟอกอากาศ โดยออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศแบบเคลื่อนย้ายได้ที่ใช้ไส้กรองโฟมพียูจากฉนวนกันความร้อนเพื่อดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) โครงสร้างของเครื่องฟอกอากาศทำจากอะลูมิเนียมขนาด 36x36x78 ลบ.ซม. หุ้มด้วยแผ่นเหล็กเรียบ ติดตั้งพัดลมทอยโซ่ ขนาด 220 วัตต์ มีกริลเลอร์เพื่อกระจายลม ส่วนไส้กรองทำจากเฟรมอะลูมิเนียมขนาด 31x5x44 ลบ.ซม. ทดสอบโฟมพียู 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบเส้น แบบลูกเต๋า และแบบก้อน วัดสมรรถนะของเครื่องฟอกด้วยค่าอัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกต่อหน่วยเวลา (CADR) สำหรับกำจัดฝุ่น PM_{2.5} โดยจัดรูปในห้องทดสอบ 8 ลบ.ม. ให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 250 มก./ลบ.ม. คำนวณค่า CADR จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM_{2.5} เป็นเวลา 1.5 ชม. ด้วยสมการสมดุลมวลของฝุ่นในห้องทดสอบและใช้การวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลการทดสอบพบว่า เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดสอบระดับฝุ่นลดลงเหลือประมาณ 3-43 มก./ลบ.ม. เครื่องฟอกอากาศมีค่า CADR ได้ดังนี้ ไส้กรองโฟมพียูแบบเส้น 14.3, แบบลูกเต๋า 18.6 และแบบก้อน 21.3 ลบ.ม./ชม. โดยไส้กรองแบบก้อนให้ค่า CADR ใกล้เคียงเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์บางรุ่นที่ใช้ไส้กรอง HEPA กำลังไฟ 35 วัตต์ เมื่อเสริมไส้กรองโฟมพียูด้วยแผ่นกรองหยาบสามารถเพิ่ม CADR ของเครื่องฟอกได้ร้อยละ 50-90 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกประมาณ 5,000 บาท ทั้งนี้โฟมพียูที่หมดความสามารถในการดักจับฝุ่นแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นสุดท้ายด้วยการผสมผลิตภัณฑ์มวลเบา

คำสำคัญ : โฟมพียู, เครื่องฟอกอากาศ, ค่าซีเอ็ดอาร์, ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

Abstract

In 2017, Thailand's electronic waste production reached 0.4 million which included refrigerator waste. Refrigerators that are no longer required are sorted and separated to recycle valued parts, while over 20,000 m³

of rigid polyurethane (PU) insulating foam is discarded in community dumping sites or illegally burned. This research aimed to add value to the PU foam waste by adopting it as an air purifier. Thus, we designed and constructed a prototype of a portable air purifier embedding a filter to trap $PM_{2.5}$ made from PU foam. Our designed $36 \times 36 \times 78\text{-cm}^3$ air purifier was made from aluminum and covered with galvanized iron flat sheet. It was equipped with a 220-W centrifugal fan and griller tower to distribute dirty air evenly. An air filter cartridge was a $31 \times 5 \times 44\text{-cm}^3$ aluminum frame filling with three individual PU foam shapes, including stripe, cubic and ball. We evaluated the air purifier performance, in terms of a clean air delivery rate (CADR) for removal of $PM_{2.5}$. Test particles were generated by burning an incense stick in an 8-m^3 test chamber to achieve an initial concentration of $250\text{ }\mu\text{g/m}^3$. CADRs were determined by fitting 1.5-h concentration profiles to mass balance models, using nonlinear regression. At the end of testing, the $PM_{2.5}$ concentrations were as low as $3\text{--}43\text{ }\mu\text{g/m}^3$. The CADRs for the stripe, cubic and ball shapes were 14.3, 18.6 and $21.3\text{ m}^3/\text{h}$, respectively. The ball-shape filter exhibited the similar CADR to the 35-Watt HEPA commercial air purifier. An additional prefilter sheet helped to increase the CADRs for all PU foam filter shapes by 50-90%. The production cost is 5,000 baht. It is noteworthy that the expired PU foam air filter can be ultimately used as an aggregate for lightweight concrete.

Keywords: PU foam, Air purifier, CADR, $PM_{2.5}$

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เช่น เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ได้กลายเป็นขยะในท้ายสุด การสำรวจในประเทศไทยโดยกรมควบคุมมลพิษในปี 2560 พบขยะอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 400,000 ตัน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ โทรศัพท์ 106,335 ตัน คิดเป็นร้อยละ 27 เครื่องปรับอากาศ 74,799 ตัน คิดเป็นร้อยละ 19 ตู้เย็น 65,765 ตัน คิดเป็นร้อยละ 17 เครื่องซักผ้า 60,492 ตัน คิดเป็นร้อยละ 16 คอมพิวเตอร์ 57,058 ตัน คิดเป็นร้อยละ 15 นอกนั้นเป็นโทรศัพท์ และกล้องถ่ายรูปดิจิทัล คิดเป็นร้อยละ 6 (WITTHAYA-ANUMAS, 2017)

ในประเทศไทย ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical & Electronic Equipment, WEEE) จะมีพ่อค้ารับซื้อจากบ้านเรือนก่อนถูกส่งต่อไปยังแหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่กระจายอยู่ทั่วประเทศเกือบ 100 แห่งในพื้นที่ 17 จังหวัด โดยจังหวัดที่มีชุมชนประกอบอาชีพคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด

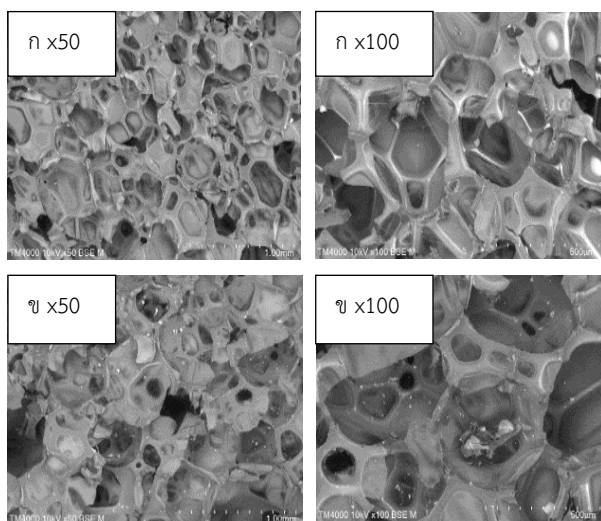
ได้แก่ กาฬสินธุ์ บุรีรัมย์ และอุบลราชธานี สำหรับแหล่งชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยอยู่ในพื้นที่อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ รองลงมาได้แก่ พื้นที่อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ และอำเภอเชียงใน จังหวัดอุบลราชธานี (Wassanadamrongdee, 2015; Thailand Development Research Institute, 2018) ในปัจจุบันขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เหลือจากการคัดแยกจำนวนมากและจัดเป็นขยะอันตราย โดยเฉพาะเศษแก้ว โฟม และกากยางรถ ถูกนำมากองทิ้งไว้ในบ่อขยะหรือพื้นที่สาธารณะ และบางส่วนถูกลักลอบทิ้งเองเพื่อต้องการพื้นที่ทิ้งเพิ่มเติมก่อให้เกิดมลพิษอากาศ การหาทางนำขยะเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำโฟมพียูที่ถูกทิ้งจากการคัดแยกชิ้นส่วนซากตู้เย็นมาใช้เป็นไส้กรองอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับโฟมพียูจากเดิมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศด้วยแนวคิดที่ประชาชนสามารถใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในท้องถิ่นสร้างได้เองในพื้นที่

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและการเตรียมวัสดุ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำไส้กรอง คือ โฟมพียูจากฉนวนกันความร้อนของตู้เย็น ได้จากแหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ และอำเภอเขื่อนใน จังหวัดอุบลราชธานี ลักษณะของโฟมพียูวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM, Hitachi, Japan) แสดงดังรูปที่ 1

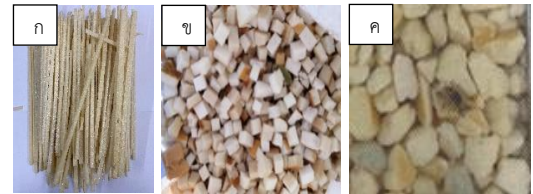


รูปที่ 1 ภาพถ่ายโฟมพียูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 และ 100 เท่าของ (ก) โฟมที่เก็บในที่ร่ม และ (ข) โฟมที่วางกลางแจ้ง

จากภาพถ่าย SEM ของโฟมพียูแสดงลักษณะโครงสร้างที่เป็นช่องเปิดเชื่อมโยงกันเป็นชั้นๆ ช่องเปิดมีขนาด 20-50 ไมครอน โฟมพียูที่ไวกลางแจ้งผ่านสภาพอากาศถูกแดดลมพบว่า มีชิ้นส่วนโฟมขนาดเล็กๆ จำนวนมากปรากฏที่พื้นผิวโครงสร้าง ช่องเปิดแตกหักมากกว่าโฟมที่จัดเก็บในที่ร่ม ดังนั้นผิวสัมผัสจึงเป็นผอง ร้อนติดมือได้ ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นไส้กรองของเครื่องฟอกอากาศกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โฟมที่ถูกเก็บในที่ร่ม

โฟมพียูที่ได้จากแหล่งคัดแยกมีขนาดใหญ่จึงต้องตัดด้วยคัตเตอร์ให้มีรูปร่างที่จะใช้ทำไส้กรองในการทดสอบ 3 แบบ คือ (ก) แบบเส้นยาว 22 ซม. กว้าง 0.5-0.8 ซม. หยา 0.2-0.4 ซม. และ (ข) แบบลูกเต๋า ประมาณ 1x1x1 ซม. ส่วนโฟมพียู (ค) แบบก้อนขนาด 1-2 ซม. ได้จากการเตรียมโฟมด้วยการบดเพื่อนำไปผสมทำอิฐมวลเบาของ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

ดังรูปที่ 2 หมายเหตุ การเลือกรูปทรงโฟมแบบเส้นและแบบลูกเต๋าได้จากการทดสอบเบื้องต้นในการดักจับฝุ่นขนาดเล็กพบว่า เป็นรูปทรงที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ ไม่เกิดความดันย้อนกลับ (Back pressure) ในชั้นกรอง



รูปที่ 2 รูปร่างโฟมพียูที่ใช้ทำไส้กรองอากาศ (ก) แบบเส้น (ข) แบบลูกเต๋า และ (ค) แบบก้อน

2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศ

เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมพียู ออกแบบเป็นทรงตู้สี่เหลี่ยม เลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นโครงของเครื่องฟอกอากาศเพื่อง่ายต่อการประกอบ และออกแบบให้สามารถถอดไส้กรองอากาศที่เป็นเฟรมสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อเปลี่ยนวัสดุกรองคือโฟมพียูได้ ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเครื่องฟอกแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบเครื่องฟอกอากาศ

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
ขนาดของเครื่องฟอก	36x36x78 ซม.ม.
พื้นที่ไส้กรอง (A_{filter})	770 ตร.ซม.
ความเร็วลมผิวหน้าแผ่นกรอง (v)	2 เมตร/วินาที (120 ฟุต/นาที่)
ความดันลดของแผ่นกรองโฟมพียู (Head)	2 นิ้วของน้ำ
อัตราการหมุนเวียนอากาศผ่านเครื่องฟอก (R)	10 รอบต่อ ชม.
ความสูงของพื้นที่ที่ต้องการฟอกอากาศ (H)	3 ม.

*ความเร็วสูงสุด 2.5 เมตร/วินาที (300 ฟุต/นาที่) สำหรับไส้กรองชนิดใช้แล้วทิ้ง (Godish, 1989)

คำนวณอัตราการดูดอากาศที่ต้องการทำความสะอาดผ่านเครื่องฟอก (Q_{device}) ได้ดังสมการ

$$Q_{device} = A_{filter} \times v \quad (1)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะได้ค่า Q_{device} เท่ากับ 554 ลบ.ม./ชม. สามารถคำนวณพื้นที่ใช้งานสำหรับการฟอกอากาศ (A) ได้ดังสมการ

$$A = \frac{Q_{\text{device}}}{(R \times H)} \quad (2)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะได้ค่า $A = 18.5$ ตร.ม.

คำนวณกำลังไฟของพัดลมดูดอากาศของเครื่องฟอกได้ตั้ง
สมการ

$$P = \rho \times g \times Q_{\text{device}} \times \text{Head} \times SF \quad (3)$$

โดยที่

P คือ กำลังของพัดลม (วัตต์)

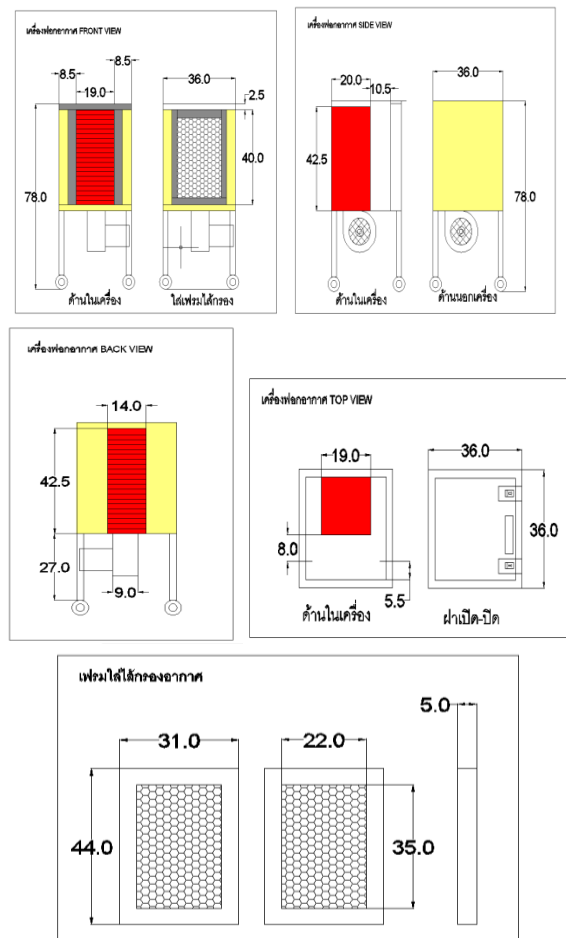
ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.2 กก./ลบ.ม.)

g คือ แรงความโน้มถ่วง (9.8 เมตร/วินาที²)

SF คือ ค่าตัวคูณ safety factor กำหนดเท่ากับ 1.2

จะได้ค่ากำลังของพัดลมเท่ากับ 87 วัตต์ ในที่นี้เลือกพัดลม
แบบหอยโข่ง (Centrifugal fan) เพราะให้ความดันสถิตสูงกว่า
พัดลมแบบตามแนวแกน (Axial fan)

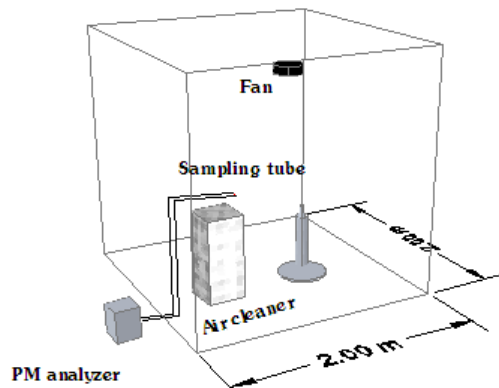
รูปที่ 3 แสดงแบบเครื่องฟอกอากาศของไส้กรองโฟมพียูทรง
ตุ้สสี่เหลี่ยมขนาด 36x36x78 ลบ.ซม. โครงอะลูมิเนียมหุ้มด้วย
แผ่นเหล็กเรียบสีครีม ติดตั้งพัดลมหอยโข่งขนาด 220 วัตต์ที่มี
ขายในท้องตลาด มีกริลเลอร์ (Griller) เพื่อกระจายลมดังแสดง
ในส่วนของพื้นที่สีแดง และติดล้อเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้
ส่วนวัสดุไส้กรองโฟมทำจากเฟรมอะลูมิเนียมขนาด 31x5x44
ลบ.ซม. มีพื้นที่ผิวระนาบเท่ากับ 770 ตร.ซม. ใส่โฟมที่เตรียมไว้
ในเฟรมจนเต็ม ซึ่งน้ำหนักโฟมได้ดังนี้ แบบเส้น 400 กรัม/เฟรม
แบบลูกเต๋าและแบบก้อน 440 กรัม/เฟรม



รูปที่ 3 แบบวาดของเครื่องฟอกอากาศในแต่ละมุมมองและเฟรมไส้กรอง
โฟมพียู

2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องฟอกอากาศ

งานวิจัยนี้วัดอัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกต่อหน่วยเวลา
(Clean air delivery rate, CADR) ซึ่งเป็นมาตรวัดการทำงาน
ของเครื่องฟอกอากาศแบบเคลื่อนย้ายได้ในการกำจัดฝุ่นละออง
ขนาดเล็กของสมาคมผู้ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเรือนของ
ประเทศสหรัฐอเมริกา (Association of Home Appliance
Manufacturers, 2006) การทดสอบใช้ห้องทดสอบขนาด 8
ลบ.ม. ผังภายในบุด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เพดานห้องติดตั้งพัด
ลมเพื่อสร้างความผสมผสานของอากาศในห้อง ท่อชักตัวอย่าง
อากาศอยู่สูงจากพื้นห้องประมาณ 1 เมตร วัดค่าฝุ่นด้วยเครื่อง
DustTrak (TSI, USA) ส่วนแหล่งกำเนิดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2.5
ไมครอน (PM_{2.5}) ได้จากการจุดธูป ระบบการทดลองแสดงดัง
รูปที่ 4



รูปที่ 4 ห้องทดสอบและอุปกรณ์

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากวัดความเข้มข้นภูมิหลังของ $PM_{2.5}$ (Background concentration) จากนั้นจุดรูปเพื่อให้ได้ระดับ $PM_{2.5}$ เริ่มต้นในห้องประมาณ 250 มก./ลบ.ม. ปิดประตูห้องแล้วเปิดเครื่องฟอกอากาศ บันทึกค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เป็นเวลา 1.5 ชม. นำชุดข้อมูลที่ได้นำมาพยากรณ์ค่า CADR ได้ด้วยสมการ (4) สมดุลมวลสารการเปลี่ยนแปลง $PM_{2.5}$ ในอากาศภายในห้องทดสอบซึ่งเป็นผลจาก 4 กลไกหลัก คือ การรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (chamber leakage) การดูดอากาศของปั๊มเครื่องวัดฝุ่น การตกทับถมตามธรรมชาติของฝุ่นบนพื้นผนังห้องทดสอบ (natural deposition) และการดักจับฝุ่นละอองด้วยเครื่องฟอกอากาศ

$$\frac{dC_t}{dt} = \lambda C_{out} - \lambda C_t - \frac{Q_p}{V} C_t - \frac{CADR}{V} C_t - k_{PM} C_t \quad (4)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในห้องที่ t (มก./ลบ.ม.)

C_{out} คือ ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ นอกห้อง (มก./ลบ.ม.)

λ คือ อัตราการรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (ต่อ ชม.)

Q_p คือ อัตราการดูดอากาศของเครื่องวัดฝุ่น (0.18 ลบ.ม./ชม.)

CADR คือ อัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกแล้ว (ลบ.ม./ชม.)

k_{PM} คือ สัมประสิทธิ์การตกทับถมตามธรรมชาติ $PM_{2.5}$ (ต่อ ชม.)

V คือ ปริมาตรห้องทดสอบ (8 ลบ.ม.)

t คือ เวลา (ชม.)

2.3.1 การหาอัตราการรั่วซึมของห้อง (λ)

ใช้ก๊าซ CO_2 เป็นก๊าซทำรอยตาม ASTM E741 tracer gas decay method (American Society for Testing and Materials, 2009) โดยจุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่ไม่มีเครื่องฟอกให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม เปิดเครื่องตรวจวัดและเก็บข้อมูลระดับ CO_2 เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นทำนายค่า λ ดังสมการ (5) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม nonlinear regression and curve fitting

$$C_t = C_0 e^{-(\lambda t)} + C_{out}(1 - e^{-(\lambda t)}) \quad (5)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้น CO_2 ณ t ใดๆ (พีพีเอ็ม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น CO_2 (พีพีเอ็ม)

C_{out} คือ ความเข้มข้น CO_2 นอกห้องทดสอบ (พีพีเอ็ม)

ผลการวัดได้อัตราการรั่วซึมของห้องทดสอบเฉลี่ย 2 ครั้ง เท่ากับ 0.015 ต่อ ชม. มีค่า R^2 (Proportion of variance explained) จากการทำนายสูงกว่า 0.97

2.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การตกทับถมตามธรรมชาติของฝุ่น (k_{PM})

จุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่ไม่มีเครื่องฟอกให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้น $PM_{2.5}$ 250 มก./ลบ.ม. เก็บค่าความเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ โดยใช้สมการ (6) หา k_{PM} โดยค่า λ ได้จากการทดลอง 2.3.1

$$C_t = (C_0 - C_b) e^{-(\lambda + k_{PM})t} + C_b \quad (6)$$

โดยที่

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น $PM_{2.5}$ (มก./ลบ.ม.)

C_b คือ ความเข้มข้นภูมิหลัง $PM_{2.5}$ ณ สภาวะสมดุล (มก./ลบ.ม.)

ผลการวัดได้ค่า k_{PM} เฉลี่ย 2 ครั้ง เท่ากับ 0.102 ต่อ ชม. มีค่า R^2 สูงกว่า 0.98

2.3.3 การหาค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศ

จุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่เตรียมไว้ให้ได้ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เริ่มต้น 250 มก./ลบ.ม. จากนั้นเปิดเครื่องฟอกอากาศที่บรรจุโฟมฟิวแต่ละรูปร่าง บันทึกความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เป็นเวลา 1.5 ชม. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หา CADR โดยใช้สมการ (7) โดยค่า λ และ k_{PM} ได้จากการทดลอง 2.3.1 และ 2.3.2 ตามลำดับ

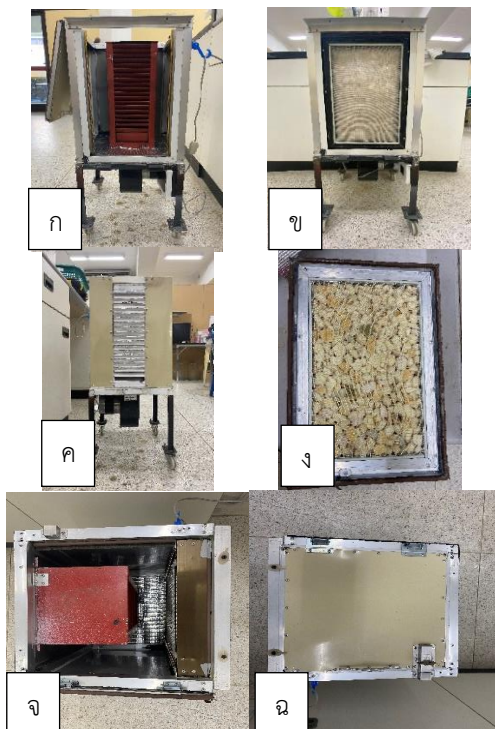
$$C_t = (C_0 - C_b) e^{-\left(\lambda + Q_p + k_{PM} + \left(\frac{CADR}{V}\right)\right)t} + C_b \quad (7)$$

ในการทดลองนี้ได้เพิ่มแผ่นกรองอากาศแบบหยาบ (Prefilter) ด้านในของเฟรมเพื่อรองรับโฟมฟิวและป้องกันฝุ่น โฟมขนาดใหญ่หลุดออกขณะใช้งาน ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง สำหรับไส้กรองแต่ละแบบ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 เครื่องฟอกอากาศที่สร้าง

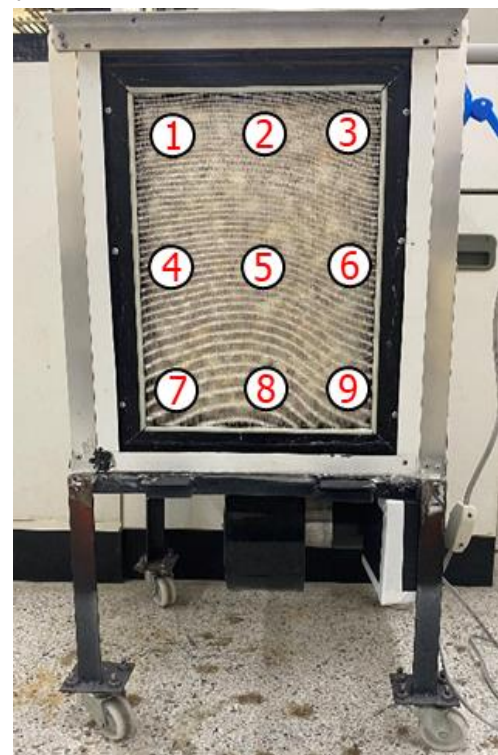
รูปที่ 5 แสดงเครื่องฟอกอากาศที่สร้างออกมาตามแบบ



รูปที่ 5 เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมฟิวทรงตัว

โดยโครงของเครื่องฟอกอากาศสร้างจากวัสดุอะลูมิเนียมหุ้มด้วยแผ่นเหล็กเรียบสีกกรม เชื่อมติดรอยต่อให้สนิทด้วยขบอยางและกาวซิลิโคน ติดตั้งพัดลมหอยโข่งบริเวณด้านล่างของเครื่องฟอกอากาศ และดูดอากาศจากด้านล่างส่งผ่านไปยังกริลเลอร์ดังรูป (ก) เพื่อกระจายลมไปด้านหน้าเครื่องฟอกอากาศที่ใส่เฟรมไส้กรองโฟมฟิวดังรูป (ข) ด้านหลังของกริลเลอร์ติดแผ่นโฟมกันกระแทก และกาวซิลิโคนเพื่อไม่ให้ลมออกดังรูป (ค) ส่วนเฟรมไส้กรองโฟมฟิวมีการติดเทปการโฟมตามขอบของเฟรมไส้กรองเพื่อไม่ให้มีช่องว่างระหว่างเฟรมกับร่องที่ใส่ดังรูป (ง) และสามารถถอดเฟรมไส้กรองออกจากตัวเครื่องได้โดยการเปิดจากด้านบนดังรูป (จ) เมื่อใส่เฟรมไส้กรองเข้าในเครื่องฟอกแล้วจะล็อคฝาบนด้วยกลอนดังรูป (ฉ) เพื่อไม่ให้อากาศดันฝาเปิดขณะใช้งาน

ทำการวัดความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรองที่ใส่วัสดุกรองโฟมฟิวแต่ละรูปร่างขณะเปิดเครื่องใช้งานดังนี้ โดยแบ่งจุดวัดออกเป็น 9 จุดดังรูปที่ 6 สามารถสรุปค่าความเร็วลมได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 บริเวณที่ตรวจวัดความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรอง

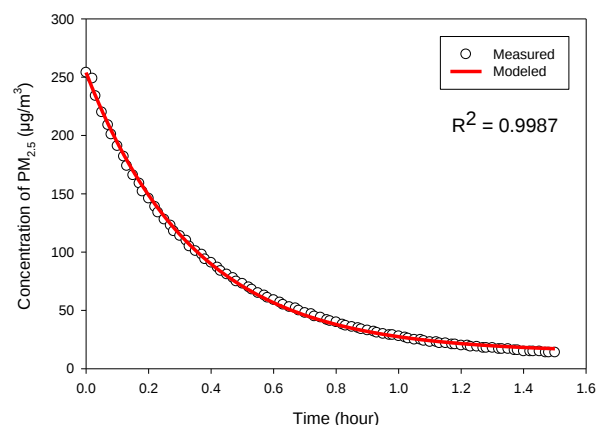
ตารางที่ 2 ความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรองโฟมพียู

จุดที่วัด	ความเร็วลมผิวหน้า (เมตร/วินาที)		
	แบบเส้น	แบบลูกเต๋า	แบบก้อน
จุด 1	1.3	2	2
จุด 2	1	2	2
จุด 3	1.6	2.1	2
จุด 4	1.1	2	2.1
จุด 5	1.3	2	1.9
จุด 6	1.5	1.7	1.9
จุด 7	1.4	2	2
จุด 8	1.4	1.9	1.9
จุด 9	1.9	1.5	1.9
เฉลี่ย	1.5±0.4	1.9±0.2	2.0±0.1

จากตารางที่ 2 ค่าความเร็วลมผิวหน้าเฉลี่ยของไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนและแบบลูกเต๋ามีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 1.9-2.0 เมตร/วินาทีซึ่งใกล้เคียงค่าที่ออกแบบไว้ คือ 2 เมตร/วินาที ส่วนโฟมพียูแบบเส้นมีความเร็วลมผิวหน้า 1.5 เมตร/วินาที ซึ่งต่ำกว่าไส้กรองแบบก้อนและแบบลูกเต๋าเนื่องจากแบบเส้นเมื่อใส่ในเฟรมแล้วมีการเรียงตัวค่อนข้างแน่นทำให้มีช่องเปิดระหว่างชิ้นโฟมน้อย กว่าแบบก้อนและแบบลูกเต๋าดังนั้นจะใส่น้ำหนักที่มากกว่าก็ตาม

3.2 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองหาค่า CADR

รูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่วัดในห้องทดสอบที่ใช้เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนเป็นเวลา 1.5 ชม. (การทดลองไส้กรองโฟมแบบเส้นและแบบลูกเต๋ามีลักษณะกราฟความเข้มข้น $PM_{2.5}$ คล้ายคลึงกับแบบก้อน) จุดวงกลมสีขาวคือค่าที่วัดได้จริง และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองสมการ (7) คือเส้นสีแดง พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองแนบสนิทกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองโดยมีค่า R^2 ที่ได้จากการทดลองของไส้กรองทั้ง 3 แบบอยู่ ระหว่าง 0.97–0.99 และมีค่า Prob(t) เท่ากับ 0.00001 บ่งชี้ว่ามีโอกาสเพียง 1 ใน 100,000 ที่พารามิเตอร์ที่ทำนายคือ CADR จะเป็นศูนย์



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบที่ใช้ไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนไม่มีแผ่นกรองหยาบ

3.3 ค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศ

ผลการประเมินค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศไส้กรองของโฟมพียูทั้ง 3 แบบ และที่ใช้/ไม่ใช้แผ่นกรองหยาบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 และร้อยละการลดลงของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 1.5 ชม.

ตารางที่ 3 CADR ของเครื่องฟอกอากาศที่ใช้โฟมพียูแต่ละรูปร่างและร้อยละการลดลงของ $PM_{2.5}$ ในห้องทดสอบ

CADR มีแผ่นกรองหยาบ				
รูปร่างโฟม	CADR (ลบ.ม./ชม.)	R^2	ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ หลัง 1.5 ชม. (มคก./ลบ.ม.)	ร้อยละการลดลงของ $PM_{2.5}$
แบบเส้น	26 ± 1	99.17	43	96
แบบลูกเต๋า	32 ± 2	99.53	30	98
แบบก้อน	33 ± 1	99.44	16	98
CADR ไม่มีแผ่นกรองหยาบ				
รูปร่างโฟม	CADR (ลบ.ม./ชม.)	R^2	ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ หลัง 1.5 ชม. (มคก./ลบ.ม.)	ร้อยละการลดลงของ $PM_{2.5}$
แบบเส้น	16 ± 2	99.74	9	83
แบบลูกเต๋า	17 ± 1	99.91	4.5	88
แบบก้อน	21 ± 10	99.94	3	93

เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดสอบ 1.5 ชม. ความเข้มข้นฝุ่น $PM_{2.5}$ ถูกกำจัดด้วยเครื่องฟอกอากาศร้อยละ 83-98 ไส้กรองโฟมฟิยูที่มีค่า CADR มากที่สุดคือแบบก้อน รองลงมาคือแบบลูกเต๋าและแบบเส้น ทั้งนี้รูปร่างแบบเส้นอาจทำให้ไส้กรองเกิดความดันสูญเสียมากกว่าแบบอื่นเนื่องจากช่องเปิดระหว่างชั้นโฟมน้อย ดังนั้นอัตราการส่งผ่านของลมออกจากไส้กรองจึงต่ำไปด้วยซึ่งยืนยันได้จากค่าความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรองต่ำที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 2) ส่วนแบบลูกเต๋ามีค่า CADR ต่ำกว่าแบบก้อนเป็นเพราะลักษณะการตัดลูกเต๋าทำให้เกิดเศษผงที่ผิวโฟมหลุดออกมาได้เมื่อสัมผัสกับแรงลมที่ไหลผ่าน ดังนั้นจึงติดแผ่นกรองหยาบที่เฟรมเพื่อรองรับชั้นโฟม และกรองฝุ่นโฟมขนาดใหญ่ ผลการทดลองพบว่าการติดแผ่นกรองหยาบยังช่วยเพิ่มค่า CADR ในการดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ด้วย โดยไส้กรองแบบก้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 57 แบบลูกเต๋าเพิ่มขึ้นร้อยละ 76 และแบบเส้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 62

ส่วนข้อจำกัดในการใช้งานเครื่องฟอกอากาศคือ มีเสียงค่อนข้างดังจากใบพัดลมขณะใช้งาน จึงอาจเหมาะสำหรับพื้นที่เปิดโล่ง เช่น พื้นที่ทำงานของโรงคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น หรือออกแบบตัวเครื่องให้สามารถเก็บเสียงของพัดลมได้ เนื่องจากตัวเครื่องฟอกอากาศต้นแบบนี้ยังมีการรั่วของอากาศเล็กน้อยบริเวณฝาปิดด้านบนและด้านหน้า จึงควรพัฒนาวิธีการเชื่อมรอยพับรอยต่อให้สนิทมากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมรรถนะของไส้กรองแต่ละรูปแบบซ้ำเพียง 2 ครั้งซึ่งได้ค่า CADR ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงยังไม่สามารถคาดการณ์อายุการใช้งานของไส้กรองโฟมฟิยูในแง่ของความสามารถในการดักจับฝุ่นระยะยาวได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

3.4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศ

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ โครจอะลูมิเนียม แผ่นเหล็กเรียบ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งค่าใช้จ่ายนี้คิดจากค่าวัสดุที่เป็นของใหม่ทั้งหมด ถ้าใช้ส่วนประกอบที่เป็นของมือสอง เช่น พัดลมดูดอากาศ จะสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างลงได้ รวมทั้งค่าจ้างเหมาสร้างเครื่องขึ้นแปรเปลี่ยนตามค่าแรงของแต่ละพื้นที่

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศ

ส่วนประกอบเครื่อง	ราคา (บาท)
พัดลมดูดอากาศ	1700
แผ่นเหล็กเรียบ	400
โครจอะลูมิเนียม	1500
เฟรมบรรจุไส้กรองโฟมฟิยู	400
ค่าจ้างเหมาสร้างเครื่อง	1000
รวม	5000

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากโฟมฟิยูเหลือทิ้งหลังจากการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ประเภทตู้เย็นมาใช้ทดแทนไส้กรองอากาศเพื่อดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยศึกษาตัวแปรรูปร่างของโฟมฟิยู 3 รูปร่าง ได้แก่ แบบเส้นแบบลูกเต๋า และแบบก้อน พบว่าโฟมแบบก้อนให้ค่า CADR สูงสุดและเมื่อติดแผ่นกรองหยาบช่วยเพิ่มอัตราการผลิตอากาศสะอาดเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า ใกล้เคียงเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์บางรุ่นที่ใช้ไส้กรอง HEPA กำลังไฟ 35 วัตต์ (Kruewan & Ongwandee, 2013) โฟมฟิยูหลังหมดอายุการใช้งานดักจับฝุ่นแล้ว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นสุดท้ายโดยใช้เป็นส่วนผสมของอิฐมวลเบาได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการใช้นวัตกรรมคิดแบบเศรษฐกิจหมุนเวียน หรือ Circular economy ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงขยะให้กลายเป็นวัตถุดิบในการผลิตของบางอุตสาหกรรมได้อีก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) สำหรับทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 กรอบวิจัยทำหทัยไทยเรื่องการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และของเสียอันตรายชุมชน และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ด้านสถานที่ดำเนินการวิจัย และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ด้านเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- Association of Home Appliance Manufacturers. (2006). *Method for measuring the performance of portable household electric room air cleaners (ANSI/AHAM AC-1)*. (n.p.)
- American Society for Testing and Materials. (2009). Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution (ASTM E741). (n.p.)
- Godish, T. (1989). *Indoor air pollution control*. 3. Lewis Publishers.
- Kruewan, A., & Ongwandee, M. (2013). Evaluation of portable household and in-car air cleaners for air cleaning potential and ozone-initiated pollutants. *Indoor and Built Environment*, 22, 659–668.
- Thailand Development Research Institute. (2018 August 20). Toxic waste of Thai industrial factories <https://tdri.or.th/2018/08/industrial-waste/>
- Wassanadamrongdee, S. (2015). Situation of Electronic Waste Problems. *Journal of Environment*, 19(3), 1-18.
- WITTHAYA-ANUMAS S. (2017 October). *Management Electronic waste In Thailand*. <https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2018/04/wb133.pdf>