

การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบสารประกอบ
ไทเทเนียมไดออกไซด์ – รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในการกำจัดฝุ่น PM2.5
EFFICIENCY STUDY OF AIR FILTERS COATED BY TITANIUM
DIOXIDE – REDUCED GRAPHENE OXIDE COMPOSITE
FOR PM2.5 REMOVAL

ดุษฎี คำบุญเรือง* พีรพัฒน์ คำเกิด และกัญญาณัฐ พวงจันทร์

Dusadee Khamboonrueang*, Peraphat Kamkird and Kanyanat Phuangchan

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในการกำจัดฝุ่น PM2.5 โดยได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ (TiO_2 100%, TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50% และ RGO100%) เปรียบเทียบกับกระดาษกรองที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยได้ทำการทดลองนำแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบดังกล่าวและไม่เคลือบ ไปกำจัดฝุ่นเข้าไปในกล่องสูญญากาศที่มีปริมาตร 18 ลิตร และอัตราการไหลของอากาศ 0.045 ลิตรต่อวินาที ซึ่งความเข้มข้นฝุ่นภายในกล่องเริ่มต้นที่ 600 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยในขณะที่ทำการทดลองกำจัดฝุ่นจะวัดความเข้มข้นฝุ่นภายในกล่องทุก ๆ 5 วินาทีจนกระทั่งความเข้มข้นฝุ่นในกล่องสูญญากาศคงที่ไม่ลดลงอีก ผลการทดลองพบว่า แผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO50% มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM2.5 เร็วที่สุด มีค่าเฉลี่ยของเวลาในการกำจัดฝุ่น PM2.5 เท่ากับ 253.33 วินาที และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระดาษกรองที่ผ่านการเคลือบกับไม่ผ่านการเคลือบพบว่ากระดาษกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO50% มีประสิทธิภาพดีกว่ากระดาษกรองที่ไม่เคลือบถึง 50.98% และกระดาษกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100% ประสิทธิภาพดีกว่ากระดาษกรองที่ไม่เคลือบ 40.00%, 26.33% และ 22.22% ตามลำดับ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ 60000

Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Mueang District, Nakhon Sawan Province 60000

*corresponding author e-mail: dusadee.k@nsru.ac.th

Received: 8 February 2024; Revised: 9 April 2024; Accepted: 14 April 2024

DOI: <https://doi.org/10.14456/lsej.2024.12>

จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ – รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบฟอกอากาศสำหรับการกำจัดฝุ่น PM2.5

คำสำคัญ: ไทเทเนียมไดออกไซด์ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ฝุ่น PM2.5

Abstract

This research will study the efficiency of air filters coated with titanium dioxide – reduce graphene oxide composite for removing PM2.5 dust. To compare the efficiency of air filter paper coated with titanium dioxide - reducing graphene oxide in various ratios (TiO₂100%, TiO₂-RGO25%, TiO₂-RGO50% and RGO100%) and uncoated filter paper. The experiment used air filters coated with such sample composite and without coating to remove dust into the vacuum box with a volume of 18 liters and an air flow rate of 0.045 liters per second. The dust PM2.5 concentration inside the box starts at 600 micrograms per cubic meter. During the dust removal experiment, the concentration of dust inside the chamber was measured every 5 seconds until the dust concentration remained constant without further reduction. The experimental results showed that Air filter paper coated with TiO₂-RGO50% has the fastest efficiency in removing PM2.5, with an average removal time of PM2.5 of 253.33 seconds. Comparing the coated filter papers with uncoated ones reveals that the TiO₂-RGO50% coated paper outperforms the uncoated paper by 50.98%. Additionally, TiO₂-RGO25%, TiO₂100%, and RGO100% coated papers perform better than uncoated papers by 40.00%, 26.33%, and 22.22%, respectively. These test results indicate that air filter sheets coated with titanium dioxide-RGO composite are suitable for air purification systems targeting PM 2.5 removal.

Keywords: titanium dioxide, reduce graphene oxide, PM2.5 dust

บทนำ

ในปัจจุบันฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน หรือ PM2.5 เป็นสารมลพิษทางอากาศที่มีผลกระทบต่อสุขภาพมากที่สุดในการบรรดาสารมลพิษทางอากาศโดยทั่วไป ด้วยขนาดที่เล็กมากทำให้สามารถถูกสูดเข้าลึกถึงระบบทางเดินหายใจและปอด บางอนุภาคยังอาจเข้าสู่กระแสเลือดไหลเวียนไปทั่วร่างกาย ทำให้ผู้ที่สูดฝุ่นละอองเข้าไปในระยะหนึ่งจะทำให้เกิดโรค เช่น โรคภูมิแพ้ โรคหลอดเลือดในสมอง โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง โรคมะเร็งปอด โรคติดเชื้อเฉียบพลันในระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น (Department of Disease Control, 2021) ส่วนประกอบของฝุ่น PM2.5 มีความซับซ้อนอย่างยิ่ง มีทั้งสารอินทรีย์ เช่น โลหะหนักและโลหะทรานซิชัน ฮาตุคาร์บอน และเกลือซัลไฟริก/ไนตริก/แอมโมเนีย สารอินทรีย์ เช่น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และส่วนประกอบทางชีวภาพ เช่น เชื้อรา สปอร์ และไวรัส เป็นต้น การลดปริมาณฝุ่น PM2.5 จึงเป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วนเป็นอย่างยิ่ง

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบฟอกอากาศสำหรับการกำจัดมลพิษทางอากาศ โดยทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น TiO_2 ZnO Fe_2O_3 เป็นต้น ลงบนแผ่นกรองอากาศ โดยทั่วไปการฟอกอากาศด้วยแผ่นกรองอากาศเป็นเพียงการดักจับอนุภาคของฝุ่นไว้กับตัวแผ่นกรองเท่านั้น เมื่อใช้ไปนาน ๆ แผ่นกรองจะเต็มอากาศจะไม่สามารถผ่านเข้าไปได้อีกและจะต้องเปลี่ยนแผ่นกรองใหม่ แต่ถ้ามีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในอากาศมาเคลือบไว้บนผิวของแผ่นกรองอากาศก็จะทำให้แผ่นกรองอากาศเต็มช้าลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากับอากาศก่อนที่มันจะเปื้อตเกาะที่ผิวของแผ่นกรองอากาศ เป็นการยืดอายุการใช้งานให้กับแผ่นกรองอากาศ

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ ไม่ว่าจะเป็นงานของ Sujaridtham et al., (2012) ที่ได้ทำการกำจัดสารโพลีอินในอากาศ โดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลือบบนกระดาษกรองใยแก้ว ผลปรากฏว่ากระดาษกรองใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโพลีอินภายใต้รังสียูวี และงานของ Maneea and Homklin, (2020) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารโพลีอินในอากาศ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ โด๊ปไนโตรเจนและซิลิกอน เคลือบบนแผ่น HEPA พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกโด๊ปด้วยไนโตรเจนและซิลิกอน สามารถกำจัดสารโพลีอินได้ดีกว่าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้จากงานของ Khamboonrueang et al., (2018) ได้นำสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ริดิซกราฟีนออกไซด์ ($\text{TiO}_2\text{-RGO}$) มากำจัดสารโครเมียมเฮกซะวาเลนส์ในน้ำเสีย พบว่าสารประกอบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารโครเมียมเฮกซะวาเลนส์ได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์และริดิซกราฟีนออกไซด์เพียงอย่างเดียว และจากการทบทวนวรรณอื่น ๆ พบว่ามีการนำเอาสารประกอบ $\text{TiO}_2\text{-RGO}$ ไปประยุกต์ใช้หลายด้านด้วยกันโดยเฉพาะการกำจัดมลพิษทางน้ำ คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึง

ความเป็นไปได้ที่จะนำเอาสารประกอบ TiO_2 -RGO มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ และจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ยังไม่มีรายงานการศึกษาการนำสารประกอบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ในอากาศเลย คณะผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการเตรียมสารประกอบ TiO_2 -RGO โดยใช้วิธีโซลโวเทอร์มอล เนื่องจากวิธีโซลโวเทอร์มอลเป็นวิธีการที่ง่ายและสามารถเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ไปเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปพร้อมกับทำการโหลดเอาอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ในกระบวนการเดียว (Cheng et al., 2011) เมื่อสังเคราะห์สารประกอบตัวอย่างแล้วเสร็จก็จะนำสารประกอบตัวอย่างที่สังเคราะห์ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ แล้วนำมาเคลือบบนแผ่นกรองอากาศ HEPA สาเหตุที่เลือกใช้โดยแผ่นกรองอากาศ HEPA มาเคลือบสารประกอบตัวอย่าง เนื่องมาจากแผ่นกรองอากาศ HEPA เป็นแผ่นกรองอากาศที่นิยมใช้กำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ สามารถดักจับอนุภาคของฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 3 ไมครอนและการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไปเคลือบบนแผ่น HEPA ทำให้ประยุกต์ใช้งานได้ง่ายต่อการนำไปในการกำจัดมลพิษในอากาศชนิดอื่น (Maneea & Homklin, 2020) จากนั้นนำแผ่นกรองอากาศที่ผ่านการเคลือบแล้วนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ เปรียบเทียบกับแผ่นกรองอากาศที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ และใช้ควันธูป (incense smoke) เป็นฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ตัวอย่างที่ต้องกำจัดเนื่องจากควันธูปเป็นฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 – 10 ไมครอนเมตร และสามารถควบคุมแหล่งกำเนิดและปริมาณควันธูปที่จะใช้ได้ง่าย

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับการดำเนินการวิจัย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) รุ่น: Quanta 450 เนเธอร์แลนด์ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometers: XRD) รุ่น: D8 Advance เยอรมัน เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultra violet - visible spectrophotometer: UV-vis) รุ่น Perkin Elmer Lambda 650 ผลิตโดยบริษัท Waltham สหรัฐอเมริกา และชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กราฟีนออกไซด์ (GO) ที่เตรียมด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ที่ปรับปรุงแล้ว น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) Anatase Titanium dioxide (TiO_2) A103 เกรด Lab บริษัท Tianen Chemicals Co.,Ltd (Yahoo: MAISIE008) เอทานอล (Ethanol: $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) $\geq 99.97\%$ เกรด AR บริษัท MERCK และควันธูป (incense smoke)

การเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะถูกเตรียมโดยวิธีการโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal method) เริ่มจากละลายกราฟีนออกไซด์ จำนวน 0.025 กรัมในเอทานอลจำนวน 60 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเติมไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 0.075 กรัมลงในสารละลายกราฟีนออกไซด์ กวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม

เข้ากันกับกราฟีนออกไซด์ เทสารผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์กับกราฟีนออกไซด์ลงในภาชนะเทฟลอน แล้วบรรจุลงในหม้อนึ่งอัดไอ (Teflon-lined stainless steel autoclave) ปิดฝาให้สนิทแล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำสารละลายดังกล่าวไปกรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลาย ๆ ครั้ง จน pH เป็นกลาง จากนั้นนำสารที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

กระบวนการเคลือบแผ่นกรองอากาศด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์

ในขั้นตอนการเคลือบแผ่นกรองอากาศใช้วิธีการเคลือบแบบสเปรย์ เริ่มด้วยการนำผงตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ - กราฟีนออกไซด์สัดส่วนต่าง ๆ ปริมาณ 2 มิลลิกรัมกับเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร (2%w/v) จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการสเปรย์ลงบนกระดาษกรอง 2 รอบ (เคลือบ 2 ชั้น) ระยะห่างระหว่างแผ่นกรองอากาศกับหัวสเปรย์เท่ากับ 30 เซนติเมตร แล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่างด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เริ่มจากนำสารตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์มาบดให้ละเอียดเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง ทำให้ได้ผลของการวิเคราะห์แม่นยำยิ่งขึ้น แล้วนำสารตัวอย่างบรรจุลงในช่องใส่สารตัวอย่าง (Sample holder) ใช้กระจกสไลด์กดปิดผิวหน้าให้เรียบก่อนนำไปเข้าเครื่อง XRD โดยวิเคราะห์ค่ามุม 2θ ในช่วง 5 – 90 องศา

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นการศึกษาพื้นฐานวิทยาของสารตัวอย่าง นำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ละลายในเอทานอลแล้วสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อกระจายอนุภาค แล้วดูดสารตัวอย่างมาหยดลงบนอุปกรณ์รองรับสารตัวที่เรียกว่า สดับที่ได้ติดแผ่นอะลูมิเนียมที่ผิวของสดับก่อนหยดสารละลายตัวอย่างจำนวน 1 - 2 หยด ทิ้งให้แห้ง จากนั้นนำสดับไปเคลือบทองเพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าได้จะได้อุปกรณ์ที่คมชัดขึ้น นำสารตัวอย่างที่เคลือบทองแล้วไปตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้อง SEM พร้อมทั้งเลือกภาพ บริเวณและจุดที่สนใจ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เป็นการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างด้วยเครื่อง UV-vis เริ่มจากนำสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มาบดให้ละเอียดก่อนอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วเทสารตัวอย่างลงบนสก็อตเทปใสด้านที่มีกาว เคาะแผ่นสก็อตเทปเพื่อให้สารตัวอย่างที่ไม่ติดสก็อตเทปออก ทำซ้ำจนกระทั่งสารตัวอย่างกระจายเต็มทั่วแผ่นสก็อตเทป ให้สารตัวอย่างที่ติดบนสก็อตเทปไม่หนาจนทำให้แสงทะลุผ่านไม่ได้ แล้วนำสก็อตเทปอีกแผ่นมาปิดทับแล้วนำสารตัวอย่างไปตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-vis

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิซกราฟีนออกไซด์

การทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิซกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับกระดาษกรองที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น PM2.5 ที่ถูกประยุกต์มาจากการงานของ Tapia-Brito et al., (2023) และ Sujaridtham et al., (2012) ดังภาพที่ 1 (Figure 1)

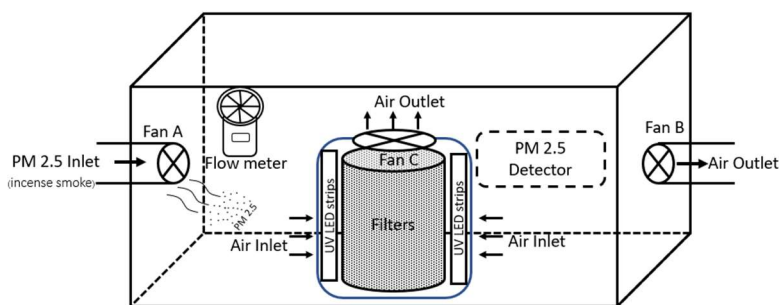


Figure 1 PM2.5 Dust removal Setup

จากภาพที่ 1 (Figure 1) ชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น PM2.5 โดยเริ่มจากดูดอากาศออกจากตัวพัดลม B ทำให้ภายในกล่องปริมาตร 18 ลิตร มีสภาพสุญญากาศ (ปิดพัดลม B) จากนั้นดูดฝุ่น PM2.5 (ควินรูป) ด้วยพัดลม A จากภายนอกกล่องเข้าสู่ภายในกล่อง จนกระทั่งได้ปริมาณฝุ่น PM2.5 ภายในกล่องเท่ากับ 600 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กำหนดให้เป็นปริมาณฝุ่นเริ่มต้น (ปิดพัดลม A) จากนั้นเปิดชุดอุปกรณ์กรองอากาศที่มีแผ่นกรองอากาศที่ยังไม่ผ่านการเคลือบและหลอดยูวีซี (UVA) ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร (14.4 W/m^2) ติดตั้งอยู่ภายใน อัตราการไหลของอากาศ 0.045 ลิตรต่อวินาที ทำการวัดปริมาณฝุ่นภายในกล่องทุก ๆ 5 วินาที จนกระทั่งปริมาณฝุ่นในกล่องมีค่าคงที่และไม่ลดลงอีกแล้ว ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนแผ่นกรองที่ไม่ผ่านการเคลือบแผ่นใหม่เพื่อยืนยันผล จากนั้นเปลี่ยนชนิดของแผ่นกรองอากาศเป็นแผ่นกรองอากาศที่ผ่านการเคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิซกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของสารตัวอย่าง

การวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 100%), สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิซกราฟีนออกไซด์ ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน (TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50%) และกราฟีนออกไซด์ (RGO100%) ด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ได้ผลดังภาพที่ 2 (Figure 2)

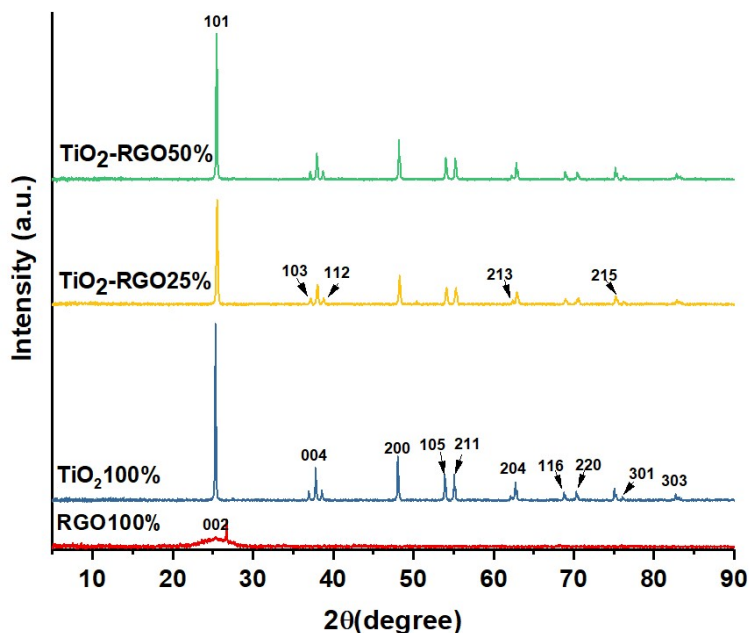


Figure 2 XRD spectra of TiO_2 -RGO25% and TiO_2 -RGO50%

ภาพที่ 2 (Figure 2) แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ ผลจากการวิเคราะห์ TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50% พบว่า มีค่ามุมการเลี้ยวเบนที่ 2θ เท่ากับ 27° , 36° , 39° , 41° , 44° , 54° , 56° , 62° , 64° , 69° และ 82° ตรงกับระนาบการสะท้อน (100), (200), (103), (004), (112), (105), (211), (213), (204), (116), (220), (215), และ (303) ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ด้วยเครื่อง SEM

ผลการวิเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ด้วยเครื่อง SEM เมื่อนำสารประกอบ TiO_2 100%, สารประกอบ TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50% และ RGO100% วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะได้ผลการวิเคราะห์ ดังภาพที่ 3 (Figure 3)

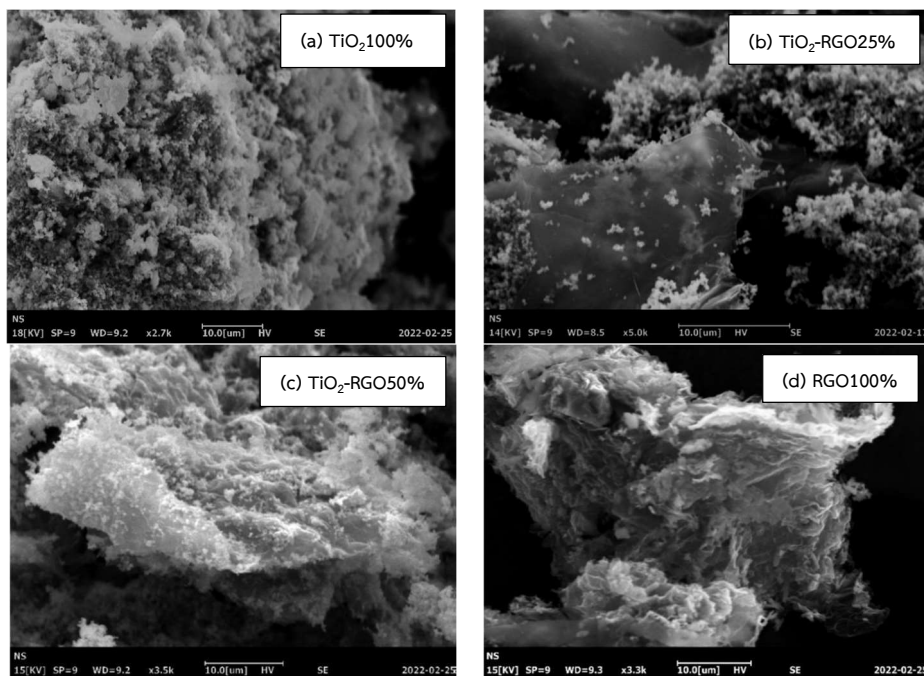


Figure 3 SEM image of (a) TiO_2 100% (b) TiO_2 -RGO25% (c) TiO_2 -RGO50% (d) RGO100%

จากภาพที่ 3 (Figure 3) แสดงภาพ SEM ภาพที่ 3 (Figure 3) (a) TiO_2 100% แสดงให้เห็นว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นอนุภาคเล็ก ๆ ภาพที่ 3 (Figure 3) (d) RGO100% แสดงให้เห็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีลักษณะเป็นคล้ายแผ่นกระดาษบาง ๆ ที่ยับเป็นชั้น ๆ และภาพที่ 3 (Figure 3) (b) TiO_2 -RGO25% และภาพที่ 3 (Figure 3) (c) TiO_2 -RGO50% แสดงให้เห็นอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 100%) สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50%) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO100%) โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Ultra violet - visible spectrophotometer: UV-vis) ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 4 (Figure 4) โดยภาพที่ 4 (Figure 4) (a) แสดงยูวีสเปกตรัมของการดูดกลืนของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงช่วงวิสิเบิล โดยมีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 397 – 447 นาโนเมตร และยูวีสเปกตรัมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 268 นาโนเมตร สอดคล้องกับผลการทดลองของ Chang et al. (2011) และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปทำการคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) สมการที่ (1)

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

โดยที่ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

ν คือ ความถี่ของโฟตอน

A คือ ค่าคงที่

และ E_g คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

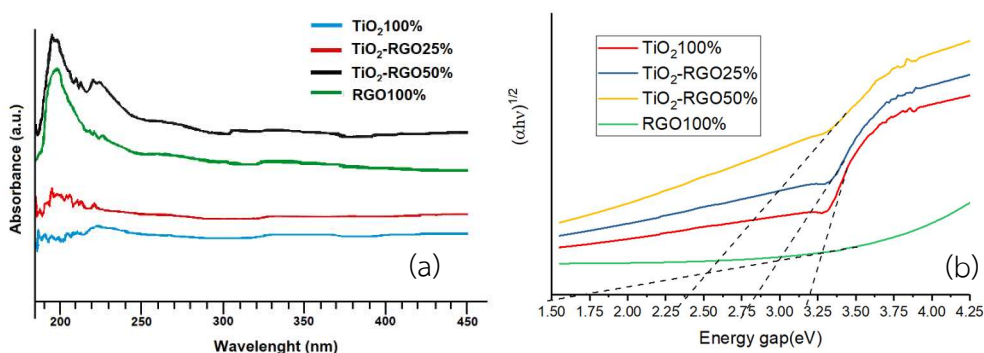


Figure 4 (a) UV-Vis Spectrum of TiO₂100%, TiO₂-RGO25%, TiO₂-RGO50% and RGO100%

(b) The Energy Gap of TiO₂100%, TiO₂-RGO25%, TiO₂-RGO50% and RGO100%

จากภาพที่ 4 (Figure 4) (b) เป็นการนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเขียนกราฟแล้วทำการลากเส้นตรงมาตัดกราฟที่ตำแหน่ง $(\alpha h\nu)^{1/2}=0$ จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์จะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO₂ เท่ากับ 3.199 eV, TiO₂-RGO25% เท่ากับ 2.853 eV, TiO₂-RGO50% เท่ากับ 2.405 eV และ RGO เท่ากับ 1.690 eV สอดคล้องกับผลการทดลองของ Abid et al. (2018)

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมออกไซด์ – ไรดิซกราฟีนออกไซด์

ในการงานวิจัยนี้ได้ทำการในการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิซกราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ และไรดิซกราฟีนออกไซด์ แล้วทำการเปรียบเทียบกับแผ่นกรองอากาศที่ไม่ผ่านการเคลือบ ด้วยชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น PM2.5 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 The results of testing the efficiency of air filter paper coated with TiO_2 100%, TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50%, RGO100% and Uncoated.

Type of air filter	Time used for PM2.5 dust removal (s)				
	Instance 1	Instance 2	Instance 3	$\bar{x}$	S.D.
Uncoated	385	415	390	396.67	16.07
Coated with TiO_2 100%	305	310	310	308.33	2.89
Coated with TiO_2 -RGO25%	275	265	270	270.00	5.00
Coated with TiO_2 -RGO50%	255	250	255	253.33	2.89
Coated with RGO100%	315	320	315	316.67	2.89

จากตารางที่ 1 (Table 1) พบว่า แผ่นกรองอากาศทุกชนิดสามารถกำจัดฝุ่น PM2.5 ได้ 99.67% ภายในเวลา 450 วินาที โดยแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO50% มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM2.5 เร็วที่สุด มีค่าเฉลี่ยของเวลาในการกำจัดฝุ่น PM2.5 เท่ากับ 253.33 วินาที ส่วนแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100% และกระดาษกรองที่ไม่ได้เคลือบ มีค่าเฉลี่ยของเวลาในการกำจัดฝุ่น PM2.5 เท่ากับ 270.00, 308.33, 316.67 และ 396.67 วินาทีตามลำดับ

อภิปรายผล

จากการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิฟกราฟีนออกไซด์ ในการกำจัดฝุ่น PM2.5 โดยทำการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิฟกราฟีนออกไซด์ ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน (TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50%) และไรดิฟกราฟีนออกไซด์ (RGO) ได้ถูกเตรียมโดยวิธีการโซลโวเทอร์มอล จากนั้นนำสารตัวอย่างไปวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM โครงสร้างสารด้วยเครื่อง XRD วิเคราะห์ลักษณะการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis และทดสอบการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM2.5 ของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิฟกราฟีนออกไซด์ ในอัตราส่วนต่าง ๆ เปรียบเทียบกับกระดาษกรองที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น PM2.5

ผลการวิเคราะห์ XRD ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - ไรดิฟกราฟีนออกไซด์ ปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน (TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50%) ในภาพที่ 2 (Figure 2) จะแสดงระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ TiO_2 -RGO25% และ TiO_2 -RGO50% ในทุกอัตราส่วนตรงกับระนาบของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นชนิดอะนาทาส (Anatase phase) ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Khalid et al., (2013) และ Tan et al., (2013) และจะไม่สังเกตเห็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไรดิฟกราฟีนออกไซด์แต่จะเห็นเพียงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไทเทเนียม

ไดออกไซด์เท่านั้น สาเหตุน่าจะมาจากการที่สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสูงของพีคที่สูงกว่าพีคของสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มาก ๆ จึงไม่สามารถสังเกตเห็นสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในกราฟได้ และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่างช่วยเป็นการยืนยันว่าวิธีการโซลโวลเทอร์มอล สามารถเปลี่ยนกราฟีนออกไซด์ให้กลายเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (โดยกราฟีนออกไซด์มีมุมการเลี้ยวเบนอยู่ที่ประมาณ 10.2° ตามงานของ Khamboonrueang et al., (2018) และโพลดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ไปที่ผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ได้ด้วยกระบวนการเดียว

ผลการวิเคราะห์ สารประกอบ TiO_2 -RGO25% และ TiO_2 -RGO50% ด้วยเครื่อง SEM ในภาพที่ 3 (Figure 3) จะเห็นการอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งถือเป็นข้อดีเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสารที่ต้องการกำจัด (มลพิษ) และทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ง่ายขึ้น และเมื่อปริมาณของกราฟีนออกไซด์เพิ่มมากขึ้นการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ก็จะกระจายตัวได้มากขึ้นด้วยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khamboonrueang et al., (2018)

และเมื่อนำผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบ TiO_2 , TiO_2 -RGO25%, TiO_2 -RGO50% และ RGO ไปทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap) มาเขียนกราฟดังภาพที่ 4 (Figure 4) (b) ผลที่ได้จะเห็นว่าเมื่อเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีโอกาสหลุดจากการกระตุ้นด้วยแสงได้ง่ายขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพย่อยสลายมลพิษในอากาศให้กับไทเทเนียมไดออกไซด์

ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอัตราส่วนต่าง ๆ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ แล้วทำการเปรียบเทียบกับแผ่นกรองอากาศที่ไม่ผ่านการเคลือบ ดังตารางที่ 1 (Table 1) พบว่ากระดาศกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO50% มีประสิทธิภาพดีกว่ากระดาศกรองที่ไม่เคลือบถึง 50.98% และกระดาศกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100% มีประสิทธิภาพดีกว่ากระดาศกรองที่ไม่เคลือบ 40.00%, 26.33% และ 22.22% ตามลำดับ สาเหตุที่สารประกอบ TiO_2 -RGO50% สามารถกำจัดฝุ่น PM2.5 ได้ดีที่สุดในเชิงมากจากการที่สารประกอบ TiO_2 -RGO50% มีช่องว่างแถบพลังงานที่แคบและมีพื้นที่สำหรับการสัมผัสฝุ่น PM2.5 ที่มากกว่าสารประกอบ TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100%

และการที่สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถกำจัดฝุ่น PM2.5 ได้นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการกำจัดฝุ่น PM2.5 ของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ซึ่งเริ่มเมื่อสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ - รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ถูกกระตุ้น

ด้วยแสง ($h\nu$) โดยสารประกอบดังกล่าวจะดูดซับพลังงานจนทำให้มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของมัน อิเล็กตรอน (e^-) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (VB) จะถูกกระตุ้นให้กระโดดไปยังแถบการนำ (CB) เมื่อแถบวาเลนซ์ขาดอิเล็กตรอนไปจะเหลือโฮล (h^+) เมื่อโฮลสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในอากาศ โฮลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ทำให้ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลจะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนที่อยู่ในฝุ่น $PM_{2.5}$ ทำให้ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์มลพิษกลายเป็นน้ำ ส่วนอิเล็กตรอนไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน (O_2^-) แล้วซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนจะทำออกซิไดซ์กับคาร์บอนในฝุ่น $PM_{2.5}$ ทำให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Pant et al., 2019) ดังแสดงในภาพที่ 5 (Figure 5)

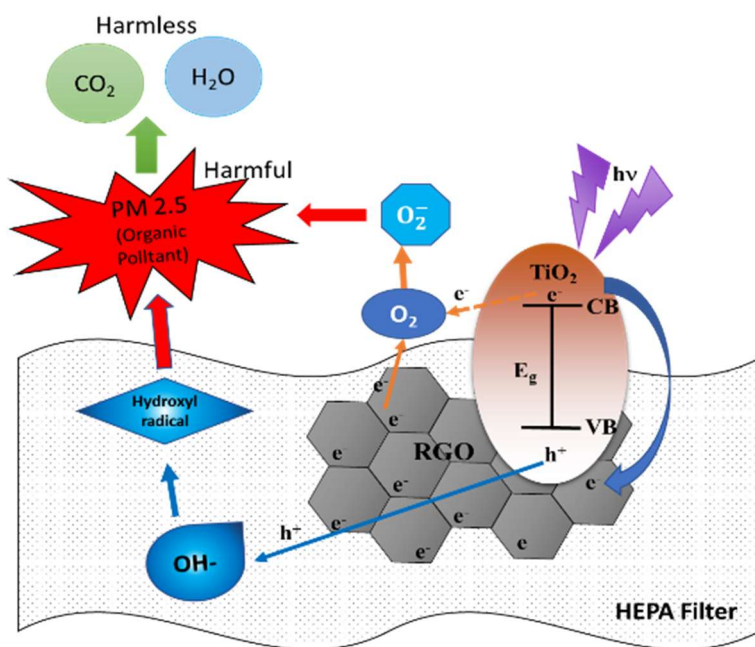


Figure 5 Schematic of TiO_2 -RGO on HEPA filter for removal $PM_{2.5}$

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบ TiO_2 100%, TiO_2 -RGO 25%, TiO_2 -RGO 50% และ RGO 100% ในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ เปรียบเทียบกับแผ่นกรองอากาศที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยในการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ จะใช้ชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ให้กระดาษรองที่ไม่เคลือบเป็นชุดควบคุม ผลการทดสอบพบว่า แผ่นกรองอากาศทุกชนิดทั้งผ่านการเคลือบและไม่เคลือบสามารถกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ภายในเวลา 450 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น 99.67% และแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO 50% มีประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ เร็วที่สุด มีค่าเฉลี่ยของเวลาในการกำจัดฝุ่น $PM_{2.5}$ เท่ากับ

253.33 วินาที รองลงมาเป็นแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100% และกระดาษกรองที่ไม่ได้เคลือบ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระดาษกรองที่ผ่านการเคลือบกับไม่ผ่านการเคลือบพบว่ากระดาษกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO50% มีประสิทธิภาพดีกว่ากระดาษกรองที่ไม่เคลือบ 50.98% และกระดาษกรองที่เคลือบด้วย TiO_2 -RGO25%, TiO_2 100%, RGO100% ประสิทธิภาพดีกว่ากระดาษกรองที่ไม่เคลือบ 40.00%, 26.33% และ 22.22% ตามลำดับ จากผลการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่าแผ่นกรองอากาศที่เคลือบด้วยสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ – รีดิคัลกราฟีนออกไซด์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบฟอกอากาศสำหรับการกำจัดฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวก และสนับสนุนอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวัด งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Abid SP, Islam SS, Mishra P, Ahmad S. Reduced graphene oxide (rGO) based wideband optical sensor and the role of Temperature, Defect States and Quantum Efficiency. Scientific Reports 2018;8:3537.
- Chang BYS, Huang MN, Anant AR, Marlinda Y, Norazriena MR, Muhamad I, et al. Facile hydrothermal preparation of titanium dioxide decorated reduced graphene oxide nanocomposite. International Journal of Nanomedicine. Publishing;2012:3379.
- Cheng P, Yang Z, Wang H, Cheng W, Chen M, Shangguan W, Ding G. TiO_2 -graphene nanocomposites for photocatalytic hydrogen production from splitting water. International Journal of Hydrogen Energy 2011;37(3):2224-2230.
- Department of Disease Control. Department of Disease Control is concerned about public health during the period of dust exposure We provide instructions on how to stay safe from small particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) dust and advise checking the dust levels before leaving the house each time, 2021. Available at: <https://www.ddc.moph.go.th/brc/news.php?news=16657&deptcode>. Accessed March 25, 2023.
- Khalid NR, Ahmed E, Hong Z, Sana L, Ahmed M. Enhanced photocatalytic activity of graphene- TiO_2 composite under visible light irradiation. Current Applied Physics 2013;13(4):659-663.
- Khamboonrueang D, Srirattanapibul S, Tang I-M, Thongmee S. TiO_2 ·rGO nanocomposite as a photo catalyst for the reduction of Cr^{6+} . Materials Research Bulletin 2018;107:236-241.
- Maneea P, Homklin S. Removal of toluene in air by photocatalysis using titanium dioxide doped N-Si coated on HEPA Filter. Proceeding the 19th National Environmental Conference. The Heritage Chiang Rai, Thailand, May 27 - 29 2020:384-389.

- Pant B, Park M, Park SJ. Recent Advances in TiO₂ Films Prepared by Sol-gel Methods for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Antibacterial Activities. *Coatings* 2019;9:613.
- Sergey DS, Gilje K, Wang VC, Tung K, Cha AS, Hall J, et al. A One-Step, solvothermal reduction method for producing reduced graphene oxide dispersions in organic solvents. *ACS Nano* 2010 4(7):3845-3852.
- Sujaridtham P, Limpaseni W, Suwan M, Supothina S. Efficiency of titanium dioxide coated glass fiber filter for toluene removal by photocatalysis process. *Proceeding The 9th KU-KPS Conference, Kasetsart University Kamphaeng Sean Campus, December 6–7 2012*:497-503.
- Tan LL, Ong W, Chai S, Mohamed A. Reduced graphene oxide-TiO₂ nanocomposite as a promising visible-light-active photocatalyst for the conversion of carbon dioxide. *Nanoscale Research Letters* 2013;8(1-9):465.
- Tapia-Brito E, Riffat J, Wang Y, Wang Y, Ghaemmaghami AM, Coleman CM, et al. Experimental study of the purification performance of a MopFan-based photocatalytic air cleaning system. *Building and Environment* 2023;240:110422.