



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง หน่วยบำบัดอากาศที่ออกจากห้องความดันลบด้วยระบบตัวกลางแบบ  
คงที่และแบบเคลื่อนที่

Air Treatment Unit for Negative Pressure Room with Fixed and  
Mobile Media System

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี)

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี

ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม พื้นฐาน

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศที่ออกจากห้องความดันลบด้วยระบบตัวกลางแบบคงที่และแบบเคลื่อนที่ โดยใช้ตัวกรองภายในเครื่องที่ผลิตจากวัสดุพูนจีโอพอลิเมอร์ โดยทำการศึกษาปริมาณการผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าที่ 0 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800 850 และ 900 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเถ้าชีวมวลและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผลทำให้ค่ากำลัง ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณช่องว่างในตัวอย่าง และเมื่อนำไปทำการเผาพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้วัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความพูนเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นนำไปทำการทดสอบความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ และเชื้อแบคทีเรีย พบว่า การผสมไทเทเนียมในสารเคลือบในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 95 และมีความสามารถในการทำลายแบคทีเรีย E.coli และ S.aureus ได้ถึงร้อยละ 98 ดังนั้นจึงนำสัดส่วนนี้มาทำการผลิตตัวกลางแบบคงที่ ส่วนตัวกลางแบบผลิตจาก ABS พื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ 1805.67 ตารางมิลลิเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งมีรูปทรงเป็นแบบทรงกระบอกกลวง

เมื่อทำการออกแบบหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่จากการใช้หลักการสร้างการไหลของอากาศแบบปั่นป่วนภายใน และสร้างเส้นทางในการไหลที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดอากาศภายในหน่วยบำบัด และทำการสร้างด้วยวัสดุอะคริลิกสีดำ และทำการทดสอบในห้องความดันลบที่มีขนาด 6 x 8 เมตร จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค cyclone-based air sampling ผลการศึกษาพบว่า หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่สามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องหมดที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่สามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องได้หมดบางพื้นที่ และมีบางพื้นที่ที่อาจจะไม่มีการไหลเวียนของอากาศน้อย แต่เมื่อใช้ทั้งหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่ จะสามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องได้หมดตั้งแต่ 1 ชั่วโมง

## Abstract

This project studied the efficiency of air treatment units from negative pressure room using fixed and mobile media treatment systems using porous geopolymer material as filter. The biomass ash from power plants at 0, 10, 30, 50 and 70 by weight and calcium carbonate in the amount of 10%, 30, 50 and 70 by weight were mixed in porous geopolymer material and calcined at 800, 850 and 900 degrees Celsius. For 1 hour. The resulted show that biomass ash and calcium carbonate content as a result reduction of strength and density This is reason of increases the amount of space in the sample. After calcine at 850 °C for 1 hour increased the strength and porosity of geopolymer. Ability to organic substances treatment was found that mixing titanium in the coating at 15% by weight of coating that resulted in increased the efficiency of organic treatment by more than 95%. Ability of bacteria treatment show that was killed E.coli and S.aureus bacteria. up to 98 percent in 24 hour. This proportion is used for the production of fix media treatment. The second part made moving media from ABS. The total surface area is 1805.67 square millimeters to gram and density is 0.45 grams per cubic millimeter. which has the shape of a hollow cylinder. Design of fix media treatment units and mobile media treatment units usined the principle of generating internal turbulent air flow to increased flow path and time of air treatment within the treatment unit. Both units made from black acrylic material and were tested the performed of treatment in a negative pressure chamber size of 6 x 8 m. using cyclone-based air sampling technic. The results showed that fix media treatment units can treat microorganisms in the room within 2 hours, while mobile media treatment units can treat microorganisms in some areas. When using both fix media treatment unit and mobile treatment unit can treat all microorganisms in the air in the room from 1 hour

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ทุนสนับสนุนด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ พ.ศ.2564 ภายใต้รหัสโครงการ FRB640008 นอกจากนี้ยังได้รับการสนับสนุนการใช้พื้นที่ และเครื่องมือในการทำโครงการวิจัยจากห้องปฏิบัติการนวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม และวัสดุก่อสร้างอัจฉริยะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ราชบุรี) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์

หัวหน้าโครงการ

วันที่ 29 กันยายน 2565

## สารบัญ (Table of Contents)

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ (Table of Contents)	ง
สารบัญตาราง (List of Tables)	จ
สารบัญภาพ (List of Illustrations)	ฉ - ช
<b>บทนำ (Introduction)</b>	<b>1</b>
<b>ทฤษฎีและ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย</b>	
- เทคโนโลยีการทำความสะอาดตัวเอง	2 – 6
- หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด	6 – 7
- การฆ่าเชื้อด้วยยูวี	8
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8 – 10
<b>วิธีดำเนินการวิจัย (Materials and Method)</b>	
- วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	10 – 13
- การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์	13
- วิธีการทดสอบ	13 – 15
<b>ผลการศึกษา</b>	<b>15 – 53</b>
<b>สรุปผลการศึกษา</b>	<b>53 - 54</b>
<b>ข้อเสนอแนะ</b>	<b>54</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>55 – 57</b>

## สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ล้อย่านหินบิทูมินัส และเก้าอี้ฉนวน	11
ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่น และร้อยละความพรุนของตัวกลางที่มีการเคลือบไทเทเนียมในปริมาณต่าง ๆ	20
ตารางที่ 3 ร้อยละประสิทธิภาพการทำลายแบคทีเรียของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเก้าอี้ฉนวนและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์	24
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการประเมินผลการทำลายทำลายแบคทีเรียเชิงปริมาณของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเก้าอี้ฉนวน	25
ตารางที่ 5 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่	46
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่	46
ตารางที่ 7 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่	49
ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่	49
ตารางที่ 9 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง	52
ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง	53

## สารบัญภาพ (List of Illustrations)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของแก้วลอยถ่านหินปิภูมินัส	11
รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของแก้วซีวมวลจากโรงไฟฟ้า	12
รูปที่ 3 ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วซีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนตที่อายุ 28 วัน	16
รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วซีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนต	18
รูปที่ 5 ค่ากำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วซีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	19
รูปที่ 6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู	22
รูปที่ 7 ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้แสงยูวีของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์	22
รูปที่ 8 ตัวกรองอากาศเซรามิกจากวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วซีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนต	26
รูปที่ 9 รูปจำลองของตัวกลางแบบเคลื่อนที่	27
รูปที่ 10 รูปจำลองของตัวกลางแบบเคลื่อนที่	28
รูปที่ 11 ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	29
รูปที่ 12 หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่	30
รูปที่ 13 รายละเอียด ขนาด และตำแหน่งของอุปกรณ์หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่	31
รูปที่ 14 ขั้นตอนการผลิตหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	32
รูปที่ 15 โครงสร้างภายนอกของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	33
รูปที่ 16 โครงสร้างภายในของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	34
รูปที่ 17 โครงสร้างภายใน ส่วนกรองอากาศของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	35
รูปที่ 18 โครงสร้างภายใน ส่วนบำบัดของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	35

## สารบัญญภาพ (List of Illustrations) (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 19 โครงสร้างนอกแบบไม่แยกส่วนของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	36
รูปที่ 20 การไหลของอากาศผ่านหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	36
รูปที่ 21 แบบ 2 และ 3 มิติของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	37
รูปที่ 22 รายละเอียด ขนาด และตำแหน่งของอุปกรณ์หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	38
รูปที่ 23 รายละเอียดหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ในส่วนที่ 1	39
รูปที่ 24 โครงสร้างภายนอกของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	40
รูปที่ 25 การไหลของอากาศในหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่	41
รูปที่ 26 หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ และแบบเคลื่อนที่	42
รูปที่ 27 ตัวอย่างโมเดลจากสมการ การออกแบบ และการรับแรงแต่ละพื้นที่	43
รูปที่ 28 แบบการเก็บคุณภาพอากาศจากหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ และแบบไม่เคลื่อนที่	43
รูปที่ 29 แผนผังการทดสอบหน่วยบำบัดอากาศทั้งสองแบบ	44
รูปที่ 30 แผนผังการทดสอบหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่	45
รูปที่ 31 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่	48
รูปที่ 32 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง	41



## บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ซึ่งเป็นเชื้อโรคอุบัติใหม่ ที่สามารถแพร่กระจายได้ในอากาศ ครอบคลุมในทุกพื้นที่ทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทยที่มีผู้ติดเชื้อไปแล้วไม่น้อยกว่าหลักพันราย และมีจำนวนผู้เสียชีวิตเพิ่มขึ้นเป็นระยะ จากความสามารถในการแพร่กระจายของโรคโควิด-19 ในอากาศนั้น ทำให้ไม่สามารถที่จะรักษาผู้ป่วยที่ติดเชื้อมาร่วมกับผู้ป่วยประเภทอื่นได้นอกจากนั้นผู้ป่วยที่มีอาการของโรคอื่นอยู่อาจจะมีโอกาสที่จะเสียชีวิตได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในช่วงระยะเวลาที่ทำการรักษาผู้ป่วยโรคนี้อาจจะต้องมีการแยกพื้นที่การรักษาอย่างชัดเจน และบุคลากรทางการแพทย์ที่เข้าทำการรักษาจะต้องมีการป้องกันตนเองอย่างดี มิฉะนั้นบุคลากรทางการแพทย์จะติดเชื้อจากการรักษาผู้ป่วยได้ ซึ่งปัจจุบันมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การรักษาผู้ป่วยมีประสิทธิภาพ และไม่เกิดการแพร่กระจายของเชื้อโรคออกสู่ภายนอกนั้น จะต้องทำการรักษาผู้ป่วยในห้องแยกโรคความดันลบ (Negative pressure room) เนื่องจากภายในห้องจะถูกปรับความดันอากาศมีค่าต่ำกว่าภายนอกประมาณ 2.5 ปาสคาล เพื่อจะช่วยป้องกันไม่ให้เชื้อโรคที่อยู่ภายในห้องไม่ให้แพร่กระจายออกไปสู่ภายนอก

ปัจจุบันระบบบำบัดอากาศที่ใช้บำบัดอากาศที่ออกจากห้องความดันลบส่วนใหญ่ เป็นระบบกรอง และระบบ UVC เพียงอย่างเดียว ระบบการกรองที่อยู่ในระบบบำบัดส่วนใหญ่ใช้ตัวกรองที่มีความละเอียดสูง ซึ่งสามารถกรองฝุ่นขนาดเล็ก และขนาดของเชื้อโรคบางชนิดได้ แต่การเปลี่ยนระบบกรองทุกครั้งก็มีความเสี่ยงที่สูงเนื่องจากตัวกรองเป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรค หรือฝุ่นขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการเปลี่ยนตัวกรองก็จะต้องมีความระมัดระวัง แล้วเข้าไปในระบบที่ดีมากในระดับหนึ่ง นอกจากระบบกรองแล้วการใช้หลอด UVC ก็เป็นทางเลือกหนึ่งทำลายเชื้อโรค หรือไวรัส ซึ่งหลอด UVC จะปล่อยรังสี Ultraviolet Germicidal Irradiation โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 200-313 นาโนเมตร โดยรังสียูวีในช่วงนี้จะถูกดูดกลืนด้วย DNA ของจุลินทรีย์หรือไวรัส โดยจะไปทำลายสายโซ่ของ DNA และทำให้เกิดการขาดของพันธะ ซึ่งเป็นผลทำให้ยับยั้งการขยายพันธุ์ของเชื้อจุลินทรีย์หรือไวรัสได้ โดยคลื่นรังสีที่ดีที่สุดคือ 260 นาโนเมตร โดยประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัส ซึ่งจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติระบุว่า การจะฆ่าเชื้อโควิด-19 ให้ได้ 99.9999% จะต้องใช้หลอด UVC ที่ให้พลังงาน 3,240 จูลต่อตารางเมตร ซึ่งพลังงานที่สูงขนาดนี้ถ้าไม่มีการติดตั้งที่ถูกต้องก็อาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ นอกจากนี้การใช้หลอด UVC ที่ผิดประเภทอาจจะทำให้เกิดก๊าซโอโซน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นโครงการวิจัยนี้จึงได้มีการแนวความคิดในการพัฒนาระบบบำบัดอากาศที่ออกจากห้องความดันลบ ซึ่งอาจจะมีการปนเปื้อนของเชื้อโรค หรือไวรัสออกมาด้วยระบบการบำบัดอากาศโดยใช้ตัวกลางแบบคงที่ที่ผลิตจากวัสดุพูนจีโอพอลิเมอร์ ร่วมกับเทคโนโลยีโฟโตแคทตาลิซิส และระบบบำบัดอากาศแบบใช้ตัวกลางเคลื่อนที่ ซึ่งในการพัฒนาทั้ง 2 ระบบนี้สามารถที่จะพัฒนาต่อเป็นระบบต่อเนื่องกัน และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในห้องความดันลบขนาดใหญ่ให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งาน และเกิดความปลอดภัยกับสิ่งแวดล้อมรอบพื้นที่ห้องความดันลบ

## ทฤษฎีและ/หรือแนวความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

การออกแบบหน่วยบำบัดอากาศหลังจากห้องความดันลบออกมานั้น อาจจะมีเชื้อโรค หรือไวรัส หรือสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ออกมา ซึ่งถ้าไม่มีการบำบัดที่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการแพร่เชื้อสู่ภายนอกได้ ซึ่งแนวความคิดที่จะสร้างหน่วยบำบัดอากาศหลังจากห้องความดันลบนี้ใช้องค์ความรู้เกี่ยวกับการบำบัดแบบใช้ตัวกลางแบบคงที่ซึ่งประยุกต์เทคโนโลยีโฟโตแคท และการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวี ส่วนการบำบัดแบบตัวกลางเคลื่อนที่นั้น จะประยุกต์องค์ความรู้การเคลื่อนที่ของของแข็งในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้ตัวกลางที่มีการเคลือบด้วยสารเคลือบที่สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศได้ ซึ่งทั้ง 2 แนวคิดนี้สามารถที่จะนำมาประยุกต์ หรือต่อเชื่อมกันเป็นหน่วยบำบัดอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงได้

### เทคโนโลยีการทำความสะอาดตัวเอง

ในการสร้างสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) ให้กับวัสดุทุกชนิดทั้งที่เป็นแบบผิวเรียบ และวัสดุพูนจะต้องมีการใช้เทคนิคในการเคลือบ ปริมาณความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และโลหะที่เจือปนที่เหมาะสม ตลอดจนความหนาของชั้นฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบปฏิกิริยาโฟโตแคทและลิสท์เกิดจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalytic) โดยเคลือบผิวของวัสดุด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ซึ่งประกอบด้วย photo และ catalyst ซึ่งโฟโต หมายถึง การใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา และตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง ธาตุหรือสารที่สามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาให้เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น [1-2] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium oxide, TiO<sub>2</sub>) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดวิวิธพันธ์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะแตกต่างจากสารที่ต้องการย่อยสลาย [3] ที่อยู่ในรูปของผงหรือฟิล์ม และสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ข้อดีของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1] ได้แก่ สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนต่อกรดและด่างมีราคาค่อนข้างถูก และสามารถเตรียมในรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

กลไกการทำความสะอาดตัวเองจำเป็นต้องอาศัยหลักการของปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลซิสของสารที่สามารถถูกกระตุ้นได้ง่ายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กล่าวคือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสงไปกระตุ้นสารที่เปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกันตัวมันเอง ซึ่งสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากเมื่อสัมผัสกับแสง Ultraviolet ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide anions) ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคทและไลซิส [3] ได้แก่

- ค่าพีเอชในสารละลายซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

- ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลายทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ
- อุณหภูมิ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะเกาะยึดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ  $e^-_{cb}$  ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์เรดิคัล และทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนอ็อกไซด์ ( $H^+$ ) ต่อไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
- ความเข้มของแสง คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสงโดยตรง

การเตรียมสารกระตุ้นปฏิกิริยาในการเคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติความสามารถในการทำ ความสะอาดตนเองนั้นสามารถเตรียมได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีความแตกต่างกัน เช่น การเคลือบฟิล์มบางซึ่งมี 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 คือ การเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นโดยสร้างฟิล์มภายใต้ความดันอากาศปกติ เช่น การเคลือบแบบจุ่ม (dip coating) และการเคลือบแบบปั่น (spin coating) และวิธีที่ 2 คือ การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศ ด้วยการเคลือบแบบสปัตเตอริง (Sputtering) โดยการเคลือบแบบปั่นนั้นจะต้องอาศัยความเร็วรอบที่แตกต่างกันในการหมุนเพื่อให้ได้ น้ำหนักของฟิล์มที่เท่ากัน จึงทำให้เกิดปัญหาคือความไม่สม่ำเสมอของการเคลือบ และวิธีการสปัตเตอริงเป็นวิธีที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิและอัตราการไหลของก๊าซ ทำให้มีขั้นตอนที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเคลือบแบบจุ่มแล้วถือเป็วิธีที่สะดวกกว่า สามารถทำได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ [5] ซึ่งการระบุความหนาของชั้นเคลือบบนวัสดุรองรับ (substrate) นั้นสามารถพิจารณาจากผลของความหนาจริงของชั้นเคลือบ โดยทั่วไประบุไว้ไม่ควรเกิน 5 ไมครอน เนื่องจากเมื่อชั้นเคลือบมีความหนามากกว่า 5 ไมครอน จะทำให้แรงยึดระหว่างธาตุในเนื้อของชั้นเคลือบมีค่ามากกว่าแรงยึดระหว่างชั้นเคลือบกับวัสดุรองรับ ส่งผลให้ชั้นเคลือบหรือฟิล์มบางนั้นเกิดการแตก หรือหลุดลอกออกจากวัสดุรองรับ [6]

วัสดุที่มีการเคลือบด้วยสารไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งบนผิววัสดุเรียบ และวัสดุพูนนั้นจะสามารถเพิ่มความสามารถในการทำ ความสะอาดตนเอง ซึ่งสมบัติที่เพิ่มขึ้นมานั้นเป็นสมบัติที่ก่อให้เกิดความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทั้งนั้น ซึ่งสามารถที่จะเรียกได้ว่า Green Materials โดยสมบัติที่เพิ่มขึ้นคือ ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโนจะทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ โดยส่วนใหญ่จะมีปฏิกิริยาตอบโต้กับโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของจุลินทรีย์เป็นหลัก ทำให้เกิดการยับยั้งเจริญเติบโตของเซลล์ เกิดการทำลาย

ระบบหายใจ ระบบขนย้ายอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการเมทาโบลิซึม และระบบขนย้ายซับสเตรทในเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และตายในที่สุด [5]

นอกจากนั้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการยับยั้งมากกว่าคลอรีนถึง 3 เท่า และมากกว่าโอโซนถึง 1.5 เท่า [7] นอกจากนี้ยังสามารถฆ่าเชื้อ E.coli ที่เกาะอยู่บนฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ [8 - 12] ความสามารถด้านการจำกัดกลิ่น โดยอนุภาคไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile organic compounds, VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นบูหรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มาลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ ยูรีน น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ โดยเข้าไปทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ทำให้สารอินทรีย์แตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว ที่ไม่อันตรายและไม่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ [13] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของธีระวุฒิ มูอำหัด และคณะ [15] นอกจากนี้สมบัติอีกด้านหนึ่งคือสามารถป้องกันหยดน้ำ และคราบต่าง ๆ รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง โดยผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ เมื่อผนังตึกถูกละเลาะด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ผนังมีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเข้าไปทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และสามารถชะล้างออกจากผนังได้ง่ายเมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ [16] จากสมบัตินี้จึงแนวความคิดที่จะพัฒนาวัสดุซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้าขานอ้อย ในรูปแบบของตกแต่งทั้งภายนอก ภายในอาคาร และในพื้นที่ขนาดเล็ก โดยการเพิ่มสมบัติในการทำความสะอาดตนเอง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้มีมูลค่าเพิ่มมากขึ้น

ข้อดีของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [8] ได้แก่

1. สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์และเกิดปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สออกซิเจน
2. มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนต่อกรดและด่าง
3. มีราคาค่อนข้างถูก
4. สามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย

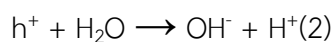
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N (N-type semiconductor) ที่สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นยูวี (280-380 นาโนเมตร) [8] โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบด้วยผลึก 3 ชนิด ได้แก่ อะนาทาส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูไคท์ (brookite) ซึ่งมีการจัดเรียงรูปร่างผลึกเป็นแบบเตตระเรฮีดรอล (tetragonal) และออร์โธโรมบิก (orthorhombic)

กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 3) มีกระบวนการที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 ขั้นตอน [6, 8, 12-13] ดังนี้

ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงาน (valence energy) อิเล็กตรอน (electron) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ (valence band) จึงถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้เกิดช่องว่างอิเล็กตรอน (hole) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังสมการที่ (1)



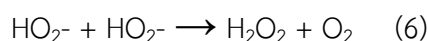
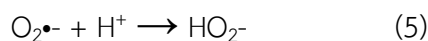
ตัวให้อิเล็กตรอน เช่น  $\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{OH}^-$  เคลื่อนที่ไปยังช่องว่างในแถบวาเลนซ์และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxide radical,  $\text{OH}^\cdot$ ) ดังสมการที่ (2) และ (3)



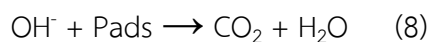
อิเล็กตรอนในแถบการนำไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน เช่น  $\text{O}_2$  และเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออน (superoxide radical ion,  $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) ดังสมการที่ (4)



ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (perhydroxyl radical,  $\text{HO}_2^\cdot$ ) ถ้าเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัลทำปฏิกิริยากันเองจะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogenperoxide,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำไฟฟ้าหรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลไอออนกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ (5) (6) และ (7) ตามลำดับ



ไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide,  $\text{CO}_2$ ) กับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ (8)



เมื่อ Pads คือ สารอินทรีย์ที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ [6, 8] มีดังนี้

1. ชนิดของโครงสร้างผลึก: โครงสร้างผลึกที่มีทั้งอะนาเทสและรูไทล์อยู่ร่วมกันทำให้การเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดี โดยอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสม คือ 300-400 องศาเซลเซียส
2. ขนาดอนุภาค: ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ซึ่งทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ไว้ที่ผิวได้มาก การเตรียมอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโน (nano) สามารถเตรียมได้จาก 2 กระบวนการ คือ

- 1) กระบวนการทางฟิสิกส์ เช่น การบดย่อย (grinding) และการสปัตเตอร์ริง (sputtering) เป็นต้น
- 2) กระบวนการทางเคมี เช่น วิธีโซล-เจล (sol-gel) และสปินโคทติ้ง (spin coating) เป็นต้น
3. ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลไอออนที่พื้นผิว: ปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นกับอุณหภูมิในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเห็นได้จากโครงสร้างผลึกอะนาเทสจะมีไฮดรอกไซด์ไอออนจำนวนมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โครงสร้างผลึกอะนาเทสต่ำ
4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดได้ดี
5. การเจือด้วยโลหะแทรนซิชันและธาตุอื่นๆ: โลหะแทรนซิชันที่เจือลงไปจะไปทำปฏิกิริยาอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้นานขึ้น อัตราการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับช่องว่างจึงลดลง นอกจากนี้การเจือโลหะแทรนซิชันและธาตุบางชนิด ยังช่วยให้สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีขาวย (400-700 นาโนเมตร) เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์มีความยาวคลื่นในช่วงยูวี ประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์

#### หลักการการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดมีหลักการทํางาน คือ มีช่องไหลตัวกลาง (อากาศ) จะไหลผ่านอนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นท่อทรงสูงก่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล เมื่อความเร็วของไหลมีความเหมาะสม อนุภาคของแข็งจะเปลี่ยนพฤติกรรมเคลื่อนที่จนมีลักษณะคล้ายกับของไหล โดยพฤติกรรมนี้เกิดจากดุลของแรงจากของไหลที่กระทำต่ออนุภาคของแข็ง และเมื่ออนุภาคของแข็งเคลื่อนมาถึงด้านบนสุดของท่อไรเซอร์ อนุภาคจะเคลื่อนออกจากท่อไรเซอร์โดยไหลมาผ่านไซโคลน ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊สโดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง ส่วนอนุภาคของแข็งที่ยังมีขนาดใหญ่จะถูกแยกโดยไซโคลนและตกลงมาในท่อดาวเนอร์ อนุภาคเหล่านี้จะถูกป้อนกลับเข้าไปในกระบวนการใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของท่อไรเซอร์ผ่านท่อป้อนกลับ

ลักษณะการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งและของไหล โดยทั่วไปรูปแบบการสัมผัสกันหรืออันตรกิริยาของอนุภาคของแข็งและของไหลสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

- 1) แบบไหลขึ้นทางเดียวกัน (Co-current upward flow) ในกรณีที่มีปริมาณการป้อนอนุภาคของแข็งน้อยหรือใช้ความเร็วของไหลสูง การสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งและของไหลภายในกระบวนการ

- 2) แบบไหลลงทางเดียวกัน (Co-current downward flow) จะพบในส่วนของ ไชโคลน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน ที่อนุภาคของแข็งและของไหลจะไหลลงตามแรงโน้มถ่วง
- 3) แบบไหลสวนทางกันโดยมีของไหลไหลขึ้น (Counter-current flow) ในกรณีที่มีปริมาณการป้อนอนุภาคของแข็งมีค่าสูงหรือใช้ความเร็วของไหลต่ำ จะเกิดการอึดตัวของอนุภาคของแข็งที่ไหลขึ้น ทำให้อนุภาคของแข็งบางส่วนแยกตัว และตกกลับลงมาบริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์

พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเหล่านี้ถูกจำแนกเป็น ระบบการไหลแบบต่าง ๆ โดยมีชื่อเรียก ระบบการไหลแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ฟลูอิด์เบดแบบปั่นป่วน เป็นระบบการไหลช่วงแรกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด เนื่องจากเริ่มมีอนุภาคของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์ โดยอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะอยู่เรียงตัวอยู่หนาแน่นที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ จะสามารถพบเห็นหน้าเบดได้ชัดเจน จะมีอนุภาคของแข็งเพียงส่วนน้อยที่หลุดออกจากท่อไรเซอร์ทางด้านบน เพราะฉะนั้น ระบบการไหลแบบนี้จึงเหมาะกับการที่ปฏิกิริยาเคมีต้องการเวลาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์
- 2) ฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง เป็นระบบการไหลที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งเฉลี่ยตามแนวความสูงของท่อไรเซอร์อย่างสม่ำเสมอ ไม่สามารถพบเห็นหน้าเบดที่ชัดเจน และมีปริมาณอนุภาคของแข็งในกระบวนการสูง โดยที่บริเวณผนังของท่อไรเซอร์จะมีปริมาณของแข็งสูงกว่าที่บริเวณกึ่งกลางท่อ ระบบการไหลนี้จะเหมาะกับการที่ปฏิกิริยาเคมีต้องการพื้นที่หรือปริมาตรในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการผสมกันที่ดีของอนุภาคของแข็งและของไหล
- 3) ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง เป็นระบบการไหลที่ดำเนินการด้วยใช้ความเร็วป้อนเข้าของไหลสูงที่สุด อนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์จะถูกพุงและยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากแรงกระทำจากของไหลภายในกระบวนการ ดังนั้น พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งที่ดำเนินการในระบบการไหลนี้ จะมีอนุภาคของแข็งในกระบวนการในปริมาณต่ำตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ อนุภาคของแข็งที่เข้ามาในท่อไรเซอร์จะถูกของไหลพาออกไปอย่างรวดเร็ว ระบบการไหลนี้จึงเหมาะกับการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งหรือเหมาะสำหรับกระบวนการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง

## การฆ่าเชื้อด้วยยูวี

โดยธรรมชาติแล้วแสงจากดวงอาทิตย์จะประกอบด้วยแสง UV 3 ชนิด ชนิดแรกคือ ยูวีเอ (UVA) เป็นแสงยูวีที่ส่องมาถึงพื้นผิวโลกมากที่สุด โดยแสง UVA สามารถทะลุผ่านผิวหนังของมนุษย์ นี่จึงเป็นสาเหตุในการทำให้เกิดการสูงวัยของผิวถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ไม่ว่าจะป็นรอยเหี่ยวย่นหรือจุดต่างดำนบนผิว ชนิดที่สอง คือ ยูวีบี (UVB) เป็นแสงที่สามารถทำอันตรายต่อดีเอ็นเอในผิวหนังมนุษย์ได้ โดยแสง UV ชนิดนี้เป็นสาเหตุของอาการผิวไหม้หรือแม้แต่การเกิดมะเร็งผิวหนัง และแสงยูวีซี (UVC) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นและมีพลังงานมากที่สุด โดยเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทุกประเภท แม้กระทั่งไวรัสขนาดเล็ก แต่มนุษย์จะไม่ได้รับผลกระทบจาก UVC เนื่องจากแสง UVC ถูกสกัดและกรองออกไปในชั้นบรรยากาศโดยไอโซนก่อนที่จะเดินทางมาถึงโลกและผิว

ปัจจุบันยังไม่มีผลการศึกษาที่ชัดเจนที่บ่งชี้ว่าแสง UVC ส่งผลต่อเชื้อไวรัส COVID-19 แต่จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า แสง UVC สามารถต้านเชื้อไวรัสโคโรนาชนิดอื่นอย่าง 'ซาร์ส' ได้ โดยรังสีนี้ส่งผลต่อโครงสร้างทางพันธุกรรมและยับยั้งไม่ให้ไวรัสทำการเพิ่มจำนวน ดังนั้นแสง UVC ที่มีความเข้มข้นสูงจึงถูกนำมาใช้ในการต่อสู้กับ COVID-19 โดยในประเทศจีน รถเมล์ทุกคันถูกทำความสะอาดสะอาดฆ่าเชื้อด้วยแสง UVC ทั้งคัน หรือตามโรงพยาบาลจะมีหุ่นยนต์ที่ฉายแสง UVC เพื่อทำความสะอาดพื้น รวมถึงตามธนาคารที่ใช้แสง UVC เพื่อฆ่าเชื้อธนบัตร ซึ่งการใช้ประโยชน์จากแสง UVC นี้ จึงทำให้อุปกรณ์สำหรับฉายแสง UVC มียอดขายเป็นประวัติการณ์ไม่ต่างจากอุปกรณ์ทางการแพทย์อื่น ๆ เลย แต่นอกจากประโยชน์ของ UVC แล้วนั้นยังมีโทษของ UVC อีกด้วย โดยแดนอาร์โนลด์ เจ้าหน้าที่จาก UV Light Technology บริษัทที่จำหน่ายอุปกรณ์ฆ่าเชื้อสำหรับโรงพยาบาล บริษัทยา และโรงงานผลิตอาหารต่างๆ ทั่วสหราชอาณาจักร ได้อธิบายว่า "รังสี UVC เป็นแสงที่อันตรายมาก ซึ่งมนุษย์ไม่ควรสัมผัสโดยตรง โดย ใช้เวลาเพียงไม่กี่วินาที หากตาโดนแสง UVC จะเหมือนกับการจ้องมองดวงอาทิตย์ในเวลาไม่กี่นาที"

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jamus และคณะ, 2015 ศึกษาการเจือไนโตรเจนและคาร์บอนในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning) ของแผ่นซีเมนต์ โดยการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือไนโตรเจนและคาร์บอนกับปูนซีเมนต์แล้วขึ้นรูปเป็นแผ่น จากนั้นนำไปทดสอบการย่อยสลายสีย้อม Monoazo dye Reactive Red 198 (RR198) ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าการเจือไนโตรเจนเล็กน้อย (1.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะสามารถดูดซับแสงในช่วงแสงสีขาวได้ดี และสามารถลดช่องว่างพลังงานทำให้การเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ดีขึ้น ซึ่งการเจือไนโตรเจนมาก (1.18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดโครงสร้างผลึกรูทิลล์ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาลดลง ขณะที่การเจือคาร์บอน 0.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะช่วยเพิ่มการดูดซับสารอินทรีย์ที่ผิวทำให้การเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ดีขึ้น นอกจากนี้การเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงสีขาวได้ดีกว่า



การเผาอุณหภูมิจึงการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดโครงสร้างผลึกรูโหลมากขึ้นและหมู่ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวลดลง

Hasmaliza และคณะ 2016 ศึกษาการเคลือบสารเคลือบที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกอะนาเทสบนแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ โดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ (dip coating) แล้วนำไปทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* พบว่า การใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ระดับไมโครทำให้สารเคลือบมีความหนืดมาก หนามาก และเกิดฟองมาก ขณะที่สารเคลือบที่ใช้อนุภาคระดับนาโนจะมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งการการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบมากขึ้น ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียจะดีขึ้น แต่ทำให้สารเคลือบหนืดเกิดรอยแตกร้าว และมีสีเหลือง

Rtimi และคณะ 2017 ศึกษาการเคลือบผิวของผ้าใยสังเคราะห์พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง โดยใช้วิธีสปัตเตอร์ริง แล้วนำไปทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (I) และทองแดง (II) สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงสีขาวยาว 500-600 และ 600-720 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.1 นาโนเมตร การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงบนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตจะใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพียง 0.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ปริมาณไทเทเนียมและทองแดง เท่ากับ 0.11 และ 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) โดยพื้นที่ผิวของชั้นเคลือบที่มีความขรุขระมาก (22.92 นาโนเมตร) จะสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียได้ดี การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสามารถยับยั้งได้ภายในเวลา 20 นาที โดยใช้สัดส่วนทองแดง (I) และทองแดง (II) เท่ากับ 12.2 และ 87.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายหลังจากยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณไทเทเนียมและทองแดงลดลงเล็กน้อย แต่ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

Zou และคณะ 2017 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กและไนโตรเจน โดยใช้เทคนิคโซโวเทอร์มอล (solvothema) จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยามาศึกษาการย่อยสลายสีย้อม Rhodamine B และ methylene blue พบว่า การเจือเหล็ก 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลในไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีขนาดผลึก 12-15 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวจำเพาะ 90-110 ตารางเมตรต่อกรัม โดย  $Ti^{4+}$  ถูกแทนที่ด้วย  $Fe^{3+}$  เนื่องจากรัศมีไอออนของ  $Fe^{3+}$  ใกล้เคียงกับ  $Ti^{4+}$  (รัศมีไอออนของ  $Fe^{3+}$  และ  $Ti^{4+}$  เท่ากับ 0.069 และ 0.075 นาโนเมตร ตามลำดับ) ซึ่งไม่พบโครงสร้างผลึกของ  $FexOy$  หรือ  $FexTiOy$  เมื่อเจือเหล็กมากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเป็นผลึกมากขึ้นและสามารถดูดซับพลังงานในช่วงความยาวคลื่นของแสงสีขาวยาว อีกทั้งยังช่วยลดพลังงานช่องว่างทำให้อัตราการรวมกันระหว่างอิเล็กตรอนกับช่องว่างลดลง ขณะที่การแทนที่ออกซิเจนด้วยไนโตรเจนเกิดได้ยาก เนื่องจากรัศมีไอออนของไนโตรเจน (1.71 อังสตรอม) ใหญ่กว่าออกซิเจน (1.4 อังสตรอม) ซึ่งเจือไนโตรเจนยังช่วยลดพลังงานช่องว่างเช่นเดียวกับการเจือด้วยเหล็ก

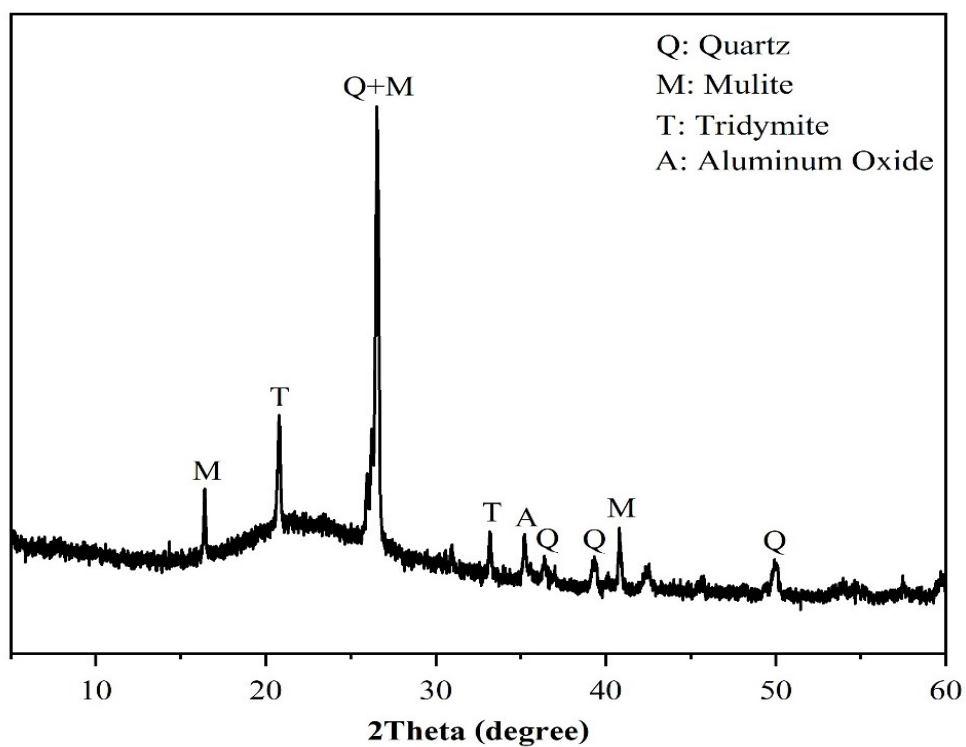
Tryba และคณะ 2010 ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน โดยใช้วิธีเคลือบเกาะด้วยแสง (photodeposition) แล้วนำมาพ่น (spray) เคลือบบนผิวคอนกรีต พบว่า การเจือเงิน (0.11-0.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะช่วยลดอัตราการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับช่องว่างและเพิ่มปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดตัวเอง เนื่องจากสามารถดูดซับสีย้อม Reactive Black ที่พื้นผิวและสามารถเกิดการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยแสงได้ดี

Niederhausern และคณะ 2013 ศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นกระเบื้อง โดยการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงินบนพื้นผิวของแผ่นกระเบื้องด้วยเทคนิคโซล-เจล พบว่า แผ่นกระเบื้องเคลือบสามารถทำความสะอาดตัวเองด้วยการฟอกสี methylene blue และยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ได้ โดยสารเคลือบจะใสไม่มีสีและมีการยึดเกาะดีพื้นผิวของแผ่นกระเบื้องดี การเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะช่วยเพิ่มความขรุขระบนพื้นผิวทำให้แผ่นกระเบื้องมีความวาวลดลง ซึ่งมุมสัมผัสระหว่างแผ่นกระเบื้องกับน้ำลดลงเนื่องจากอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้แผ่นกระเบื้องมีความชอบน้ำ (hydrophilic) มากขึ้น นอกจากนี้การเจือเงินในไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมอย่างมีนัยสำคัญ

## วิธีดำเนินการวิจัย (Materials and Method)

### วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส โดยเถ้าลอยบิทูมินัสได้มาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลานสามารถใช้ผสมปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตหรือจีโอพอลิเมอร์ได้ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF พบว่า องค์ประกอบของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน class F และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าเถ้าลอยบิทูมินัสจะประกอบด้วย Mullite (Al), Tridymite ( $\text{SiO}_2$ ), Quartz ( $\text{SiO}_2$ ) และ Aluminum Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยจะสังเกตเห็นพีคที่ชัดที่สุดอยู่ที่มุม 2 Theta ระหว่าง 26 - 28 องศา ที่แสดงให้เห็นถึงผลึกของควอตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ที่ประกอบไปด้วย  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสารประกอบที่พบสามารถเป็นสารประกอบตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับต่างเกิดเป็นจีโอพอลิเมอร์ได้

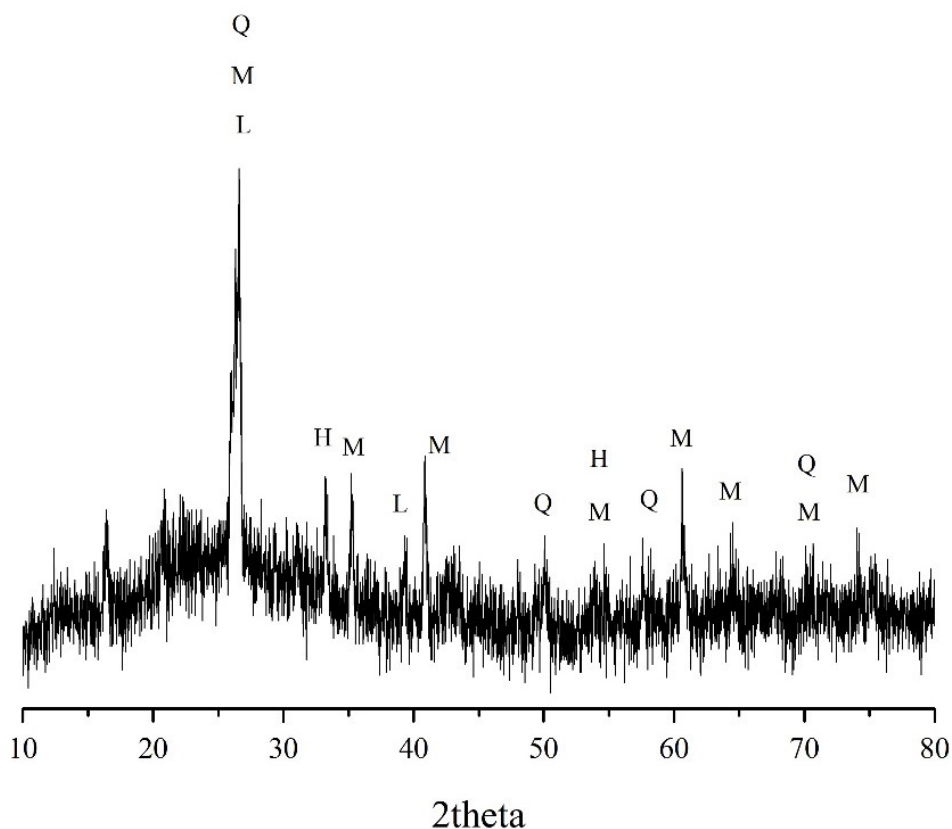


รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยถ่านหินปิทูมินัส

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเถ้าลอยถ่านหินปิทูมินัส และเถ้าชีวมวล

Chemical composition	% by weight of fly ash	% by weight of biomass ash
SiO <sub>2</sub>	53.6	33.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.4	8.27
CaO	8.25	9.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.89	10.37
TiO <sub>2</sub>	1.63	-
K <sub>2</sub> O	1.56	8.55
MgO	0.984	8.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.967	6.12
SO <sub>3</sub>	0.644	8.78
Na <sub>2</sub> O	-	5.46
MnO	-	0.19

ถ้ำชีวมวลที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่เป็นเชื้อเพลิง โดยได้ถ้ำชีวมวลมาจากโรงไฟฟ้าบริษัท โคลเวอร์ พาวเวอร์ จำกัด โดยนำมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF แสดงดังตารางที่ 1 ถ้ำชีวมวลจากโรงไฟฟ้ามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 33.29 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ อะลูมิเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีประมาณ 8.27 โดยน้ำหนัก ซึ่งจัดเป็นวัสดุพอลิซิลานที่สามารถนำมาใช้ในการผสมในคอนกรีต หรืออีพอกซีโพลีเมอร์ได้ เนื่องจากมีซิลิกอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นปฏิกิริยาประเภทต่างในอีพอกซีโพลีเมอร์ได้ เมื่อนำถ้ำชีวมวลจากโรงไฟฟ้ามาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบออสถูเนียนกิ่งผลึก โดยพบผลึกของ Q = Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), M = Mullite ( $\text{Al}_2(\text{Al}_{2.8}\text{Si}_{1.2})\text{O}_2$ ), L = Leonite ( $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), H = Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ในถ้ำชีวมวลจากโรงไฟฟ้า (รูปที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี



รูปที่ 2 โครงสร้างผลึกของถ้ำชีวมวลจากโรงไฟฟ้า

ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยสารเคมีทั้ง 3 เป็นสารเคมีประเภท commercial grade ซึ่งสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด และราคาไม่สูงมากนักซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก ในการสังเคราะห์

จีโอพอลิเมอร์จะเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้นต่าง โดยจะนำสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง มีลักษณะเป็นเม็ด ความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 มาชั่งน้ำหนักให้ได้ตามอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  เท่ากับ 0.25 โดยโมล หลังจากนั้นนำโซเดียมไฮดรอกไซด์มาละลายด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

### การเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์

ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จะต้องหาสัดส่วนของปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อวัสดุยึดประสานของแต่ละชุดการทดสอบ โดยประยุกต์ใช้วิธีการหาความเข้มข้นเหลวปกติ (Normal consistency) ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 187-68 ด้วยเครื่องชุดทดสอบไวแคต (vicat Apparatus) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะนำมาเตรียมก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยทำการเตรียมตัวอย่างในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  cm ทำการอัดวัสดุผสมให้แน่น และไล่ฟองอากาศโดยใช้เครื่องโต๊ะเขย่า (Vibration table) ทำการเขย่าประมาณ 1 นาที จากนั้นนำแบบหล่อมาห่อด้วยถุงพลาสติก และทำตั้งบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน เพื่อนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ซึ่งแต่ละชุดการทดสอบจะทำซ้ำชุดละ 5 ตัวอย่าง หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการผสมเถ้าชีวมวลในอัตราร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการบ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 28 วัน และนำไปทำการทดสอบกำลังการรับแรงอัด

### วิธีการทดสอบ

#### การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Unconfined compressive strength test)

การทดสอบกำลังรับแรงอัด เป็นการทดสอบสมบัติทางกายภาพของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากเถ้าลอยที่มีการผสมเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อหาความสามารถในการรับแรงกดอัด โดยวิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์ทำการประยุกต์มาจากมาตรฐาน ASTM D1633-07 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด จำนวน 5 ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่อ่านได้จากเครื่องจะนำมาคำนวณความสามารถในการรับแรงกดอัดในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) ตามสมการข้างล่างจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด

$$\text{กำลังรับแรงอัด (กก./ชม.2)} = \frac{\text{แรงอัดสูงสุด (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงกดอัด (ตารางเซนติเมตร)}}$$

### การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู

การทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของ เมทิลีนบลู โดยนำตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ผ่านการเผามาทำการทดสอบปฏิกิริยาการย่อยสลายสีเมทิลีนบลู โดยก่อนทดสอบให้นำตัวอย่างโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผามาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดฝุ่นละอองที่เกาะอยู่ตามผิวหน้าของตัวอย่างออก หลังจากนั้นอบให้แห้ง และนำโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผามาวางลงในกล่องสี่เหลี่ยมซึ่งทำด้วยกระจก ขนาด 10×10 เซนติเมตร โดยหงายหน้าเอาด้านที่เคลือบฟิล์มขึ้น เพื่อให้ได้รับรังสียูวี หลังจากนั้นใส่สารละลาย เมทิลีนบลู ความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ลงไปให้ท่วมชิ้นงาน โดยให้รังสียูวีขนาด 50 วัตต์ ที่มีความเข้มแสง  $3.89 \text{ mW/cm}^2$  และมีความยาวคลื่นย่านยูวีเท่ากับ 310 – 400 นาโนเมตร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างสารละลายเมทิลีนบลู ทุก ๆ 2 ชั่วโมง และวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible spectrophotometer เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของความเข้มข้นของ เมทิลีนบลู เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยใช้สมการคำนวณหา % Degradation ของ เมทิลีนบลู

### การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์แกมมาบวกและแกมมาลบ ได้แก่ *Escherichia coli* (E.coli) และ *Staphylococcus aureus* (S.aureus) ตามลำดับ โดยนำเชื้อแบคทีเรีย 1 โคโลนี ใส่ในหลอดที่มีอาหารเหลว แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เชื้อเข้มข้นสำหรับนำมาเจือจาง จากนั้นเตรียมอาหารแข็ง (Nutrient agar, NA) แล้วเทอาหารใส่จานเลี้ยงเชื้อ นำเชื้อไปหยดบนอาหารแข็งที่เตรียมไว้ โดยใช้เทคนิค Spread plate และได้ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้น นำน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียที่มีความเข้มข้นเชื้อดังกล่าวไปทดสอบการฆ่าเชื้อ โดยนำโพลิเมอร์ที่ผ่านการเผามาทำการบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายหลังบ่มแล้ว โคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจะเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำการบันทึกผล ถ่ายรูป และนับจำนวนเชื้อที่เหลือ โดยทำการทดสอบภาวะละ 3 ตัวอย่าง แล้วรายงานเป็นผลค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus survival rate,  $N/N_0$ ) และร้อยละการเสียชีวิตหรือการตายของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus killing percentage)

### การวิเคราะห์เชื้อที่หลงเหลือในอากาศด้วยวิธีแบบ cyclone-based air sampling

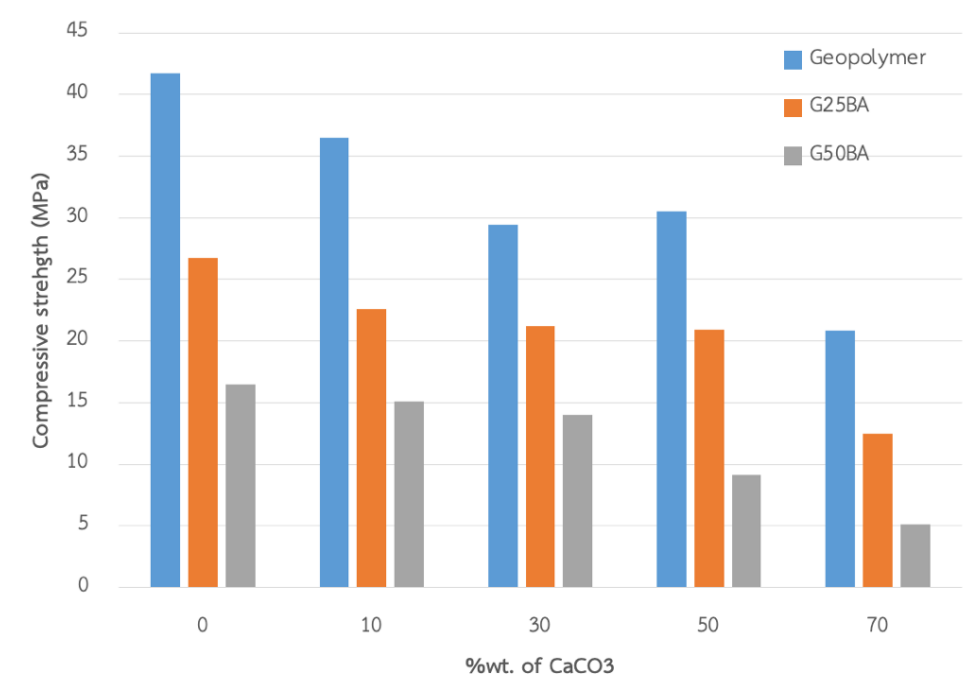
เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศนี้ดัดแปลงมีพื้นฐานมาจากไซโคลน ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นแนวสัมผัสหรือตามแนวแกนขึ้นอยู่กับการไหลของอากาศ โดยไซโคลนทั่วไปมีอากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสเพื่อสร้างแรงในการหมุนและรวบรวมอนุภาค ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ระบบไซโคลนนี้จะสามารถรวบรวมละอองลอย ละอองชีวภาพ และอนุภาคละเอียดได้ (Pant et al., 2002; McFarland et al.,

2010) สามารถนำมาใช้ในด้านต่าง ๆ ได้ เนื่องจากการออกแบบที่เรียบง่ายทำให้มีความกะทัดรัด และต้องใช้พลังงานในการทำงานต่ำ แต่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้น เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศแบบไซโคลนจึงได้รับการออกแบบตามกฎของ Stokes และ Reynolds เพื่อรวบรวมและรวบรวมอนุภาคในอากาศในของเหลว เทคนิคนี้ถูกใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไซโคลนการสุ่มตัวอย่างละอองชีวภาพแบบไหลตามแนวแกนที่รวบรวมอนุภาคอย่างต่อเนื่องบนฟิล์มของเหลวที่ไหล เครื่องเก็บตัวอย่างอากาศแบบไซโคลนได้รับการออกแบบโดยมีขนาดของชิ้นส่วนแต่ละส่วน: ขนาดด้านในของช่องลมเข้า 22 มม. x 32 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของช่องระบายอากาศ 19 มม. ความยาวรวมของพายุไซโคลนคือ 180 มม. และมีรูปร่างที่บริเวณด้านล่างเรียวยาวเพื่อกระตุ้นเกิดการไหลสุ่มพื้นและเคลื่อนเข้าหาทางออกได้ดี ในการออกแบบการทดสอบนั้นจะทำ 2 ส่วนคือ ทำการทดสอบภายในห้องความดันลบเพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอากาศ ร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อที่ตกค้างภายในห้องความดันลบ โดยทำการทดสอบเบื้องต้นจากเชื้อในอากาศ ส่วนที่สองคือ การทดสอบวัดค่าปริมาณเชื้อที่หลงเหลือในอากาศที่ออกจากระบบบำบัดที่ติดตั้งภายนอกเครื่อง

## ผลการศึกษา

### การพัฒนาตัวกลางแบบคงที่จากวัสดุพอร์ซิวพอลิเมอร์จากเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าแบบตัวกลางแบบคงที่

ในการการพัฒนาตัวกลางแบบคงที่จากวัสดุพอร์ซิวพอลิเมอร์จากเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าแบบตัวกลางแบบคงที่ โดยใช้เถ้าถ่านหินที่กระตุ้นปฏิกิริยาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0.25 โดยโมล ซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ **รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์ และธีรวิฑูมูอำมหัด [ ]** ที่ทำการศึกษาผลของสารกระตุ้น และวิธีการบ่มต่อการพัฒนา กำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากของเสียอุตสาหกรรม จากผลการศึกษาพบว่า ค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าถ่านหินที่ใช้อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0.25 โดยโมล มีค่ากำลังอัดสูงสุกมาใช้ในการศึกษาวิจัยต่อในงานวิจัยนี้ และทำการผสมเถ้าชีวมวลในปริมาณร้อยละ 0 25 และ 50 โดยน้ำหนัก และมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 0 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการหล่อตัวอย่างในก้อนลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จากนั้นทำการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน และนำมาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกน ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังรูปด้านล่าง



**รูปที่ 3** ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนตที่อายุ 28 วัน

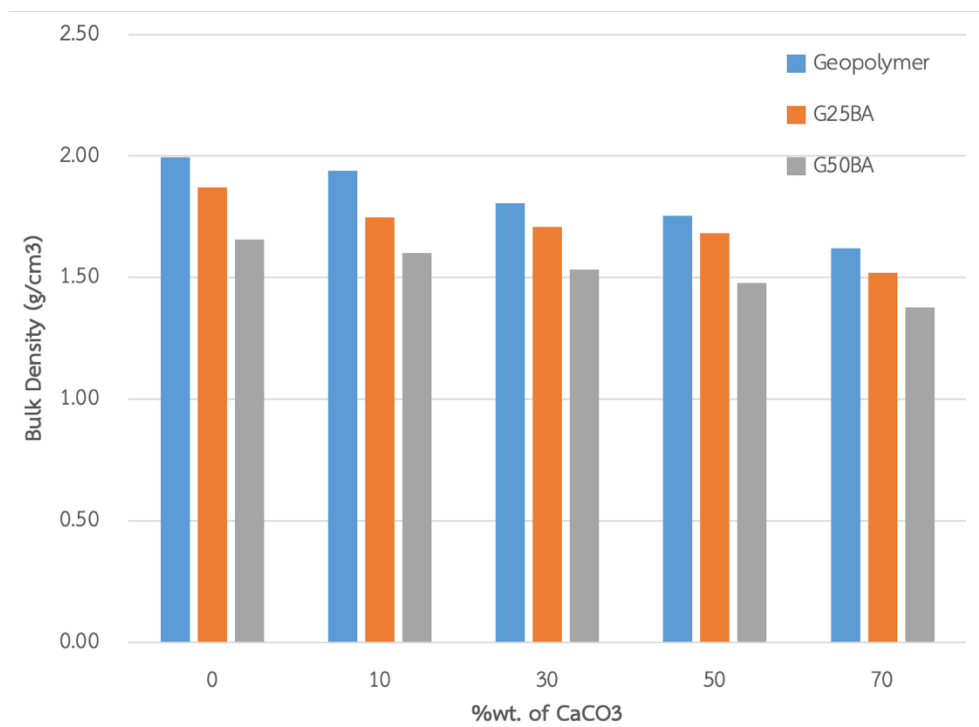
ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินมีค่ากำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 41.76 MPa ค่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยการพัฒนากำลังอัดในช่วง 1-7 วันแรกจะเป็นไปอย่างช้า เนื่องจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เท่ากับ 0.25 มีค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 11.75 โมลาร์ โดยค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น เป็นผลทำขั้นตอนการชะละลาย (Dissolution) สารประกอบไอออนของ  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  ออกมาจากผิวอนุภาคเถ้าถ่านหินมาอยู่ในของเหลวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเกิดการรวมตัวกับไอออนของออกซิเจนเกิดเป็นปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ  $\text{Si}^{4+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  ที่เกิดเป็นคอร์รอดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si และ Al ได้สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต [Si-O-Al-O] จากนั้นจะทำการควบแน่น และเกิดการรวมตัวของโมโนเมอร์ได้โครงข่ายของอะลูมิเนียมซิลิเกต นอกจากนั้นความเข้มข้นของด่างที่สูงจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา ส่งผลต่อขั้นตอนการกลายเป็นเจล (Gelation) โดยที่การชะของออสฐานอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่าพีเอชสูง แล้วเกิดสารละลายอะลูมิเนียมซิลิเกตอิ่มตัวอย่างมาก (Supersaturated Aluminosilicate Solution) สารละลายเข้มข้นนี้จะอยู่ในรูปเจล ซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์ในรูปแบบสภาวะที่มีน้ำมีโครงข่ายใหญ่โดยการควบแน่น กระบวนการนี้จะปลดปล่อยน้ำที่สะสมระหว่างการชะละลาย และเกิดโครงสร้างใหม่ ส่งผลโครงแน่นและทำให้จีโอพอลิเมอร์สามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น

เมื่อมีการผสมเถ้าชีวมวลในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินมีค่าลดลง โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.72 และ 16.47 MPa. ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่มีการผสมเถ้าชีวมวลใน



ปริมาณร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนักมีค่าลดลง เนื่องจากถ้าชีวมวลที่นำมาผสมเป็นเถ้าจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้ชีวมวลจากในพื้นที่ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีสีดำ แสดงให้เห็นว่ายังมีปริมาณสารคาร์บอนหลงเหลืออยู่ในเถ้าชีวมวลเหล่านี้ ทำให้ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดช้าลง เนื่องจากสารคาร์บอนจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยาทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าลดลง นอกจากนี้เถ้าชีวมวลที่นำมาผสมเป็นมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพเป็นรูพรุนเนื่องจากความร้อนในการเผาไหม้ทำให้สารอินทรีย์ หรือสารอินทรีย์บางส่วนชนิดในเถ้าชีวมวลระเหย และเกิดเป็นรูพรุนทำให้เมื่อทำการผสมในจีโอพอลิเมอร์มีความพรุนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นการผสมเถ้าชีวมวลที่เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อปริมาณเถ้าชีวมวลเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 3

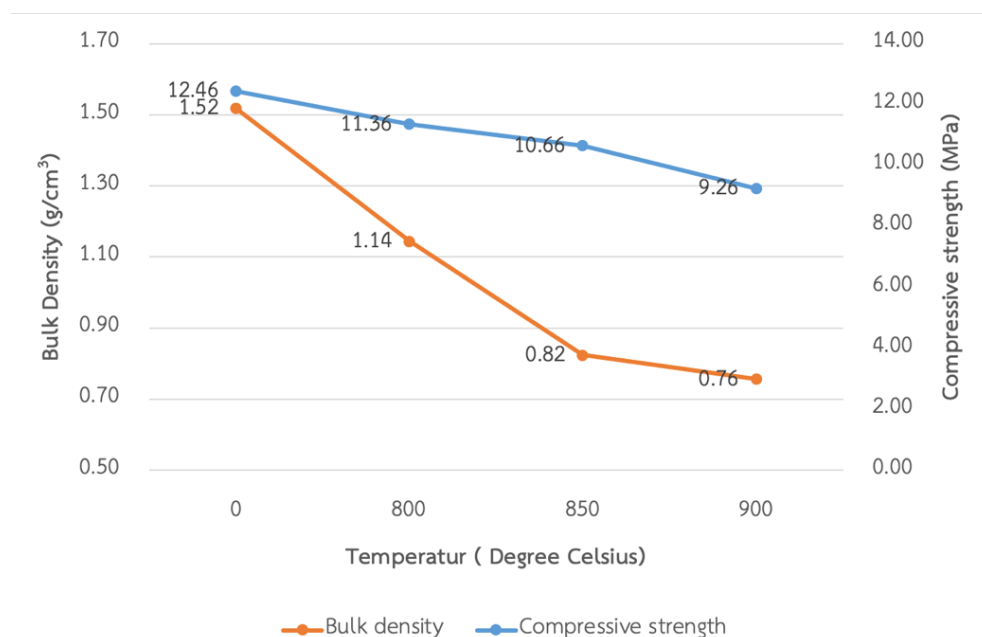
เมื่อมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในจีโอพอลิเมอร์ในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกหินปูน ซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำในสภาวะปกติ ประกอบกับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารที่มีความพรุน และมีความหนาแน่นต่ำทำให้เมื่อนำมาผสมในจีโอพอลิเมอร์ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง โดยที่ค่ากำลังอัดของจีโอ พอลิเมอร์ที่มีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 36.49, 29.45, 30.55 และ 20.88 MPa ตามลำดับ และเมื่อจีโอพอลิเมอร์มีการผสมเถ้าชีวมวลในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 22.60, 21.19, 20.91 และ 12.46 MPa เมื่อมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก และมีค่ากำลังอัดลดลงเพิ่มเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชีวมวลเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.09, 14.03, 9.15 และ 5.14 MPa เมื่อมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



**รูปที่ 4** ค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนต

จากรูปที่ 4 แสดงค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้า และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า ค่าค่าความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมเถ้าชีวมวลในปริมาณร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นลดลง เมื่อปริมาณเถ้าชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 1.99 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าลดลงเท่ากับ 1.87 และ 1.66 g/cm<sup>3</sup> เมื่อมีการผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าในปริมาณร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเนื่องจากเถ้าชีวมวลเป็นวัสดุทางการเกษตรที่ผ่านการเผา ซึ่งทำให้สารประกอบประเภทคาร์บอนมีระเหยออกไปทำให้วัสดุมีความพรุนมากขึ้นเป็นผลความหนาแน่นของเถ้าชีวมวลมีค่าต่ำ ซึ่งเมื่อนำมาผสมในจีโอพอลิเมอร์จึงทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง และเมื่อมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงด้วย โดยจีโอพอลิเมอร์ที่มีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.94, 1.81, 1.76 และ 1.62 g/cm<sup>3</sup> และเมื่อมีการผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 1.75, 1.71, 1.68 และ 1.52 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่มีการผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้า และเมื่อมีการผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักในจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน พบว่า ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง และมีค่าต่ำกว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินที่ผสมเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าในปริมาณร้อยละ 0 และ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.60, 1.53, 1.48 และ 1.38 g/cm<sup>3</sup> เมื่อมีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 10 30 50 และ 70 โดยน้ำหนัก

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 3 และ 4 พบว่า ค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินผสมเถาซีวมวลจากโรงไฟฟ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีสูงกว่า 5 MPa (เทียบกับมาตรฐานคอนกรีตมวลเบา) ทุกอัตราส่วน โดยค่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินผสมเถาซีวมวลจากโรงไฟฟ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีค่าใกล้เคียงกับ 5 MPa มากที่สุดคือ จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินผสมเถาซีวมวลจากโรงไฟฟ้าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 5.14 และ 9.5 MPa แต่ในการศึกษาต่อถ้ามีการเผาตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ก็จะทำให้เกิดความพรุนในตัวอย่างมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่ากำลังอัดลดลงอีก ซึ่งจะมีผลต่อการใช้งานเพราะวัสดุจะเปราะได้ ดังนั้นอัตราส่วนที่รองลงมาคือ จีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินผสมเถาซีวมวลจากโรงไฟฟ้าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 12.45 MPa ซึ่งเมื่อนำไปเผาคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมจะระเหยออก และอาจจะทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความพรุนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ค่ากำลังอัดลดลงด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนจีโอพอลิเมอร์จากเถาถ่านหินผสมเถาซีวมวลจากโรงไฟฟ้าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักมาทำการศึกษาต่อในเรื่องผลของอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติด้านกำลังอัด และความหนาแน่น



**รูปที่ 5** ค่ากำลังอัด และความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ผสมเถาซีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 5 เมื่อนำก้อนจีโอพอลิเมอร์ผสมเถาซีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักมาทำการเผาเพื่อสลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มความพรุน และพื้นที่ผิวให้กับก้อนก้อนโพลิเมอร์ โดยทำการเผาที่

อุณหภูมิ 800 850 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่ากำลังอัดของก้อนจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงเท่ากับ 11.36 10.66 และ 9.26 MPa เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 850 และ 900 องศาเซลเซียส และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเท่ากับ 1.14 0.82 และ 0.76 g/cm<sup>3</sup> ค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่ทำการผสมจะสลายตัวเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 825 องศาเซลเซียส ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมแตกตัวเป็นแคลเซียม และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะระเหยออกมาทำให้เกิดช่องว่างภายในก้อนจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นของก้อนจีโอพอลิเมอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่า ก้อนจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่นลดลงจากการเผาตัวอย่างที่ 850 องศาเซลเซียสเพียงเล็กน้อย แต่ใช้พลังงานในการเผาที่สูงกว่า ดังนั้นจากผลการศึกษาในรูปที่ 5 ค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่น ของ ก้อนจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส โดยมีค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 0.66 MPa และ 0.82 g/cm<sup>3</sup> โดยนำมาใช้ในการผลิตตัวกลางแบบคงที่โดยใช้กระบวนการหล่อขึ้นรูป จากนั้นนำมาเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์

#### การพัฒนาตัวกลางแบบคงที่จากวัสดุพรุน

จากการศึกษาสมบัติทางเคมี และทางวิศวกรรมของวัสดุพรุนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มาใช้ในการผลิตตัวกลางแบบคงที่โดยใช้กระบวนการหล่อขึ้นรูป จากนั้นนำมาเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบโดยการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลู และการทดสอบประสิทธิภาพการทำลายทางชีวภาพ และการประเมินผลการทำลายแบคทีเรียเชิงปริมาณผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

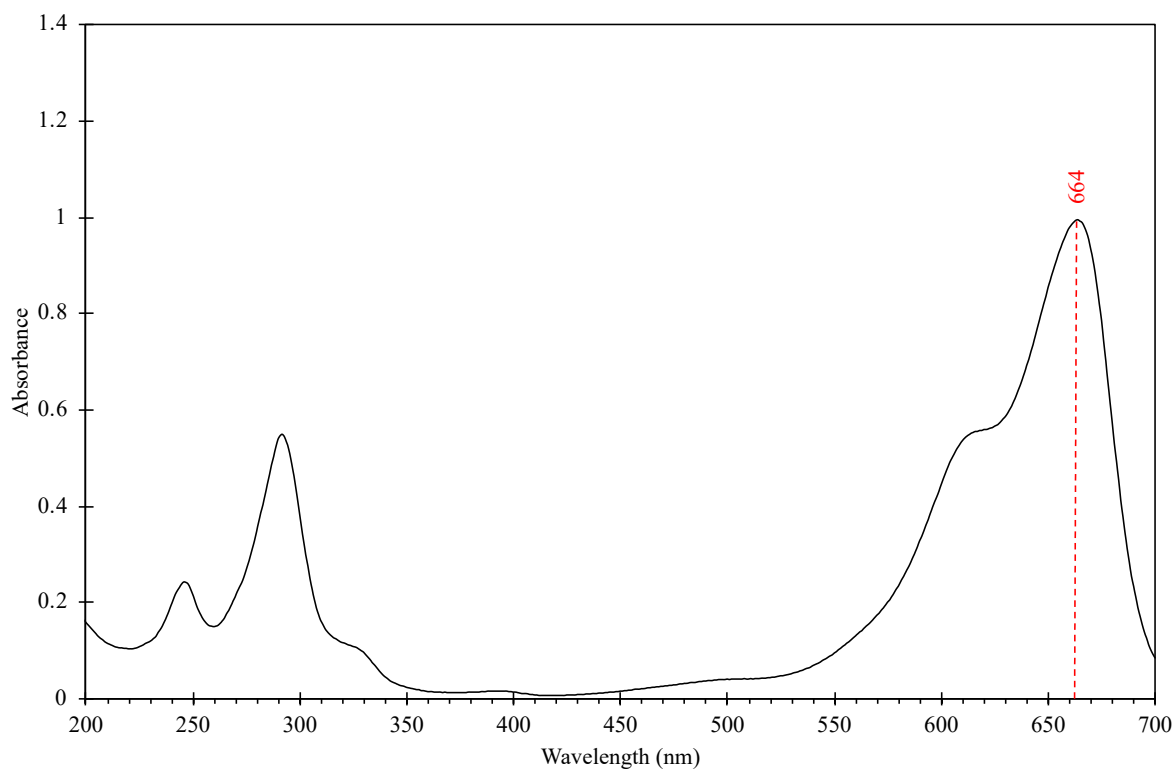
**ตารางที่ 2** ค่าความหนาแน่น และร้อยละความพรุนของตัวกลางที่มีการเคลือบไทเทเนียมในปริมาณต่าง ๆ

Samples	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
Control	0.820	89.34
5% of Titanium Coat	0.825	88.78
10% of Titanium Coat	0.830	87.56
15% of Titanium Coat	0.832	87.33

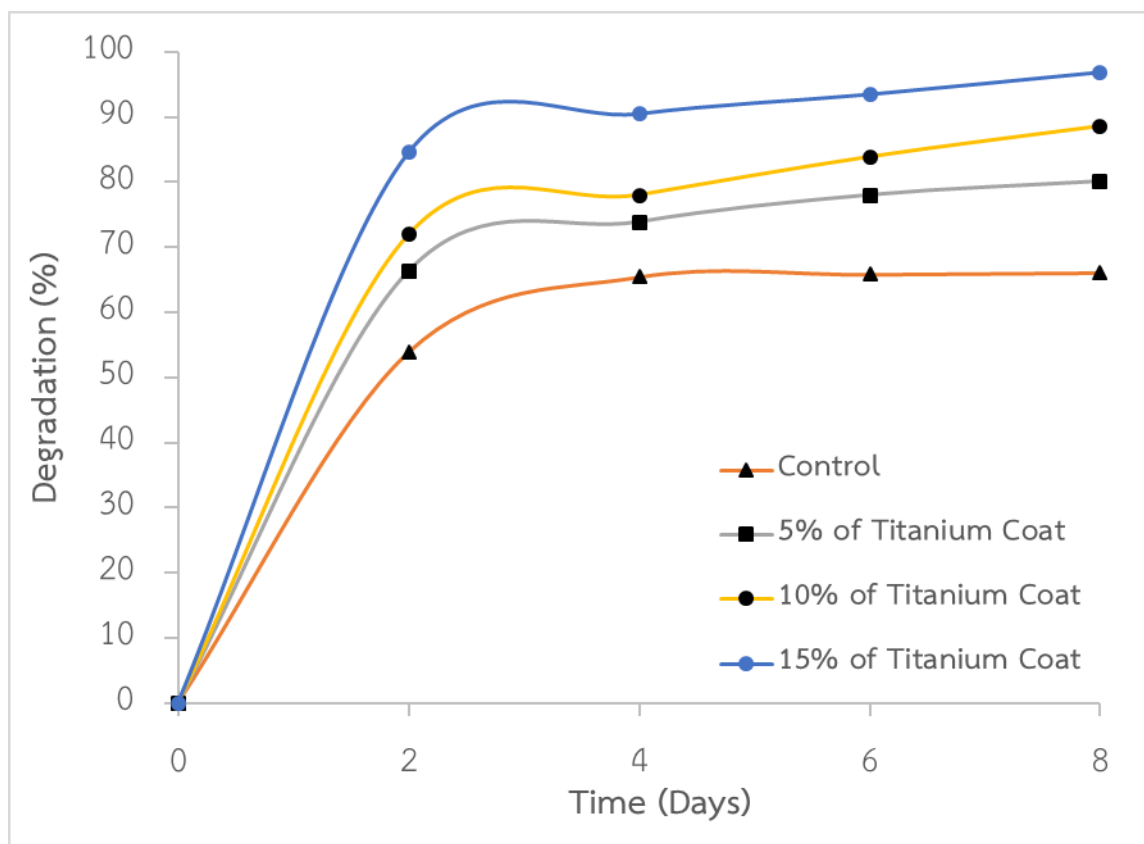
จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.82 ถึง 0.832 g/cm<sup>3</sup> เนื่องจากสารเคลือบผิวเป็นสารประเภทระเหยได้ ดังนั้นในการเคลือบ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 24 ชั่วโมง สารเคลือบจะระเหยไปหมดทำให้เหลือแต่ไทเทเนียมที่เคลือบผิวเท่านั้น ดังนั้นค่าความหนาแน่นจึงมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ส่วนค่าร้อยละความพูนของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เหมือนกับค่าความหนาแน่น โดยมีค่าร้อยละความพูนอยู่ในช่วงร้อยละ 87 ถึง 89 โดยปริมาตร จากผลการศึกษาสัมบัติทางกายภาพดังกล่าวข้างต้น นำมาทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางชีวภาพเพิ่มเติม

ในการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกในการย่อยสลายสีของเมทิลีนบลูของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลที่มีและไม่มีสารเคลือบด้วยสารไทเทเนียม ซึ่งจะทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค Ultraviolet-visible spectrophotometry โดยเริ่มจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย เมทิลีนบลู พบว่า สารละลาย เมทิลีนบลู มีช่วงการดูดกลืนแสงมากที่สุดที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (รูปที่ 6) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย เมทิลีนบลู ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละการลดลงของความเข้มข้นของ เมทิลีนบลู (Degradation percentage) ได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Degradation (\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$



รูปที่ 6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลีนบลู



รูปที่ 7 ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้แสงยูวีของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์

จากรูปที่ 7 แสดงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้แสงยูวีของวัสดุพูนจาก จีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ร้อยละของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ใช้เมทิลีนบลูเป็นสารตั้งต้นมี ค่าร้อยละในการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการย่อยสลายเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ค่าร้อยละการย่อยสลายสารอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปริมาณร้อยละ 80 ของอัตราการย่อยสลายที่ 8 ชั่วโมง โดยวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและ แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสที่ไม่ผ่านการเคลือบมี ค่าร้อยละการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง เท่ากับ ร้อยละ 66 โดยน้ำหนัก และเมื่อมี การเคลือบผิวด้วยสารไทเทเนียมในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าร้อยละการย่อยสลาย สารอินทรีย์ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 80.11 โดยน้ำหนัก และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ไทเทเนียมที่ผสมในสารเคลือบเพิ่มขึ้น โดยวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการย่อยสลาย สารอินทรีย์ที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมงเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 96.91 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าในปริมาณ การผสมไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สามารถที่จะกำจัดสารอินทรีย์ได้ มากกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ซึ่งความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดมากกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ตั้งแต่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการใช้สมบัติในการทำความสะอาด ตนเองนั้น สารอินทรีย์ระเหยในอากาศภายในพื้นที่ที่เครื่องทำงานอาจจะทำให้สารอินทรีย์ระเหย สลายไปมากกว่าร้อยละ 80 ตั้งแต่ 2 ชั่วโมงแรก หรืออาจจะเร็วกว่านั้น

ส่วนในการทดสอบสมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อ แบคทีเรียสายพันธุ์แกมบวกและแกมลบ ได้แก่ *Escherichia coli* (E.coli) และ *Staphylococcus aureus* (S.aureus) ตามลำดับ โดยนำเชื้อแบคทีเรีย 1 โคโลนี ใส่ในหลอดที่มีอาหารเหลว แล้วนำไป บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เชื้อเข้มข้นสำหรับนำมาเจือจาง จากนั้นเตรียม อาหารแข็ง (Nutrient agar, NA) แล้วเทอาหารใส่จานเลี้ยงเชื้อ นำเชื้อไปหยดบนอาหารแข็งที่เตรียม ไว้ โดยใช้เทคนิค Spread plate และได้ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้น นำน้ำที่มีเชื้อแบคทีเรียที่มีความ เข้มข้นเชื่อดังกล่าวไปทดสอบการฆ่าเชื้อ โดยนำตัวอย่างของเหลวที่เคลือบด้วยสารเคลือบทั้ง 3 ชนิดไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงภายหลังบ่มแล้ว โคโลนีของเชื้อแบคทีเรียจะ เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำการบันทึกผล ถ่ายรูป และนับจำนวนเชื้อที่เหลือ โดยทำการทดสอบ ภาวะละ 3 ตัวอย่าง แล้วรายงานเป็นผลค่าเฉลี่ยของอัตราการรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus survival rate,  $N/N_0$ ) และร้อยละการเสียชีวิตหรือการตายของเชื้อแบคทีเรีย (E.coli or S.aureus killing percentage) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ร้อยละประสิทธิภาพการทำลายแบคทีเรียของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์

ชนิดของสารเคลือบ	ประสิทธิภาพการบำบัด (ร้อยละ)					
	0 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	16 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
Control	0	0	0	0	0	0
5% of Titanium Coat	0	28.90	37.26	50.00	53.3	64.4
10% of Titanium Coat	0	35.96	48.00	61.00	63.54	75.44
15% of Titanium Coat	0	48.28	61.93	73.30	85.44	96.47

จากตารางที่ 3 เชื้อ E.coli ที่หยดลงบนวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ไม่ได้ถูกบำบัด และเมื่อมีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบำบัดเริ่มที่ 2 ชั่วโมง โดยวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการบำบัดตั้งแต่ 2 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 28.90 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดเป็น 24 ชั่วโมงพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 64.4

เมื่อวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli ที่ 2 ชั่วโมง เท่ากับร้อยละ 35.96 และมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75.44. และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมในสารเคลือบเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli มีค่าเพิ่มขึ้นทุกระยะเวลาที่ทำการบำบัด โดยที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัดเชื้อ E.coli เท่ากับร้อยละ 48.28 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 96.47 เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง



ส่วนการประเมินผลการทำลายแบคทีเรียเชิงปริมาณ เป็นการทดสอบที่ใช้ประเมินว่าวัสดุหรือสารเคลือบที่ต้องการทดสอบนั้นมีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรีย ในการทดสอบนี้ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ Japanese Industrial Standard (JIS) Z2801:2000 โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ *E. coli* สายพันธุ์ ATCC 25922 และ *S. aureus* สายพันธุ์ ATCC 6538 แบคทีเรียทั้งสองชนิดเป็นสายพันธุ์ที่ไม่ผลิตสารพิษและนิยมใช้สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และงานด้านพันธุวิศวกรรม

**ตารางที่ 4** ผลการทดสอบการประเมินผลการทำลายทำลายแบคทีเรียเชิงปริมาณของวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วชีวมวล

ชนิดของสารเคลือบ	จำนวนโคโลนีบนวัสดุ		value of antibacterial activity	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
Control	234	317	0	0
5% of Titanium Coat	55	45	78	76
10% of Titanium Coat	43	32	89	84
15% of Titanium Coat	27	12	94	98.5

จากตารางที่ 4 พบว่า การประเมินผลการทำลายทำลายแบคทีเรียเชิงปริมาณของ *E. coli* สายพันธุ์ ATCC 25922 บนวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ พบว่า มีปริมาณ *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับ 234 และ 317 หน่วยตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า วัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วชีวมวลยังไม่มีความสามารถในการกำจัดแบคทีเรียได้ เมื่อมีการผสมไทเทเนียมในสารเคลือบในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณ *E.coli* และ *S.aureus* มีปริมาณลดลงเท่ากับ 55 และ 45 หน่วย ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการกำจัด *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับร้อยละ 78 และ 76 ตามลำดับ และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า มีปริมาณ *E.coli* และ *S.aureus* มีปริมาณลดลงเท่ากับ 43 และ 32 หน่วย โดยคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัด *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับร้อยละ 89 และ 84 ตามลำดับ

เมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมในสารเคลือบเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ในวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมแก้วชีวมวลร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่า มีปริมาณ *E.coli* และ *S.aureus* มีปริมาณลดลงเท่ากับ 27 และ 12 หน่วย ตามลำดับ โดยมีความสามารถในการกำจัด *E.coli* และ *S.aureus*

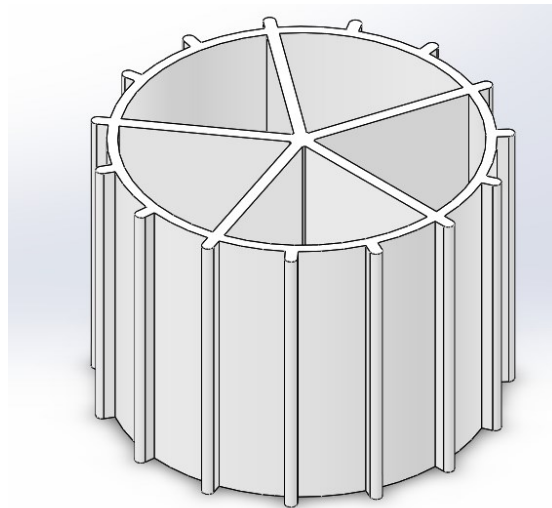
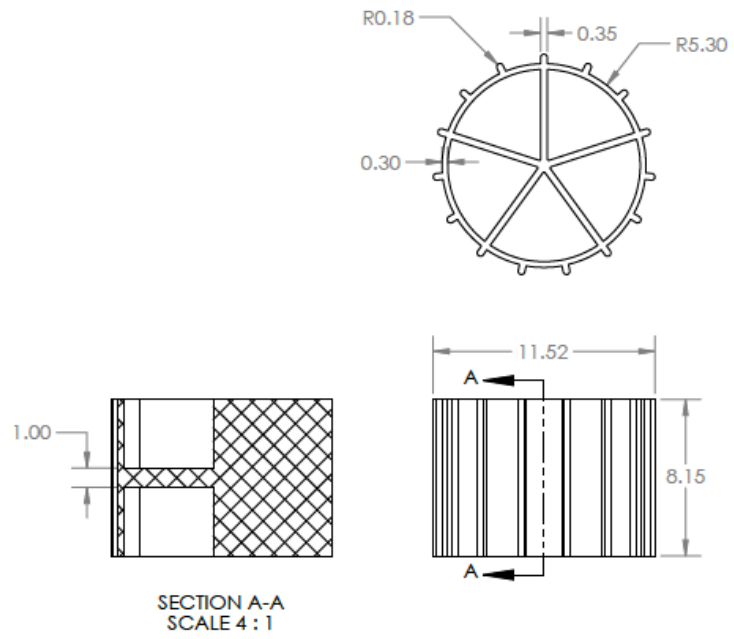
เท่ากับร้อยละ 94 และ 98.5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตขึ้นนั้นสามารถที่จะกำจัดเชื้อแบคทีเรียบนตัวของวัสดุเองๆได้. ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกนำมาใช้ทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุกรองในเครื่องบำบัดอากาศแบบกตัวอย่างอยู่กับที่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 230 มิลลิเมตร ความสูงเท่ากับ 325 มิลลิเมตร. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 150 มิลลิเมตร โดยแสดงตามรูปที่ 8



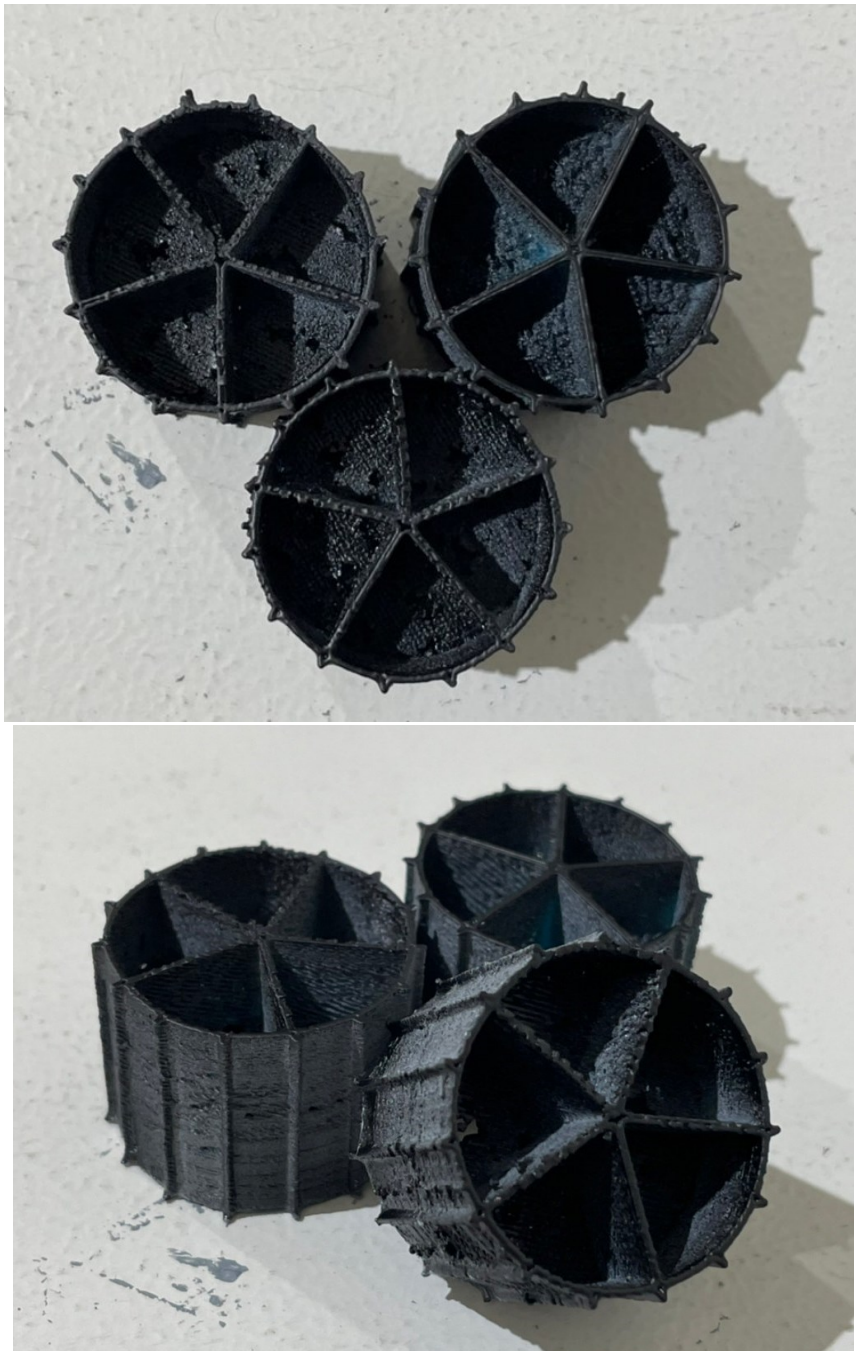
**รูปที่ 8** ตัวกรองอากาศเซรามิกจากวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ผสมเถ้าชีวมวลและแคลเซียมคาร์บอเนต

### การพัฒนาตัวกลางแบบเคลื่อนที่

ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ที่ทำจากวัสดุ ABS ซึ่งทำการออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกไม่ตัน โดยแบ่งภายในออกเป็นห้าส่วน และมีพื้นที่กั้นตรงกลางของตัวกลาง โดยรอบของตัวกลางมีแหบเพื่อให้สามารถรับการปะทะของลม แล้วเกิดการเคลื่อนที่ได้ โดยขนาดของตัวกลางมีขนาดภายนอก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 11.52 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 8.15 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ 1805.67 ตารางมิลลิเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร น้ำหนักต่อชิ้นเท่ากับ 0.24 กรัม โดยรูปร่างของตัวกลางแบบเคลื่อนที่ทำการขึ้นรูปด้วยการฉีด ขึ้นรูปซึ่งแสดงดังรูปที่ 9 – 11 จากนั้นทำการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการสเปรย์ด้วยแลคเกอร์และสารเคลือบ



รูปที่ 9 รูปจำลองของตัวกลางแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 10 รูปจำลองของตัวกลางแบบเคลื่อนที่



**รูปที่ 11** ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

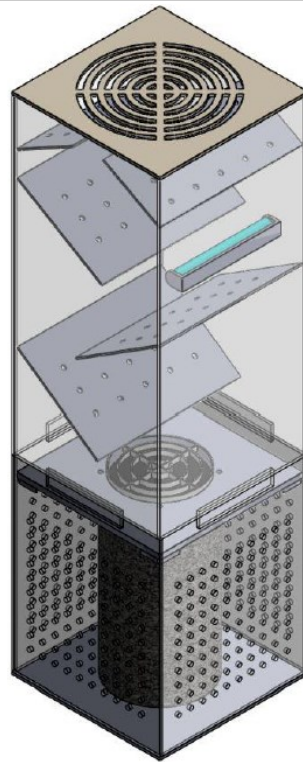
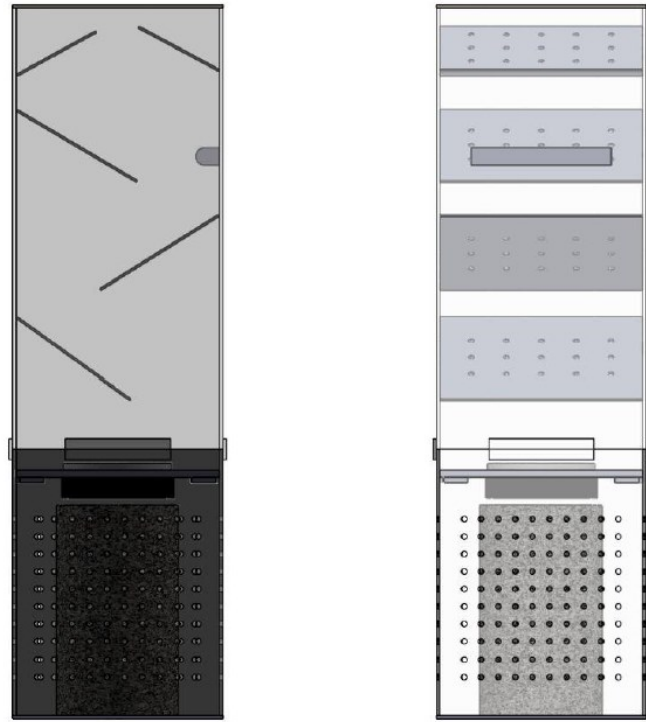
#### **การสร้างหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่**

ในการสร้างหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่ โครงสร้างภายนอกของเครื่องทำจากอะคริลิกสีดำ เนื่องจากในระบบมีการติดหลอด UV เพื่อฆ่าเชื้อโรคซึ่งป้องกันการส่องออกมาของรังสีได้ดีกว่า อะคริลิกใส โดยการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่ จะมีความแตกต่างกันซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

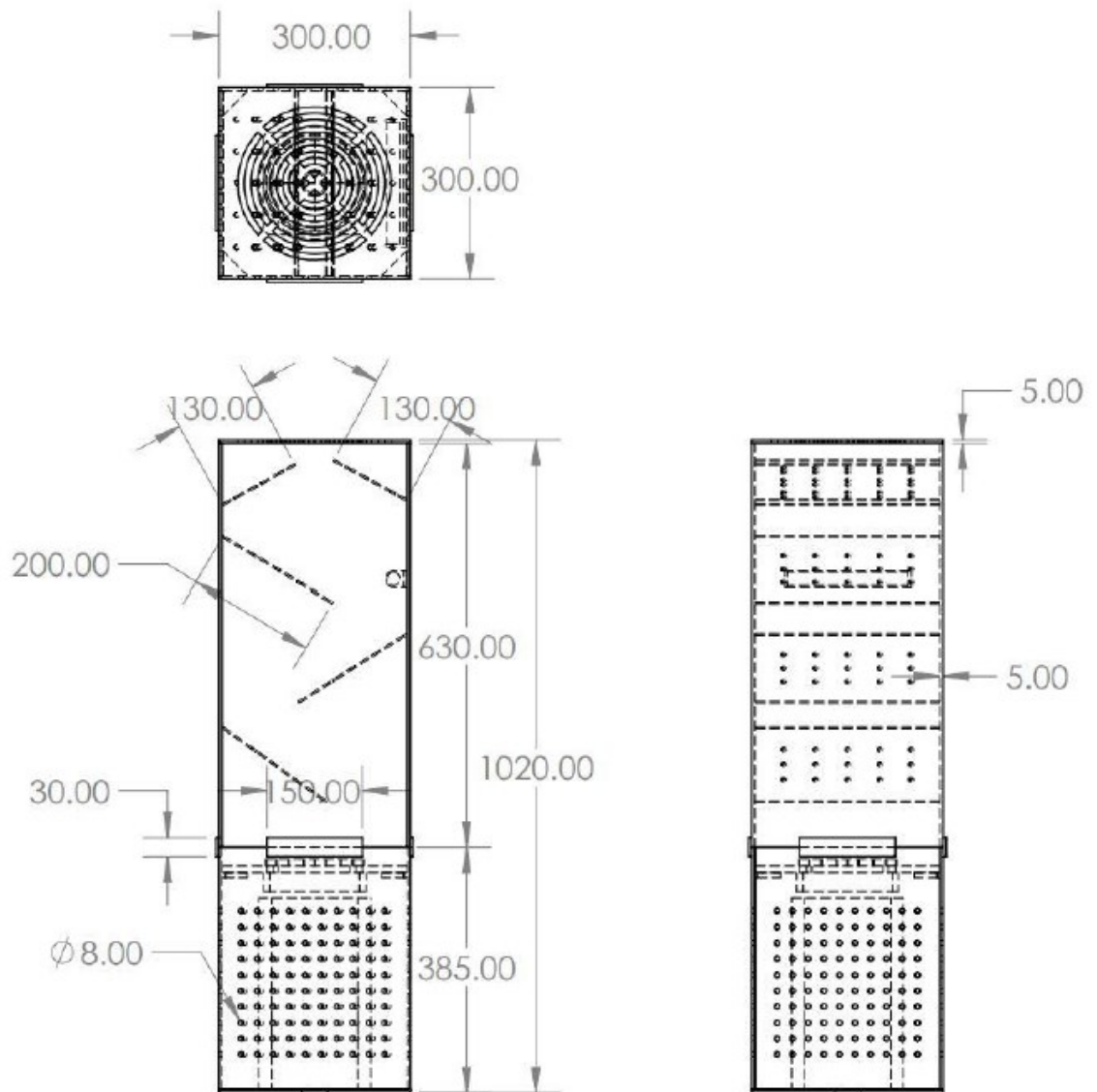
#### **การสร้างหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่**

ในการออกแบบหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ แบ่งพื้นที่การทำงานของระบบเป็น 2 ส่วน คือ ระบบส่วนกรองฝุ่น ซึ่งสามารถกรองฝุ่น และสามารถบำบัดสารระเหยได้ โดยมีรายละเอียดของโครงสร้างการทำงานดังนี้

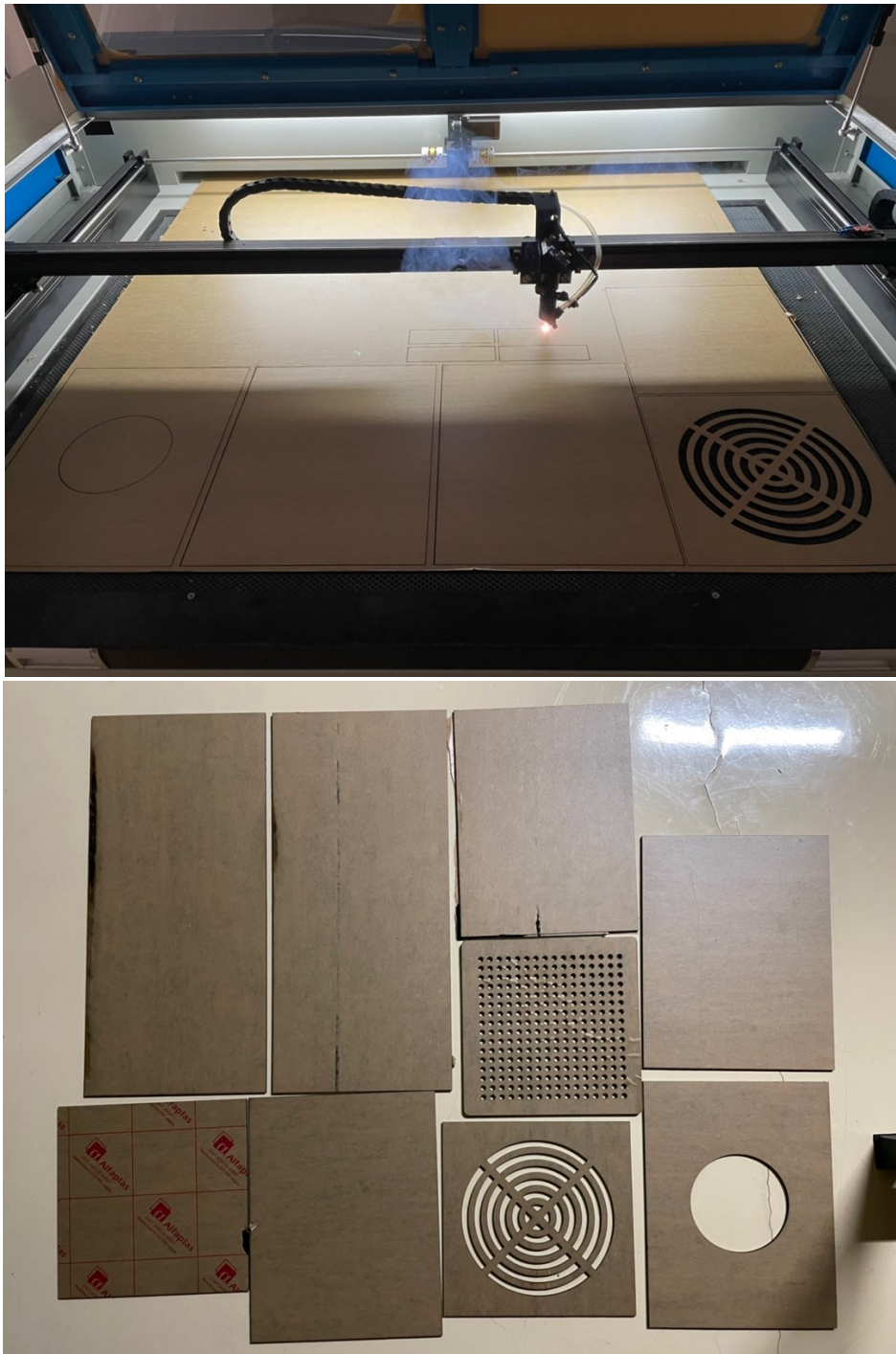




รูปที่ 12 หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่



รูปที่ 13 รายละเอียด ขนาด และตำแหน่งของอุปกรณ์หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่



รูปที่ 14 ขั้นตอนการผลิตหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

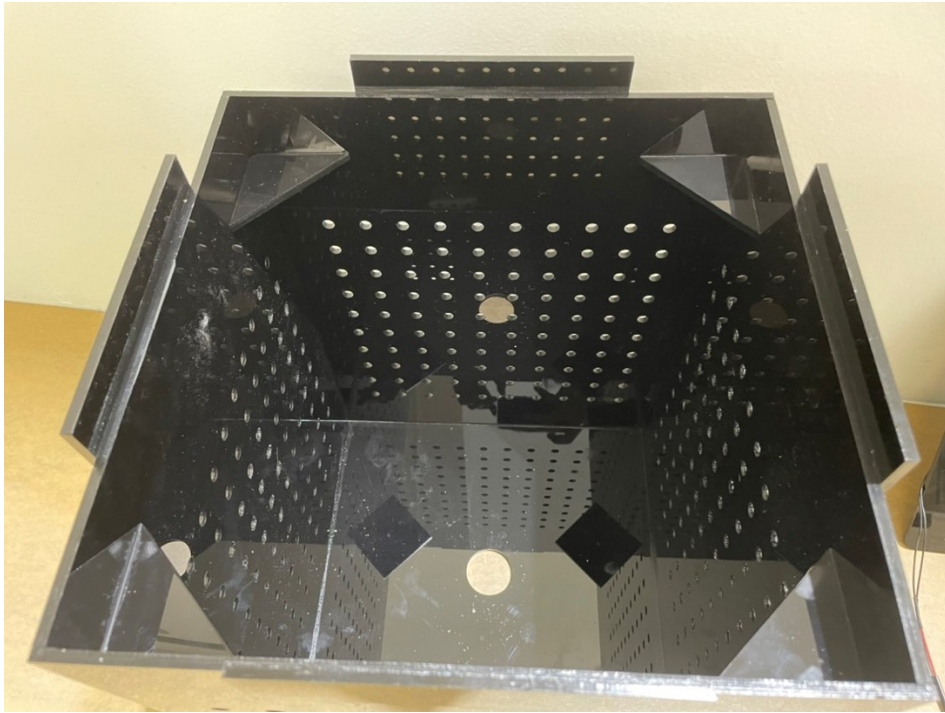




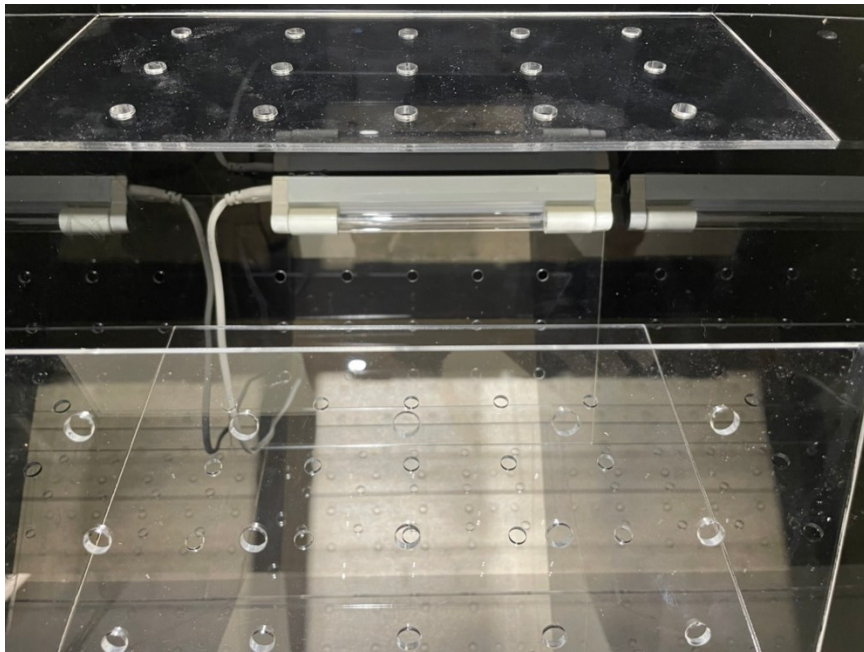
รูปที่ 15 โครงสร้างภายนอกของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 16 โครงสร้างภายในของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 17 โครงสร้างภายใน ส่วนกรองอากาศของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

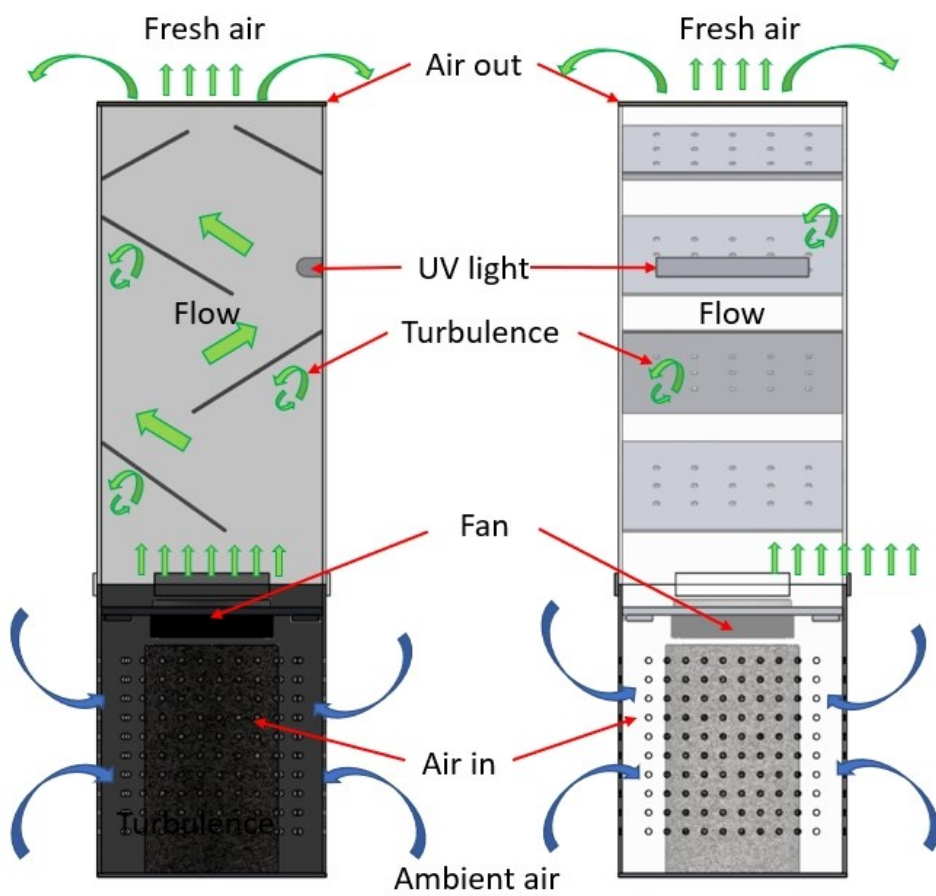


รูปที่ 18 โครงสร้างภายใน ส่วนบำบัดของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่





รูปที่ 19 โครงสร้างนอกแบบไม่แยกส่วนของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

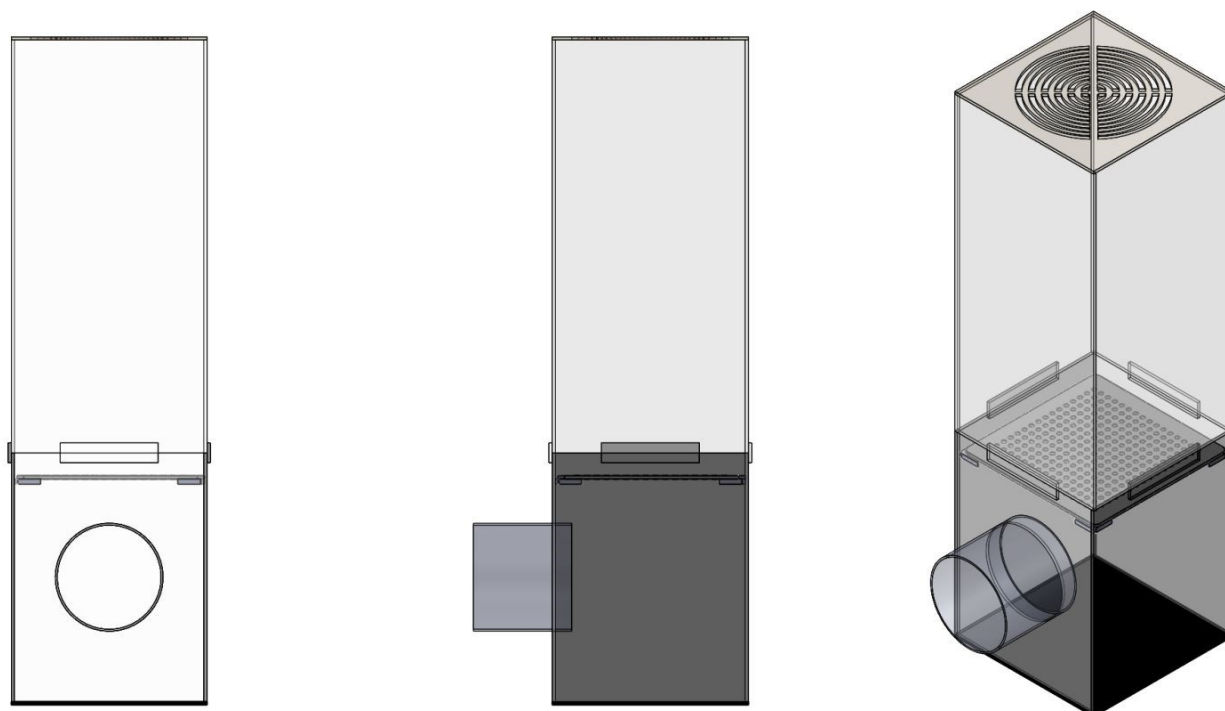


รูปที่ 20 การไหลของอากาศผ่านหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

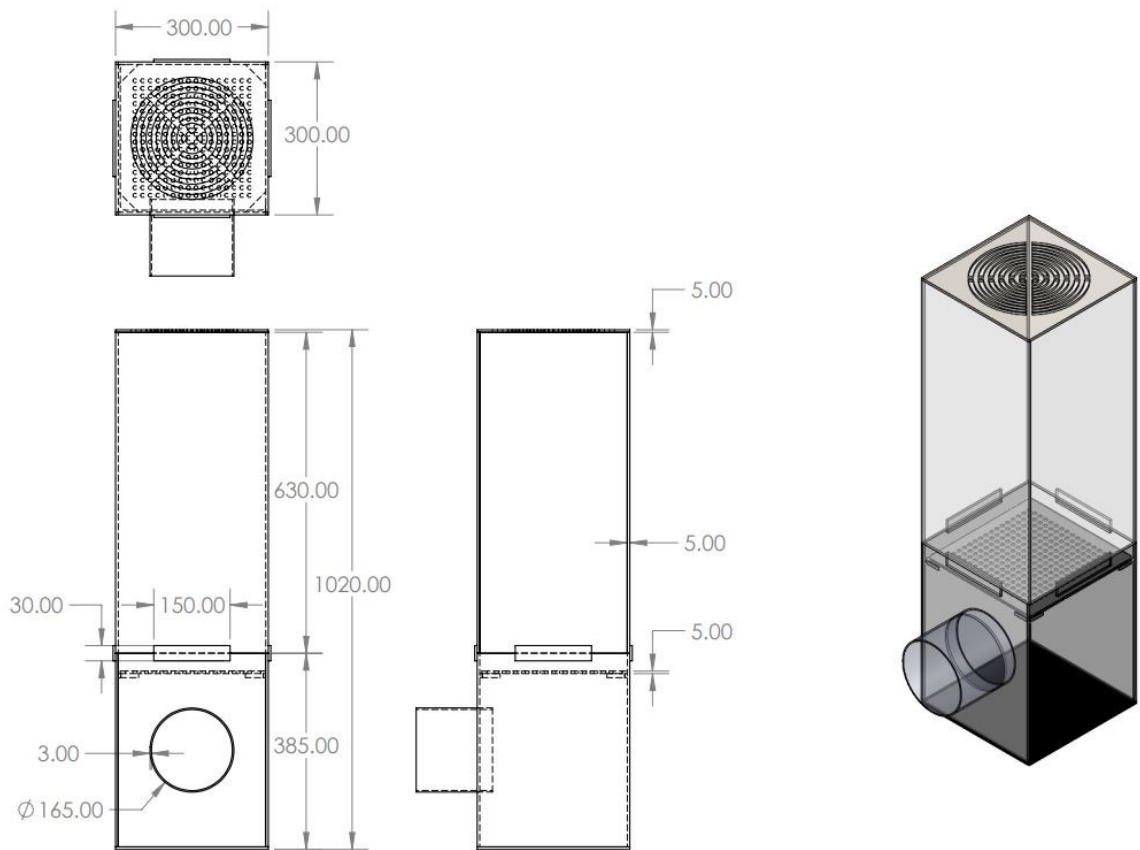
จากรูปที่ 20 การไหลของอากาศจากภายนอกเข้าสู่ ช่องด้านล่างของเครื่อง จากนั้นไหลผ่านตัวกรองที่ทำจากวัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งจะสามารถกรองฝุ่นขนาดเล็กได้ด้วยคุณสมบัติของวัสดุกรอง จากนั้นอากาศที่ผ่านการกรองจะลอยขึ้นสู่ด้านบนในส่วนที่ 2 ส่วนนี้จะทำการบังคับให้อากาศที่ไหลผ่านขึ้นมาเกิดการปั่นป่วน และไหลไปมา ซึ่งจะมีแสง UV ส่องผ่านลงมาเพิ่มเกิดการฆ่าเชื้อโรคในช่วงส่วนที่ 2 นี้ ซึ่งระยะเวลาในการไหลผ่านของอากาศที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดนแสง UV ประมาณ 30 วินาที

### การสร้างหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

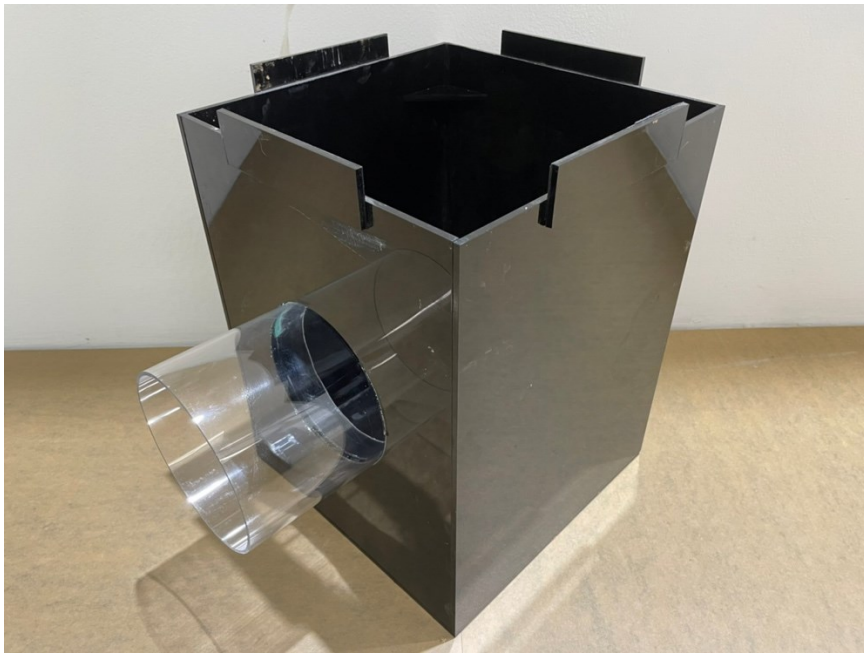
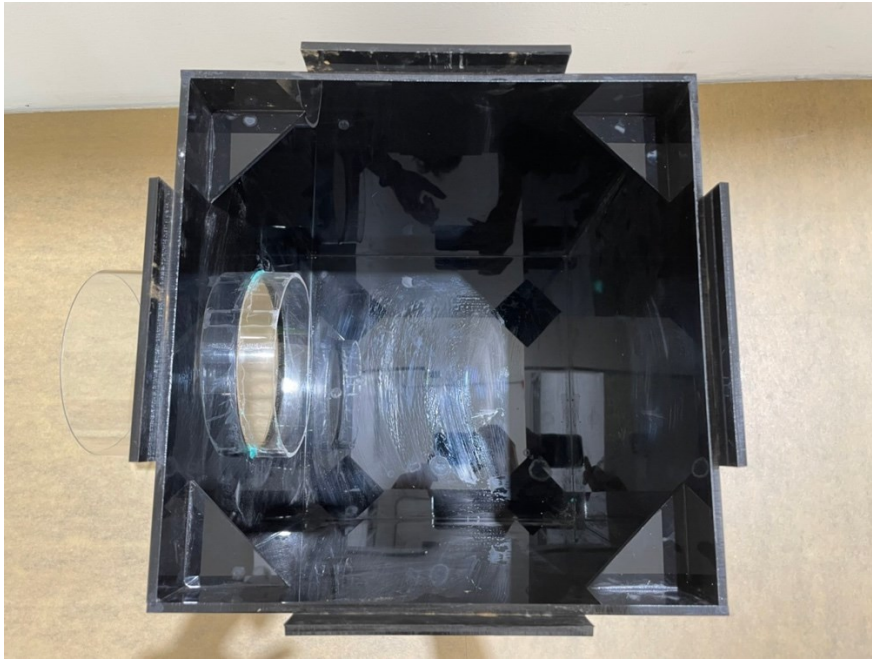
โครงสร้างของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ จะแบ่งพื้นที่ภายในเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นระบบดูดอากาศเข้ามา โดยในส่วนนี้จะต้องมีเครื่องดูดอากาศจากภายในห้องออกมาทำการบำบัดก่อนการปล่อยออก ส่วนที่ 2 จะใช้หลักการลอยของวัสดุตัวกลางที่ผลิตขึ้น ที่มีการเคลือบด้วยสารดทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และมีหลอด UV เป็นแหล่งพลังงานในกระกระตุ้นให้เกิดกระบวนการโฟโตแคทตาลิสต์บนตัวกลาง เพื่อใช้ในการบำบัดเชื้อโรค และมลพิษในอากาศ ซึ่งรายละเอียดของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่แสดงรายละเอียดดังนี้



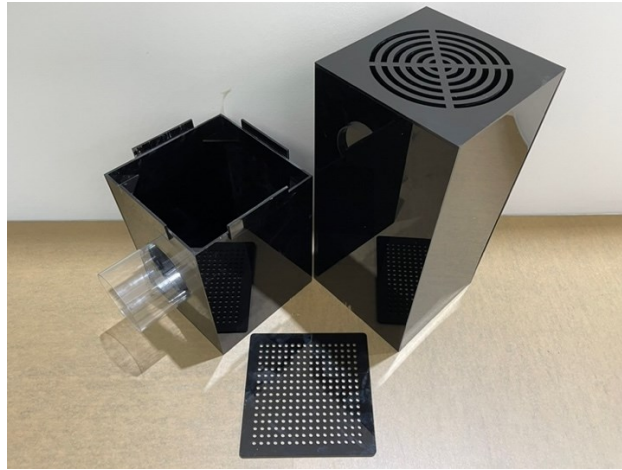
รูปที่ 21 แบบ 2 และ 3 มิติของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่



รูปที่ 22 รายละเอียด ขนาด และตำแหน่งของอุปกรณ์หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

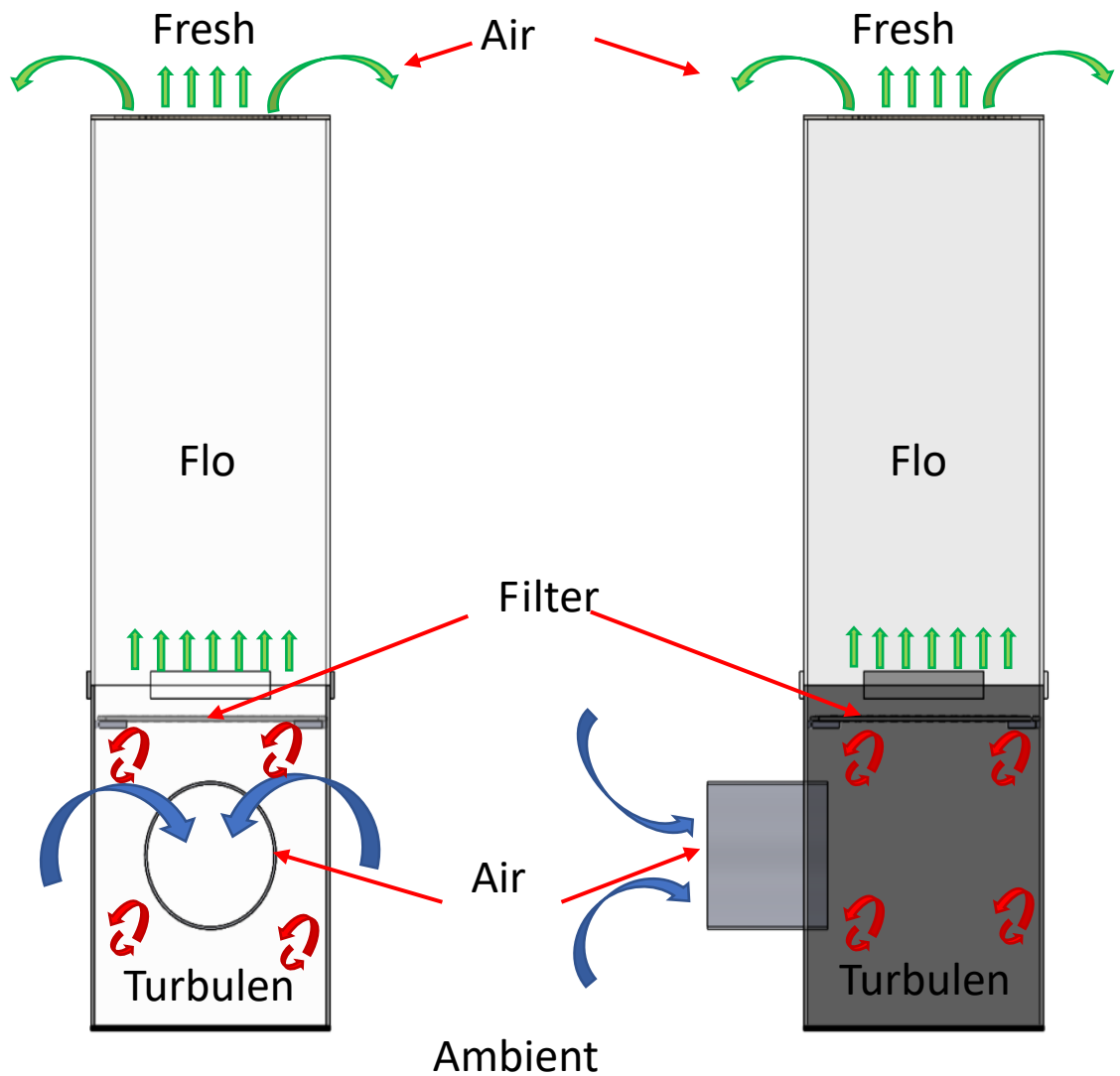


รูปที่ 23 รายละเอียดหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่ใน ส่วนที่ 1



รูปที่ 24 โครงสร้างภายนอกของหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่





รูปที่ 25 การไหลของอากาศในหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่

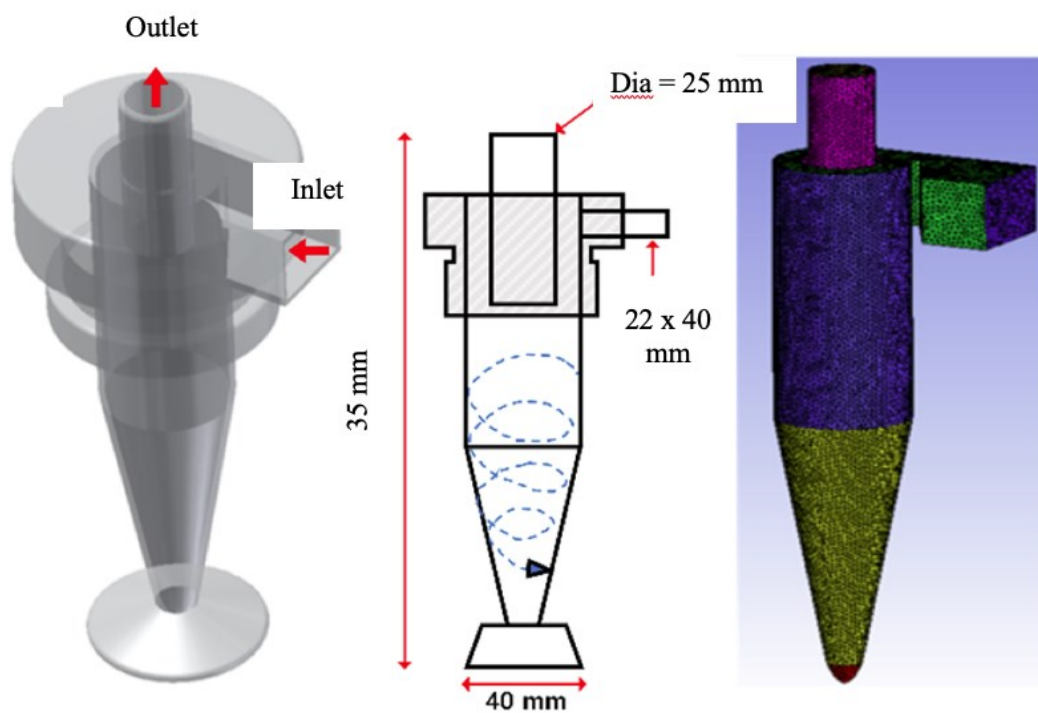
จากรูปที่ 25 หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่จะใช้ในการบำบัดอากาศก่อนที่จะออกจากห้องความดันลบ ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกำจัดเชื้อโรคในระบบ โดยใช้กระบวนการการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวี และกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยกระบวนการโฟโตแคทตาลิซ ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้จะใช้ในหลักการเคลื่อนที่ของตัวกลาง และการสัมผัสกับพื้นที่ผิวบนตัวกลางที่เคลื่อนที่อยู่ในอากาศซึ่งมีการกระตุ้นพลังงานในการบำบัดด้วยแสงจากหลอดยูวี



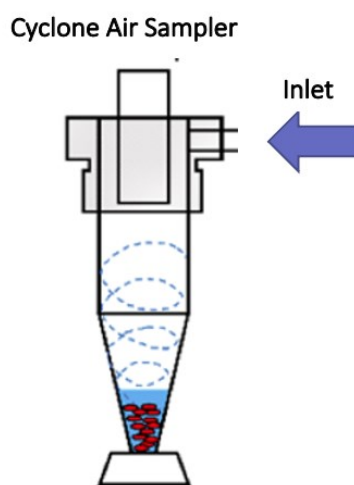
รูปที่ 26 หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ และแบบเคลื่อนที่

ทำการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ และแบบเคลื่อนที่เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดเชื้อโรคในอากาศโดยใช้หลักการของ cyclone-based air sampling

ในการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบไม่เคลื่อนที่ และแบบเคลื่อนที่ จะใช้การเก็บตัวอย่างอากาศโดยใช้หลักการของ cyclone-based air sampling ซึ่งเป็นการประยุกต์การเก็บตัวอย่างให้ได้ความเข้มข้นที่สูงขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิเคราะห์ โดยอ้างอิงการออกแบบจากงานวิจัยของ Kim and et al. 2018 ซึ่งทำการสร้างแบบของดซโคลนในการเก็บตัวอย่างตามมีรายละเอียดตามรูปที่ 27 และ 28



รูปที่ 27 ตัวอย่างโมเดลจากสมการ การออกแบบ และการรับแรงแต่ละพื้นที่

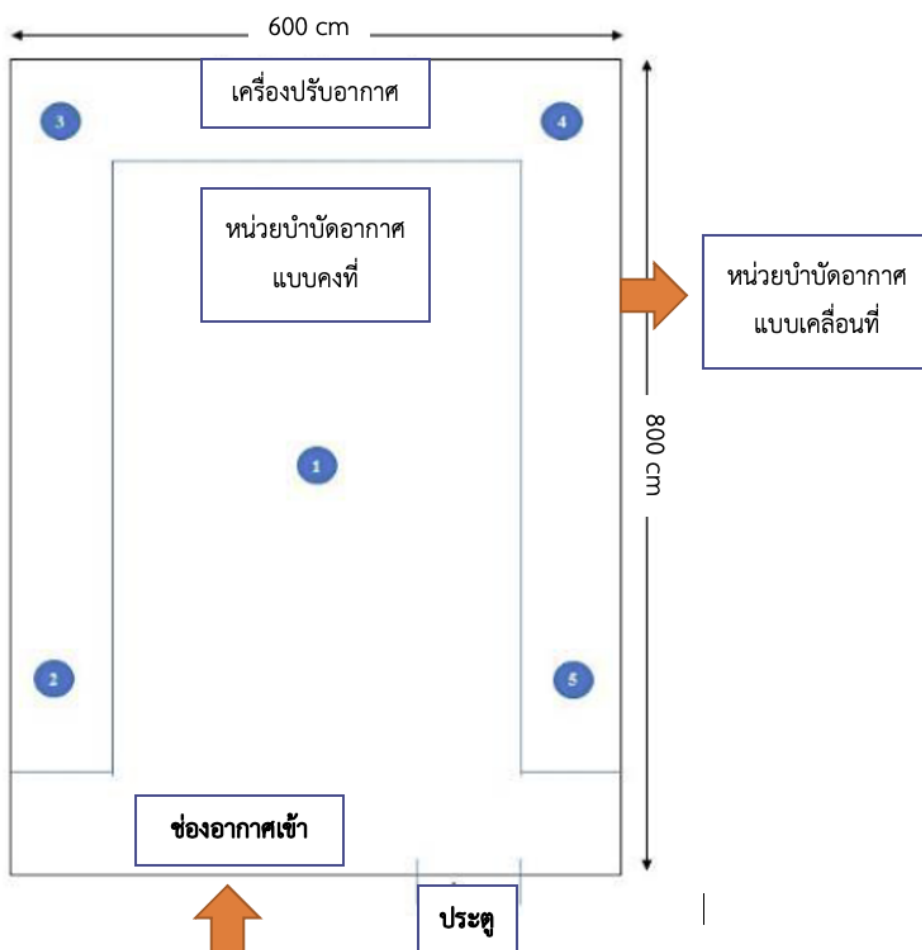


รูปที่ 28 แบบการเก็บคุณภาพอากาศจากหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ และแบบไม่เคลื่อนที่

การใช้ cyclone-based air sampling จะทำให้ประสิทธิภาพในการเก็บตัวอย่างจากชั้นบรรยากาศที่มีความเข้มข้นของสารหรือเชื้อจุลินทรีย์ที่ต่ำได้ เนื่องจากในเทคนิคนี้สามารถที่จะรวบรวม และเพิ่มความเข้าใจด้วยหลักการทางชลศาสตร์ ให้อากาศมีการไหลวนอยู่ในไซโคลน จนมีปริมาณที่มากมีระดับหนึ่งและจะทำการปล่อยสารเคมี หรือเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการศึกษาในอุปกรณ์เก็บตัวอย่างได้ ซึ่งมีความเหมาะสมกับการทำงานการเชื้อโรคที่มีการระบอบได้ง่ายในอากาศที่สามารถแพร่กระจายได้แม้ในปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำ ซึ่งรายละเอียดในการทดสอบแสดงในหัวข้อถัดไป

#### การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค ที่สามารถรองรับห้องความดันลบ

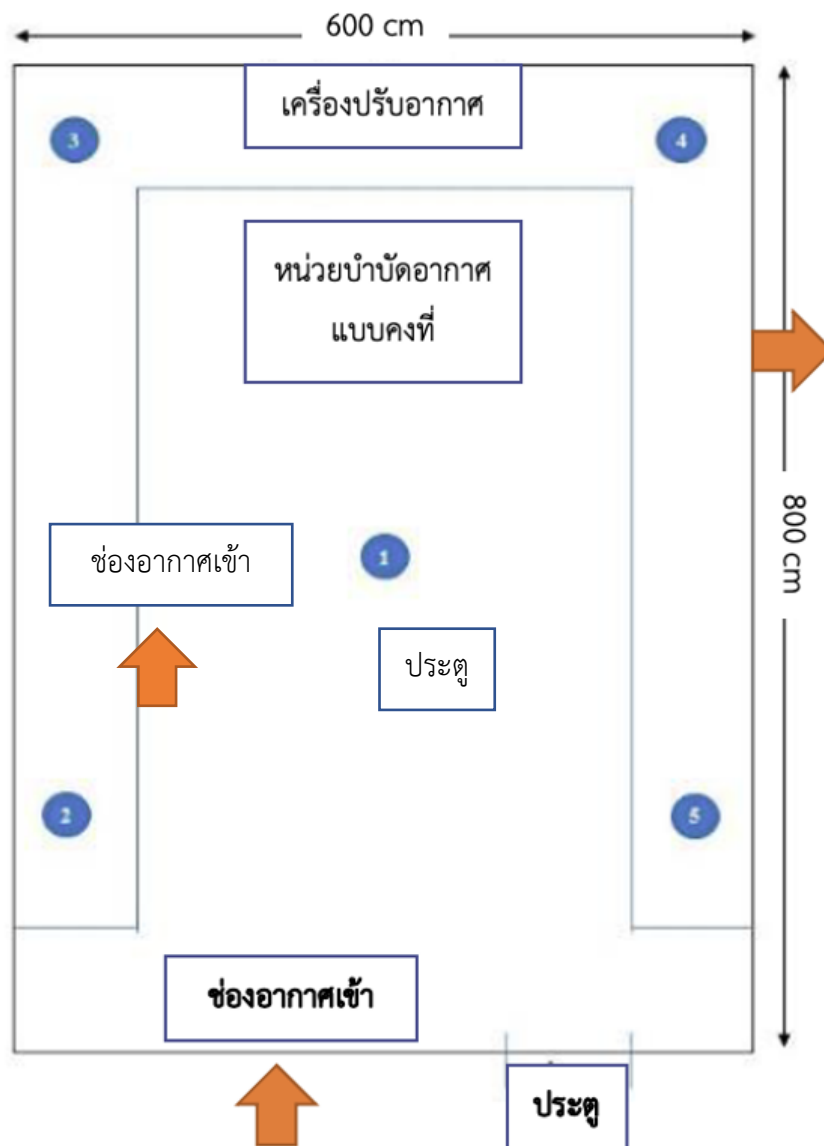
ในการทำการทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ และแบบคงที่นั้นจะทำการติดตั้งเครื่องทั้งสอง ไว้ที่ 2 ส่วน คือ หน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ จะติดตั้งไว้นอกเครื่อง ส่วนหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่จะทำการติดตั้งไว้ภายในห้อง โดยจะใช้ห้องในการทดสอบขนาด 600 x 800 เซนติเมตร โดยภายในห้องมีเครื่องปรับอากาศขนาด 25000 BTU. และมีประตูทางเข้า ช่องดูดอากาศเข้า ช่องดูดอากาศออก ซึ่งในการศึกษาจะทำการวางแผ่นอาหารเลี้ยงเชื้อในการเก็บตัวอย่างเชื้อจำนวน 5 จุด ซึ่งจะทำการทดสอบและเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากการทดสอบ โดยรายละเอียดการทดสอบแสดงดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แผนผังการทดสอบหน่วยบำบัดอากาศทั้งสองแบบ




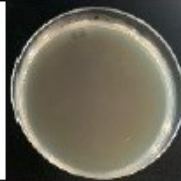


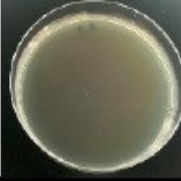
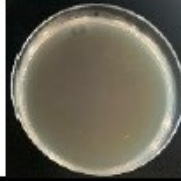







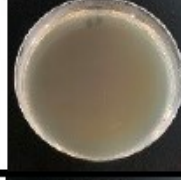




### การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ภายในห้อง

ในการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ภายในห้องจะทำการเก็บตัวอย่างปริมาณเชื้อจาก 5 จุด เพื่อดูประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ ซึ่งจะทำการวัดเปรียบเทียบกับสภาวะปกติในห้อง ซึ่งจุลินทรีย์ที่สนใจจะเป็นจุลินทรีย์รวมที่อยู่ในอากาศภายในห้อง โดยมีแผนผังการวางเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 30 โดยในการเก็บตัวอย่างในสภาวะที่ยังไม่ได้เปิดหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ และเมื่อเปิดไปที่ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 5 และ 6



รูปที่ 30 แผนผังการทดสอบหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่

ตารางที่ 5 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่

จุดทดสอบ	การลดลงของปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ			
	ก่อนการเปิดเครื่องทดสอบ	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 1 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 2 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 3 ชั่วโมง
1				
2				
3				
4				
5				

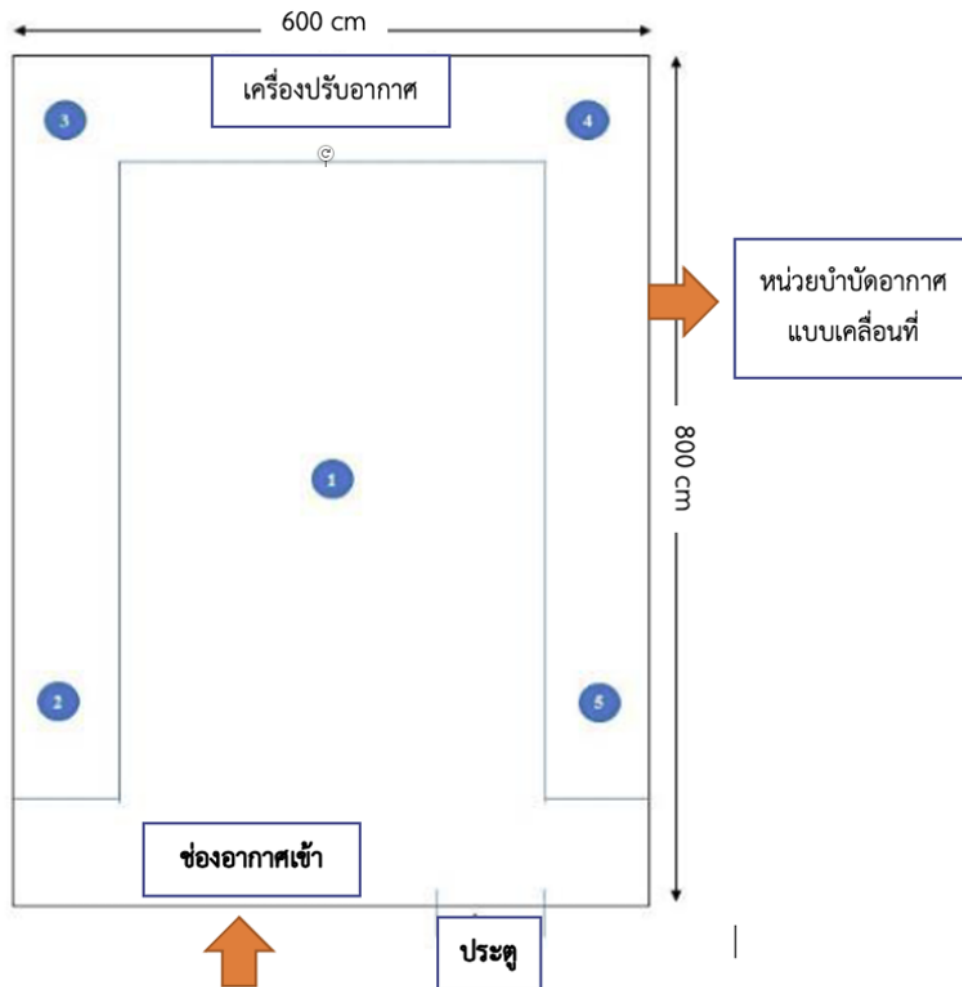
ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่

Sampling points	Reduction of total bacterial (%)		
	After 1 hr operation	After 2 hr operation	After 3 hr operation
1	100.00	100.00	100.00
2	100.00	100.00	100.00
3	100.00	100.00	100.00
4	92.86	100.00	100.00
5	98.75	100.00	100.00

จากตารางที่ 5 และ 6 พบว่า การติดตั้งหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ จากวัสดุพูน จากจีโอพอลิเมอร์ภายในห้องความดันลบ โดยมีการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง คือ เริ่มทดสอบแบบยังไม่มี การเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ เมื่อเปิดหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลาง คงที่เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเริ่มการทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 5 จุด ที่ทำการเก็บตัวอย่างมีจุลินทรีย์กระจายอยู่ในพื้นที่ภายในห้อง และเมื่อมีการเปิดการทำงานของ หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า จุดที่ 4 และ จุดที่ 5 ที่ทำการวาง อาหารเลี้ยงเชื้อ ยังพบจุลินทรีย์ เกิดขึ้น แต่มีปริมาณที่ลดลงจากการไม่เปิดการทำงานของหน่วย บำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 92.86 และ 98.75 และเมื่อมีการเปิดการ ทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่เป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า ทุกจุดที่ทำการเก็บ ตัวอย่างไม่พบปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อทุกจุด แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการทำงานของ หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่เป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมงจะสามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ใน อากาศได้หมด

#### **การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ภายนอกห้อง**

ในการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ภายนอกห้องจะทำการเก็บ ตัวอย่างปริมาณเชื้อจาก 5 จุด เพื่อดูประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำการ วัดเปรียบเทียบกับสภาวะปกติในห้องความดันลบ โดยหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ที่จะติดตั้ง ตรงทางออกของห้อง ซึ่งจุลินทรีย์ที่สนใจจะเป็นจุลินทรีย์รวมที่อยู่ในอากาศภายในห้อง โดยมีแผนผัง การวางเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 31 โดยในการเก็บตัวอย่างในสภาวะที่ยังไม่ได้เปิด หน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ และเมื่อเปิดไปที่ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาแสดงใน ตารางที่ 7 และ 8






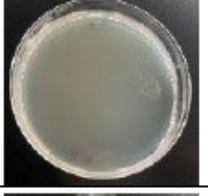
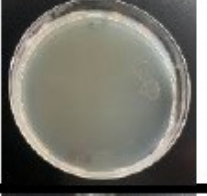


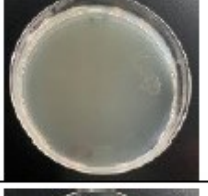
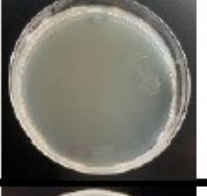
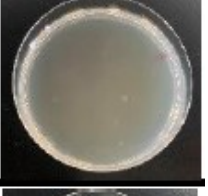
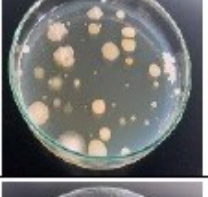
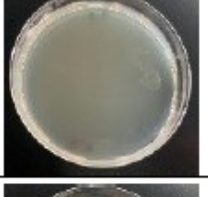
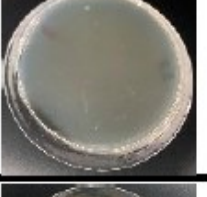
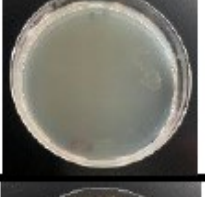

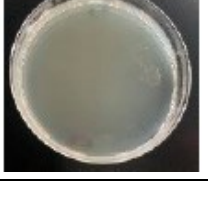
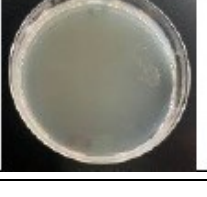



รูปที่ 31 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่

ในการติดตั้งหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ตรงทางดูดอากาศออกของห้องที่ทำการทดสอบ จะทำการปรับตั้งอัตราการไหลเวียนอากาศอยู่ที่ 25 ACH โดยหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่จะทำหน้าที่ในการบำบัดอากาศ ก่อนการปล่อยออกสู่ภายนอกห้อง เพื่อสร้างความปลอดภัยให้กับสิ่งแวดล้อมรอบห้องความดันลบ



ตารางที่ 7 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่

จุดทดสอบ	การลดลงของปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ			
	ก่อนการเปิดเครื่องทดสอบ	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 1 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 2 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 3 ชั่วโมง
1				
2				
3				
4				
5				

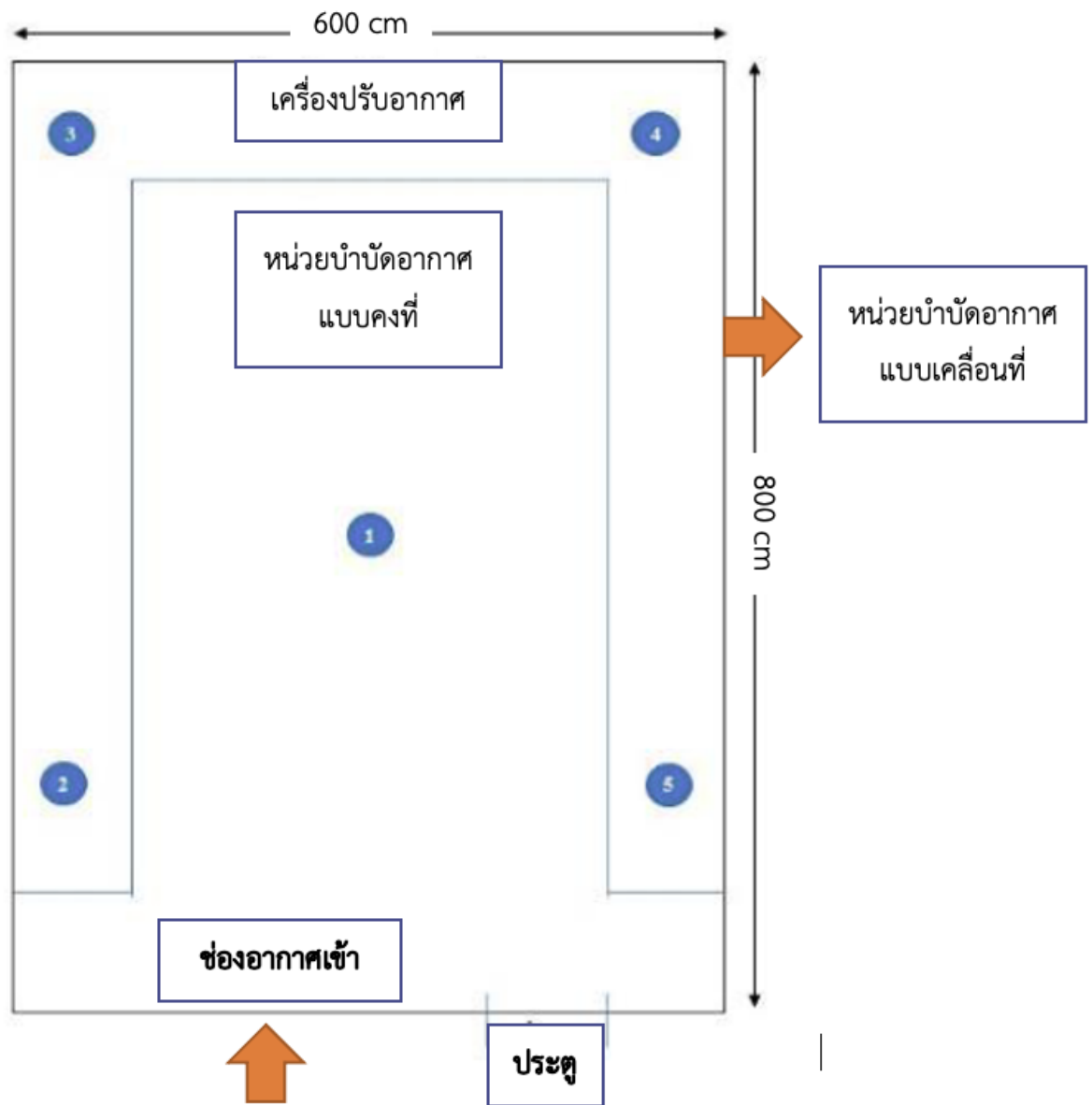
ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่

Sampling points	Reduction of total bacterial (%)		
	After 1 hr operation	After 2 hr operation	After 3 hr operation
1	98.31	100.00	100.00
2	100.00	100.00	100.00
3	98.25	100.00	100.00
4	96.49	98.96	98.99
5	98.33	100.00	100.00

จากตารางที่ 7 และ 8 พบว่า การติดตั้งหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้องความดันลบ โดยมีการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง คือ เริ่มทดสอบแบบยังไม่มีเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ เมื่อเปิดหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเริ่มการทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 5 จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างมีจุลินทรีย์กระจายอยู่ในพื้นที่ภายในห้อง และเมื่อมีการเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศตัวกลางแบบเคลื่อนที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า จุดที่ 1 3 4 และ จุดที่ 5 ที่ทำการวางอาหารเลี้ยงเชื้อ ยังพบจุลินทรีย์ เกิดขึ้น แต่มีปริมาณที่ลดลงจากการไม่เปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 98.31 98.25 96.49 และ 98.33 ตามลำดับ และเมื่อมีการเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่เป็นเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า จุดที่ 4 ยังไม่สามารถทำการกำจัดจุลินทรีย์ในห้องได้หมด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ที่ 98.96 และ 98.99 แสดงให้เห็นว่าในจุดที่ 4 น่าจะเป็นจุดที่ไม่มีการไหลของอากาศอย่างทั่วถึง ทำให้ยังมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ




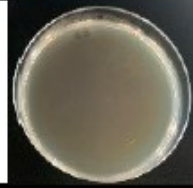










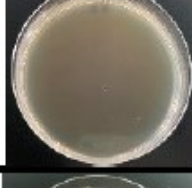
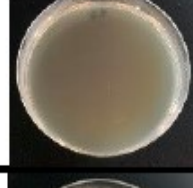




#### **การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง**

ในการทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้องจะทำการเก็บตัวอย่างปริมาณเชื้อจาก 5 จุดภายในห้อง เพื่อดูประสิทธิภาพของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ซึ่งจะทำการวัดเปรียบเทียบกับสภาวะปกติในห้องความดันลบ โดยหน่วยบำบัดอากาศแบบเคลื่อนที่ที่จะติดตั้งตรงทางออกของห้อง ซึ่งจุลินทรีย์ที่สนใจจะเป็นจุลินทรีย์รวมที่อยู่ในอากาศภายในห้อง โดยมีแผนผังการวางเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 32 โดยในการเก็บตัวอย่างในสภาวะที่ยังไม่ได้เปิดหน่วยบำบัดอากาศแบบคงที่ และเมื่อเปิดไปที่ระยะเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ซึ่งผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 9 และ 10



รูปที่ 32 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง

ตารางที่ 9 ปริมาณจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อเมื่อมีการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง

จุดทดสอบ	การลดลงของปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ			
	ก่อนการเปิดเครื่องทดสอบ	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 1 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 2 ชั่วโมง	หลังการเปิดเครื่องทดสอบ 3 ชั่วโมง
1				
2				
3				
4				
5				

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการกำจัดจุลินทรีย์ของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง

Sampling points	Reduction of total mold (%)		
	After 1 hr operation	After 2 hr operation	After 3 hr operation
1	100.00	100.00	100.00
2	100.00	100.00	100.00
3	100.00	100.00	100.00
4	100.00	100.00	100.00
5	100.00	100.00	100.00

จากตารางที่ 9 และ 10 พบว่า การติดตั้งหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้องความดันลบ โดยมีการเก็บตัวอย่าง 4 ครั้ง คือ เริ่มทดสอบแบบยังไม่มีเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ภายในห้อง และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ภายนอกห้อง เมื่อเปิดหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่ที่เป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเริ่มการทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 5 จุดที่ทำการเก็บตัวอย่างมีจุลินทรีย์กระจายอยู่ในพื้นที่ภายในห้อง และเมื่อมีการเปิดการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ทุกจุดที่มีการวางอาหารเลี้ยงเชื้อไม่พบปริมาณการเจริญเติบโตของเชื้อในทุกจุด แสดงให้เห็นว่าการใช้หน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่พร้อมกัน สามารถที่จะใช้ในการบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศได้หมดตั้งแต่ 1 ชั่วโมงแรกของการทำงานของหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางคงที่ และหน่วยบำบัดอากาศแบบตัวกลางเคลื่อนที่

### สรุปผลการศึกษา

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการผลิตตัวกลางในการกรองอากาศจากวัสดุพูนจีโอพอลิเมอร์ โดยการทำการผสมเถ้าชีวมวล แคลเซียมคาร์บอเนต และทำการเผาเพื่อเพิ่มความพรุนในตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรม และสมบัติทางกายภาพ โดยเมื่อปริมาณเถ้าชีวมวล และแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่ากำลัง ความหนาแน่น ลดลง เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณช่องว่างในตัวอย่าง และเมื่อนำไปทำการเผาพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้วัสดุพูนจากจีโอพอลิเมอร์ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความพรุนเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นนำไปทำการทดสอบความสามารถในการ

บำบัดสารอินทรีย์ และเชื้อแบคทีเรีย พบว่า การผสมไทเทเนียมในสารเคลือบในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักสารเคลือบทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 95 เมื่อระยะเวลาในการบำบัดที่ 24 ชั่วโมง และมีความสามารถในการทำลายแบคทีเรีย E.coli และ S.aureus ได้ถึงร้อยละ 98 ดังนั้นจึงนำสัดส่วนนี้มาทำการผลิตตัวกลางแบบคงที่ ส่วนตัวกลางแบบผลิตจาก ABS พื้นที่ผิวทั้งหมดเท่ากับ 1805.67 ตารางมิลลิเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 0.45 กรัมต่อลูกบาศก์ มิลลิเมตร ซึ่งมีรูปทรงเป็นแบบทรงกระบอกกลาง

เมื่อทำการออกแบบหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่ จากการใช้หลักการสร้างการไหลของอากาศแบบปั่นป่วน ภายใน และสร้างเส้นทางในการไหลที่เพิ่มขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มระยะเวลาในการบำบัดอากาศภายในหน่วยบำบัด และทำการสร้างด้วยวัสดุอะคริลิกสีดำ และทำการทดสอบในห้องความดันลบที่มีขนาด 6 x 8 เมตร จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิค cyclone-based air sampling ผลการศึกษาพบว่า หน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่สามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องหมดที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบเคลื่อนที่สามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องได้หมดบางพื้นที่ และมีบางพื้นที่ที่อาจจะไม่มีการไหลเวียนของอากาศน้อย แต่เมื่อใช้ทั้งหน่วยบำบัดที่ใช้ตัวกลางแบบคงที่ และแบบเคลื่อนที่ จะสามารถบำบัดจุลินทรีย์ในอากาศภายในห้องได้หมดตั้งแต่ 1 ชั่วโมง

### ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่น PM 2.5 และ VOC ในอากาศเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มรูปแบบการใช้ประโยชน์ของอุปกรณ์ที่ผลิตภายใต้โครงการวิจัย
- 2) ควรมีการทดสอบกับเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรค ในห้องปฏิบัติการทางชีวภาพที่สามารถรองรับการศึกษาได้
- 3) อาจจะมีการเพิ่มกระบวนการในการกำจัดจุลินทรีย์ ฝุ่น และสารอินทรีย์ระเหยได้เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และลดระยะเวลาของอากาศไหลผ่านในหน่วยบำบัด

## เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, นโยบายป้องกันและขจัดมลพิษภายใต้ นโยบายและแผนการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2540-2559: มลพิษทางอากาศ, Available: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_polair.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_polair.html) [3 กรกฎาคม 2560]

กาญจนา ลือพงษ์ และ นงนุช ศศิธร, 2553, “การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยเทคนิคโฟโตแคตตาไลติกพร้อมกับกระบวนการดูดซับ” คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

ชลดา ธีรการณวงศ์, 2555, “ไทเทเนียมไดออกไซด์: วัสดุฆ่าเชื้อแบคทีเรีย”, วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 40, ฉบับที่ 4, หน้า 1049-1058.

นวพันธ์ ชัยนกิจ, 2557, “อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน” วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL).

นัตดา เวชชากุล, 2555, “การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์”, Technology Promotion, ปีที่ 38, ฉบับที่ 221, หน้า 53-55.

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์, Escherichia coli/E. coli, Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1125/escherichia-coli-e-coli> [26 มิถุนายน 2560]

แมนสรวง วุฒิอุดมเลิศ, บทความเผยแพร่ความรู้สู่ประชาชน: โรคจากมลพิษในอาคาร: Stachybotrys (ตอนที่ 2), Available: <http://www.pharmacy.mahidol.ac.th/knowledge/files/0134.pdf> [3 กรกฎาคม 2560]

วรารุช เสือดี, 2555, “แนวทางการจัดการสารอินทรีย์ระเหย (VOCs)”, มาบตาพุดการพิมพ์: ระยอง.

วีระชัย แสงฉาย, อรสา นนมใส และ พิเชษฐ จันทวี, 2559. สมบัติโฟโตแคตตาไลติกและการฆ่าเชื้อ E. coli ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ปด้วย Fe. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี., 7(1), pp.46-56.

ศิริยาภรณ์ ศิวีไล, 2554, “สารระนำรู้: โทเทเนียมไดออกไซด์” จดหมายข่าวศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, ปีที่ 3, ฉบับที่ 9, หน้า 6-7.

สมชัย บวรกิตติ, อากาศพิษในอาคาร, <http://www.healthcarethai.com/%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8%E0%B8%9E%E0%B8%B4%E0%B8%A9%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%B2%E0%B8%A3/> [3 กรกฎาคม 2560]

สรรงค์ จิตรไคร์ครวญ, 2552 “การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์”, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, หน้า 21-24.

สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มลพิษทางอากาศ, Available: <http://www.sut.ac.th/im/data/LecAP5.pdf> [3 กรกฎาคม 2560]

สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัยกระทรวงสาธารณสุข, 2555, “คู่มือวิชาการ เรื่อง สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (Volatile Organic Compounds: VOCs)”, สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์: กรุงเทพฯ

Etacheri, V., Di Valentin, C., Schneider, J., Bahnemann, D. and Pillai, S.C., 2015. Visible-light activation of TiO<sub>2</sub> photocatalysts: advances in theory and experiments. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 25, pp.1-29.

Hasmaliza, M., Foo, H.S. and Mohd, K., 2016. Anatase as antibacterial material in ceramic tiles. *Procedia Chemistry*, 19, pp.828-834.

Janus, M., Zatorska, J., Czyżewski, A., Bubacz, K., Kusiak-Nejman, E. and Morawski, A.W., 2015. Self-cleaning properties of cement plates loaded with N, C-modified TiO<sub>2</sub> photocatalysts. *Applied Surface Science*, 330, pp.200-206.

Mo, J., Zhang, Y., Xu, Q., Lamson, J.J. and Zhao, R., 2009. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: a literature review. *Atmospheric Environment*, 43(14), pp.2229-2246.



Niederhäusern, S., Bondi, M. and Bondioli, F., 2013. Self-cleaning and antibacteric ceramic tile surface. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 10(6), pp.949-956.

Regonini, D., Bowen, C.R., Jaroenworoluck, A. and Stevens, R., 2013. A review of growth mechanism, structure and crystallinity of anodized TiO<sub>2</sub> nanotubes. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(12), pp.377-406.

Rtimi, S., Pulgarin, C., Robyr, M., Aybush, A., Shelaev, I., Gostev, F., Nadtochenko, V. and Kiwi, J., 2017. Insight into the catalyst/photocatalyst microstructure presenting the same composition but leading to a variance in bacterial reduction under indoor visible light. *Applied Catalysis B: Environmental*, 208, pp.135-147.

Tryba, B., Piszcz, M. and Morawski, A.W., 2010. Photocatalytic and self-cleaning properties of Ag-doped TiO<sub>2</sub>. *Open Materials Science Journal*, 4, pp.5-8.

Zou, M., Xiong, F., Ganeshraja, A.S., Feng, X., Wang, C., Thomas, T. and Yang, M., 2017. Visible light photocatalysts (Fe, N): TiO<sub>2</sub> from ammonothermally processed, solvothermal self-assembly derived Fe-TiO<sub>2</sub> mesoporous microspheres. *Materials Chemistry and Physics*, (195), pp.259-267.