

การเตรียมสื่อน้ำทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้ผงอะลูมิเนียม  
และนาโนเซลลูโลส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF HEAT REFLECTION AND THERMAL INSULATION WATER-BASED  
EXTERIOR PAINT USING ALUMINIUM POWDER AND NANOCELLULOSE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การเตรียมสื่อน้ำทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและ |
|                                 | เป็นฉนวนความร้อนโดยใช้ผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส   |
| โดย                             | น.ส.ธนิกันต์ ชุนภักดี                                |
| สาขาวิชา                        | ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์                     |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ                     |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| .....                                     | คณบดีคณะวิทยาศาสตร์             |
| (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)          |                                 |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์                  |                                 |
| .....                                     | ประธานกรรมการ                   |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ)    |                                 |
| .....                                     | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)        |                                 |
| .....                                     | กรรมการ                         |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ) |                                 |
| .....                                     | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย        |
| (รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)             |                                 |



# # 6172403923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Nanocellulose, Heat Buildup, Exterior Paint, Insulation, Insulator

Thanikarn Khunpakdee : PREPARATION OF HEAT REFLECTION AND THERMAL INSULATION WATER-BASED EXTERIOR PAINT USING ALUMINIUM POWDER AND NANOCELLULOSE. Advisor: Assoc. Prof. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D.

Exterior water-based paints containing aluminium powder and nanocellulose (bacterial nanocellulose, SCOBY bacterial cellulose; plant nanocellulose) were prepared, aiming to improve reflection and thermal insulation property of the exterior paint. The formulated paints were coated onto fiber-cement plain sheet and allowed to be dry for 168 h. The results showed that the paint mixed with aluminium powder and nanocellulose exhibited poorer thermal reflection and thermal conductivity performance due to unsuitable experimental design. Therefore, nanocellulose containing paints were further studied in this study. Two types of nanocellulose (from bacterial cellulose and plant cellulose) were employed. Paint formulations were prepared as follows; 0.19 wt%, 0.38 wt%, 0.58 wt% and 0.82 wt% for SCOBY bacterial nanocellulose and 0.50 wt%, 1.01 wt%, 1.51 wt% and 2.16 wt% for plant nanocellulose, respectively. The percent of temperature difference ( $\%T_{dif}$ ) between direct heating surface and the opposite side was calculated. The control paint has 3.67  $\%T_{dif}$ . It was observed that exterior paints containing SCOBY bacterial nanocellulose have  $\%T_{dif}$  as follows: 8.16%, 6.21%, 7.70% and 12.41%. While  $\%T_{dif}$  of plant nanocellulose are 3.26%, 7.33%, 9.14% and 10.18% when compared to 8.24% of commercial benchmark. The results showed that the addition of nanocellulose could improve thermal insulation property over the control paint due to low thermal conductivity of nanocellulose.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature .....

Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำทางวิชาการ รวมทั้งแนวทางในการดำเนินการ ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จากผู้เกี่ยวข้องตั้งรายนามต่อไปนี้ กราบขอบพระคุณ

1. รศ.ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำทางวิชาการ ให้ความรู้และความเข้าใจในงานที่ทำ ตลอดจนให้ความเอื้อเฟื้อในเรื่องวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการทดลองและแนวทางในการแก้ไขปัญหา จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์
2. ผศ.ดร.วรินทร์ ชวศิริ ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำในขั้นตอนต่างๆ ของการสอบ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์
3. รศ.ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์
4. รศ.ดร.อรอุษา สรวารี ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์
5. เจ้าหน้าที่และเพื่อน ๆ หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี
6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ
7. บริษัท กุลวงศ์ จำกัด และ บริษัท ภิดู จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบในการทดสอบ
8. บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนเงินทุนการศึกษา  
สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา เพื่อน รุ่นพี่ และพี่ที่ทำงานบริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ทั้งคุณพัชรี พัฒนาสิทธิเสรี และคุณธนิช เฉลิมบงกช ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและคำแนะนำเป็นอย่างดีแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ธนิกานต์ ขุนภักดี

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ค    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | จ    |
| สารบัญ.....  | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....   | ญ    |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ .....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....                                      | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....  | 3    |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                   | 3    |
| บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....   | 4    |
| 2.1 สีนํ้าทาอาคาร.....   | 4    |
| 2.1.1 ความหมายของสีนํ้าทาอาคาร.....                                  | 4    |
| 2.1.2 วัตถุประสงค์หลักของสีนํ้าทาอาคาร.....                          | 4    |
| 2.1.2.1 ผงสีแบบให้กำลั้งซ่อนแสงสูง (Hiding Pigment).....             | 5    |
| 2.1.2.2 ผงสีแบบให้กำลั้งซ่อนแสงต่ำ (Filler or Extender pigment)..... | 9    |
| 2.1.2.3 สารยัดหรือกาว .....  | 10   |
| 2.1.2.4 ตัวทำละลายหรือตัวเจือจางในระบบ .....                         | 10   |
| 2.1.2.5 สารเติมแต่ง.....   | 11   |
| 2.1.3 กระบวนการผลิตสีนํ้าทาอาคาร .....                               | 12   |
| 2.1.3.1 การเริ่มผสม (premixing หรือ pre-disperse).....               | 12   |

|  |    |
|--|----|
| 2.1.3.2 การบด (grinding).....                                  | 12 |
| 2.1.3.3 การเติมส่วนประกอบช่วงท้าย (let down) .....             | 12 |
| 2.2 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose) .....                         | 12 |
| 2.2.1 ชนิดของนาโนเซลลูโลส .....                                | 13 |
| 2.2.2 การผลิตและการเตรียมนาโนเซลลูโลส [7].....                 | 14 |
| 2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน (application).....                     | 17 |
| 2.2.4 สมบัติในการเป็นฉนวน .....                                | 18 |
| 2.3 อะลูมิเนียม .....  | 18 |
| 2.3.1 สมบัติในการสะท้อนความร้อน .....                          | 19 |
| 2.3.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความร้อน .....                      | 20 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                | 21 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....                                | 23 |
| 3.1 วัสดุและสารเคมี.....                                       | 23 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....                                 | 24 |
| 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสี .....            | 24 |
| 3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแผ่นทดสอบ .....     | 24 |
| 3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลคุณภาพของสี .....   | 24 |
| 3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านอุณหภูมิของสี.....     | 25 |
| 3.3 ขอบเขตการทดลอง .....                                       | 25 |
| 3.3.1 การเตรียมสีสำหรับทดสอบอุณหภูมิ .....                     | 26 |
| 3.3.1.1 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน .....    | 27 |
| 3.3.1.2 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน.....     | 28 |
| 3.3.1.3 การเตรียมสีชุดที่เติม SCOPY BC และ EU NCC.....         | 29 |
| 3.3.2 การทำสีแผ่นสำหรับทดสอบอุณหภูมิและวัดความหนาฟิล์มสี ..... | 29 |



|   |    |
|---|----|
| 3.3.3 การทดสอบอุณหภูมิและสมบัติทางความร้อนของสี .....   | 30 |
| 3.3.3.1 การทดสอบความร้อนสะสม (heat buildup) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 และการคำนวณค่าความร้อนสะสม .....   | 30 |
| 3.3.3.2 การทดสอบอุณหภูมิที่ผิวของฟิล์มสีทั้งด้านหน้าแผ่นทดสอบที่ได้รับแสงจากหลอดไฟโดยตรงและด้านหลังแผ่นทดสอบที่ไม่ได้รับแสงจากหลอดไฟโดยตรง ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermoscan) .....          | 32 |
| 3.3.3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสี ..... | 32 |
| 3.3.4 วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) .....   | 33 |
| 3.3.5 การทดสอบคุณภาพของสีตัวอย่าง .....   | 34 |
| 3.3.5.1 ความละเอียดของเนื้อสี .....   | 34 |
| 3.3.5.2 กำลังซ่อนแสง .....  | 34 |
| 3.3.5.3 เสถียรภาพต่อการเก็บ .....   | 35 |
| 3.3.5.4 เสถียรภาพต่อการเก็บที่อุณหภูมิสูง .....   | 35 |
| 3.3.5.5 การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ .....  | 35 |
| 3.3.5.6 การทดสอบความทนทานต่อน้ำ .....   | 36 |
| 3.3.5.7 การทดสอบความทนทานต่อต่าง .....  | 36 |
| 3.3.5.8 การทดสอบความทนทานต่อการขีดถู .....  | 36 |
| 3.3.5.9 การทดสอบความชื้นของสี .....   | 37 |
| 3.3.5.10 การทดสอบความหนาแน่นของสี .....   | 37 |
| 3.3.5.11 การทดสอบหาของแข็งที่ไม่ระเหยของสี .....  | 38 |
| 3.3.5.12 การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของสี .....  | 38 |
| 3.3.5.13 การทดสอบเฉดสี .....  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.5.14 การทดสอบความเงาของฟิล์มสี.....  | 38 |
| 3.3.5.15 การทดสอบความทนทานต่อการเกาะฝุ่น .....   | 39 |
| 3.3.5.16 การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศตามสภาวะจริง.....   | 39 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....   | 40 |
| 4.1 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803.....  | 40 |
| 4.1.1 ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน .....   | 40 |
| 4.1.2 ค่าความร้อนสะสมชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน .....  | 45 |
| 4.1.3 ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOPY BC และ EU NCC.....  | 49 |
| 4.2 ความสามารถในการนำความร้อนของสี (Thermoscan) .....  | 55 |
| 4.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis .....                     | 57 |
| 4.4 วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)..... | 60 |
| 4.5 ผลทดสอบคุณภาพของสี .....   | 62 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....  | 65 |
| 5.1 ผลของการเติมผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส .....   | 65 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 66 |
| บรรณานุกรม.....  | 67 |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 69 |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการปิดบังพื้นผิวของผนังของผนังที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง .....                       | 6    |
| ตารางที่ 2.2 ดัชนีหักเหของผนังที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง .....   | 7    |
| ตารางที่ 2.3 สมบัติของผนังที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง.....  | 7    |
| ตารางที่ 2.4 ดัชนีหักเหของผนังแบบกำลังซ่อนแสงต่ำ.....   | 10   |
| ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่มีการใช้งานในสีน้ำทาอาคาร [11] .....                            | 11   |
| ตารางที่ 2.6 แหล่งที่มาของนาโนเซลลูโลส [7].....   | 16   |
| ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....  | 23   |
| ตารางที่ 3.2 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน.....                                       | 27   |
| ตารางที่ 3.3 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน.....                                       | 28   |
| ตารางที่ 3.4 การเตรียมสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC .....  | 29   |
| ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน .....                 | 42   |
| ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน .....                 | 45   |
| ตารางที่ 4.3 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC ..               | 49   |
| ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและด้านล่างเพื่อดูประสิทธิภาพการเป็นฉนวน..... | 53   |
| ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง.....                                       | 56   |
| ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของตัวอย่างสีที่ผสม SCOBY BC หรือ EU NCC .....       | 57   |
| ตารางที่ 4.7 เกณฑ์ทดสอบคุณภาพของสี.....   | 62   |
| ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ .....  | 63   |

## สารบัญรูปภาพ

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของสีน้ำ.....  | 4    |
| รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของผงสีอนินทรีย์ .....  | 5    |
| รูปที่ 2.3 ค่าสัดส่วน PVC ที่ส่งผลต่อสมบัติของสี [10] .....   | 8    |
| รูปที่ 2.4 การปิดบังพื้นผิวของสีน้ำทาอาคารที่ใช้ผงสีแบบให้กำลังซ่อนแสงสูงและกำลังซ่อนแสงต่ำ<br>ชนิดต่าง ๆ.....  | 9    |
| รูปที่ 2.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนาโนเซลลูโลสทั้ง 3 แบบ<br>(a) nanofibrillated cellulose (b) nanocrystalline cellulose และ (c)<br>bacterialnanocellulose..... | 14   |
| รูปที่ 2.6 ผงสีอะลูมิเนียมชนิด leafing (ซ้าย) และ non-leafing (ขวา).....  | 19   |
| รูปที่ 3.1 แบบจำลองชุดทดสอบอุณหภูมิตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4803 .....  | 31   |
| รูปที่ 3.2 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน Thermomechanical<br>Analysis (TMA).....  | 33   |
| รูปที่ 3.3 เกจและเหล็กปาด (ซ้าย) และตัวอย่างการอ่านค่าความละเอียดที่ 45 $\mu\text{m}$ (ขวา) .....   | 34   |
| รูปที่ 3.4 แปรงขัดและเครื่อง wet abrasion scrub tester (ซ้าย) และแผ่นไวน์ลีสดำที่ขัดถูเสร็จแล้ว<br>(ขวา).....   | 37   |
| รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความขุ่นแบบ stormer-type .....   | 37   |
| รูปที่ 3.6 การวัดความเงาที่มุม 60 และ 85 องศา (ซ้าย) เครื่องวัดความเงา (ขวา) .....  | 38   |
| รูปที่ 4.1 ผลต่างอุณหภูมิของฟิล์มสีกับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat<br>buildup, $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม Al เทียบกับสีที่เติม CO NCC.....          | 42   |
| รูปที่ 4.2 ผลอุณหภูมิค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบ<br>แยกกัน.....   | 43   |
| รูปที่ 4.3 ผลทดสอบอุณหภูมิด้านบนของแผ่นกระเบื้อง (ด้านที่ทาสี) ภายใต้สภาวะความร้อนจาก<br>หลอดไฟ.....  | 44   |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.4 ผลต่างอุณหภูมิของสีกับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat buildup, $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน.....   | 46 |
| รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน.....  | 47 |
| รูปที่ 4.6 ผลอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ .....   | 48 |
| รูปที่ 4.7 ผลต่างอุณหภูมิของสีที่กับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat buildup, $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม SCOBY BC เทียบกับ EU NCC .....                                       | 50 |
| รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC.....   | 51 |
| รูปที่ 4.9 ผลอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC .....   | 52 |
| รูปที่ 4.10 ลักษณะของ SCOBY BC และ EU NCC ที่นำมาผสมกับน้ำในสูตรทดลองก่อนเติมในสี..   | 54 |
| รูปที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบน (รูปซ้าย) และผิวด้านล่าง (รูปขวา) ของแผ่นทดสอบที่ตรวจวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermoscan) แหล่งกำเนิดความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) 250 วัตต์.....            | 55 |
| รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน สีสูตรมาตรฐาน .....   | 58 |
| รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานสีที่เติม (a) SCOBY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก (b) SCOBY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก (c) SCOBY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก และ (d) SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก..... | 58 |
| รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานสีที่เติม (a) EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก (b) EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก (c) EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก และ (d) EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก .....        | 59 |
| รูปที่ 4.15 โครงสร้างของ SCOBY BC จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....  | 60 |
| รูปที่ 4.16 โครงสร้างของ EU NCC จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....  | 61 |

รูปที่ 4.17 फिल्मสีสูตรมาตรฐาน (ซ้าย) สีที่เติม SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก (กลาง) และ फिल्मสี  
ที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก (ขวา)..... 61



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นส่งผลต่อการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าค่าปกติประมาณ 1.1 องศาเซลเซียสซึ่งนับเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอันดับ 1 ของประเทศในรอบ 69 ปี (พ.ศ.2494 – 2562) โดยในช่วง 8 ปีล่าสุด (พ.ศ.2555 – 2562) เป็นช่วงที่ประเทศไทยมีอุณหภูมิร้อนมากที่สุด มีอุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย และอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยสูงกว่าค่าปกติตลอดช่วง โดยเฉพาะอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยที่สูงกว่าค่าปกติชัดเจนอยู่ในเกณฑ์ 0.5 – 1.0 องศาเซลเซียส [1] ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อผู้อยู่อาศัยในอาคารเนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้าสู่อาคารมีสัดส่วนสูงกว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายใน คิดเป็นร้อยละ 60 ของเครื่องปรับอากาศ [2]

การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) จะเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ลักษณะการถ่ายเทความร้อนนั้นมี 3 วิธี โดยอาจเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลาย ๆ วิธีพร้อมกัน ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) [3] วิธีลดความร้อนภายในตัวอาคารนอกจากการใช้เครื่องปรับอากาศซึ่งเห็นผลชัดเจน แต่มีค่าใช้จ่ายและปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้น [4] ยังมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ช่วยลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร ฉนวนที่นิยมติดตั้งได้แก่ ฉนวนใยแก้ว ฉนวนใยแร่ และฉนวนเซลลูโลส แต่การใช้ฉนวนมีข้อเสียคือการเสื่อมสภาพของฉนวนเนื่องจากความชื้น การยุบตัวของฉนวนเนื่องจากแรงสั่นสะเทือน การสะสมความร้อนในเวลากลางวันและคายความร้อนในเวลากลางคืน เป็นต้น [5] แนวคิดเรื่องการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่มีสมบัติป้องกันอุณหภูมิสำหรับอาคารที่อยู่อาศัยจึงเกิดขึ้น หนึ่งในวัสดุที่เข้ามามีบทบาทคือสีน้ำทาอาคารสำหรับทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนกันความร้อน ช่วยลดความร้อนให้ผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้

บทบาทของสีน้ำทาอาคาร (water-based paint) สำหรับผู้บริโภคคือปกป้องพื้นผิวผนังซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของบ้านและอาคารให้มีความคงทนต่อสภาวะอากาศ และเพิ่มความสวยงามของตัวอาคารจากสีที่เลือกใช้ แต่ปัจจุบันนอกจากความคงทนของฟิล์มสีแล้ว ปัญหาอุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ผู้ผลิตสีน้ำทาอาคารพัฒนาสีที่เพิ่มสมบัติลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร

โดยงานวิจัยนี้ใช้หลักการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงใกล้อินฟราเรด (Near - infrared) จากสมบัติความเงาของผงอะลูมิเนียมที่ช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดและดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่ำ และใช้นาโนเซลลูโลสเพื่อลดความร้อนที่หลงเหลือจากการสะท้อน โดยนาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีสมบัติการนำความร้อนต่ำ มีค่าการนำความร้อนอยู่ที่ช่วง 0.04 – 0.05 W/(m.K) [6] สามารถเตรียมได้จากพืชและแบคทีเรีย นาโนเซลลูโลสจากพืชยังสามารถแบ่งออกเป็นนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใย (nanofibrill cellulose) และนาโนเซลลูโลสแบบผลึก (nanocrystalline cellulose) อย่างไรก็ตามทั้งนาโนเซลลูโลสจากพืชและจากแบคทีเรียจะมีความพรุน มีน้ำหนักเบา และมีความคงทนต่ออุณหภูมิเช่นกัน [7]

งานวิจัยนี้พัฒนาสีน้ำทาอาคารสำหรับภายนอก โดยนำสูตรสีน้ำทาอาคารที่มีส่วนผสมหลักเป็นผงสีที่ช่วยเรื่องกำลังซ่อนแสง สารยึด ตัวเจือจางซึ่งในสีอิมัลชันคือน้ำ และสารเติมแต่ง มาเติมผงอะลูมิเนียมเพื่อช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรด และเติมนาโนเซลลูโลสจากพืชและแบคทีเรียด้วยอัตราส่วนต่าง ๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสะท้อนและการเป็นฉนวนของฟิล์มสี วิธีเตรียมเริ่มจากการผสมวัตถุดิบที่ใช้ในสูตรสีน้ำทาอาคาร ได้แก่ น้ำ สารเติมแต่งซึ่งประกอบไปด้วยสารช่วยกระจายตัว สารที่ทำให้เปียก และสารป้องกันการเกิดฟอง ตามสัดส่วนสูตรมาตรฐานลงในเครื่องปั่นกวนสีแบบปรับความเร็วรอบสูงได้ (High speed disperser) และปั่นกวนให้เข้ากันด้วยใบพัดความเร็วรอบปานกลาง ระยะเวลาปั่นกวนประมาณ 5 – 10 นาที จากนั้นเติมส่วนผสมหลักซึ่งเป็นผงสี ได้แก่ ผงไทเทเนียม ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ผงดินขาว และสูตรที่เติมผงอะลูมิเนียมให้ใส่ในช่วงนี้ด้วย ปั่นกวนต่อด้วยความเร็วรอบสูงเพื่อให้ได้ความละเอียดของสีตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยใช้เครื่องมือสำหรับอ่านค่าความละเอียด จากนั้นเติมสารยึดและน้ำในช่วงท้ายสูตรตามลำดับ ปั่นกวนต่อให้เข้ากันระยะเวลาประมาณ 20 – 30 นาที กรณีสูตรที่เติมนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียจะเติมนาโนเซลลูโลสแทนที่น้ำช่วงท้ายสูตร ตามสัดส่วนดังต่อไปนี้ ร้อยละ 0.19 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 0.38 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 0.58 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 0.82 โดยน้ำหนัก และสำหรับสูตรที่เติมนาโนเซลลูโลสจากพืชจะทำการเติมนาโนเซลลูโลสแทนที่น้ำช่วงท้ายสูตร ตามสัดส่วนดังต่อไปนี้ ร้อยละ 0.50 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 1.01 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 1.51 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 2.16 โดยน้ำหนัก

เมื่อเตรียมสีสำหรับทาแผ่นทดสอบเรียบร้อยแล้ว นำสีแต่ละสูตรมาทาแผ่นทดสอบอุณหภูมิบนกระเบื้องด้วยจำนวนรอบและความหนาฟิล์มที่เท่ากัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเป็นฉนวนกันความร้อนของฟิล์มสีด้วยชุดกล่องทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4803 จำลองการทาสีบนผนังอาคารทดสอบความสามารถในการนำความร้อนของสีด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน



(Thermoscan) ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสี และวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รวมทั้งทดสอบคุณภาพของสีหลังเติมด้วยผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาสีน้ำทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้ผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส
2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติการลดความร้อนของฟิล์มสี

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรสีน้ำทาภายนอกที่สามารถสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

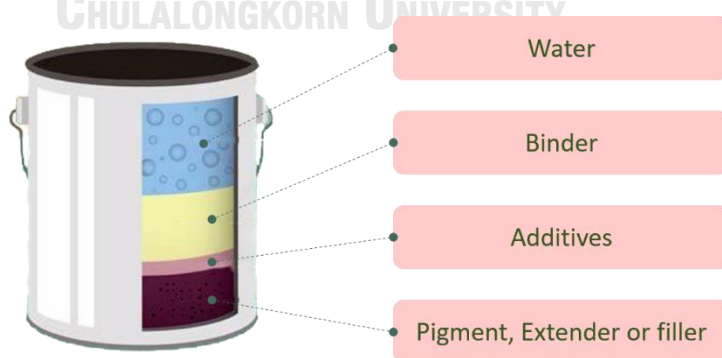
#### 2.1 สีน้ำทาอาคาร

##### 2.1.1 ความหมายของสีน้ำทาอาคาร

สีน้ำทาอาคารคือสารที่ใช้สำหรับเคลือบผิวสิ่งปลูกสร้างประเภทผนังก่ออิฐฉาบปูนและผนังสำเร็จรูป (Pre-Cast) เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะอากาศและสารเคมี และเพื่อตกแต่งพื้นผิวให้ดูสวยงาม สีน้ำทาอาคารได้รับความนิยมเนื่องจากใช้งานง่ายโดยนำมาผสมกับน้ำสะอาด มีกลิ่นอ่อนไม่เป็นพิษต่อผู้ใช้งาน สีน้ำทาอาคารแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือสีทาภายนอกสำหรับทาผนังที่ได้รับแสงแดดโดยตรงและสีทาภายในซึ่งใช้สำหรับทาผนังภายในตัวบ้านหรืออาคารรวมถึงทาฝ้า โดยสีน้ำทาอาคารทั้งสองประเภทนี้แตกต่างกันที่สัดส่วนและชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในสูตร โดยวัตถุดิบหลักของสีน้ำทาอาคารมีดังนี้ [8]

##### 2.1.2 วัตถุดิบหลักของสีน้ำทาอาคาร

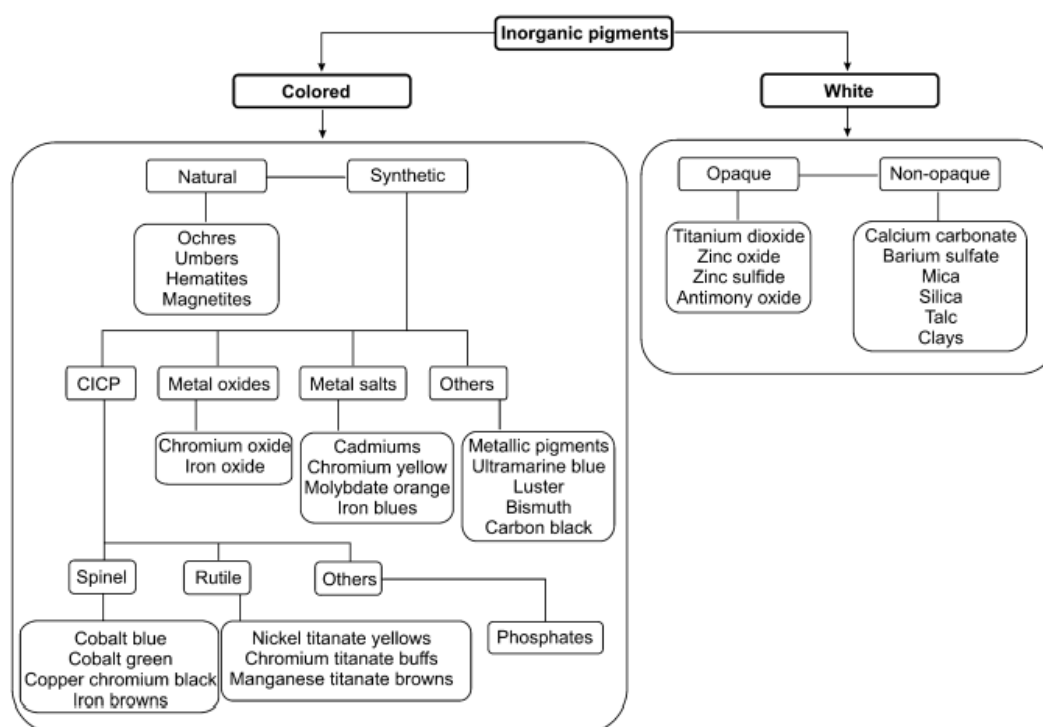
ส่วนประกอบหลักของสีน้ำทาอาคารได้แก่ ผงสีซึ่งมีทั้งผงสีที่มีกำลังซ่อนแสงสูง (hiding pigment) และผงสีแบบกำลังซ่อนแสงต่ำ (filler or extender pigment) สารยึด (binder) ตัวทำละลายหรือตัวเจือจางในระบบ (solvent, water) และสารเติมแต่ง (additives) ตามสัดส่วนที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของสีน้ำ

### 2.1.2.1 ผงสีแบบให้กำลั้งซ่อนแสงสูง (Hiding Pigment)

ผงสีคือสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีสีในตัวเอง มักนิยมใช้เป็นสารให้สีในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวเช่น สีน้ำทาอาคาร สีเคลือบวัสดุ เป็นต้น และยังส่งผลต่อสมบัติบางประการของสี เช่น เสถียรภาพต่อการเก็บ และการกระจายตัวของสี ผงสีสามารถแบ่งประเภทได้ตามโครงสร้างทางเคมี (chemical structure) สมบัติในการปิดบังพื้นผิว (optical properties) และเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต (technological properties) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [9]



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของผงสีอนินทรีย์

โดยปกติผงสีสีขาวที่เป็นสารอนินทรีย์นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของสีน้ำทาอาคารมากที่สุด เนื่องจากเป็นพื้นฐานในการทำให้เกิดสีอื่น ๆ (shade) ต่อ หรือจะใช้งานในรูปสีขาวเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำได้ ซึ่งผงสีสีขาวจะมีทั้งแบบที่ให้กำลั้งซ่อนแสงสูงและแบบที่ให้กำลั้งซ่อนแสงต่ำ ผงสีแบบให้กำลั้งซ่อนแสงสูงเป็นผงสีที่มีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวได้ดี (hiding power) เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหมากกว่า 1.65 (ยิ่งผงสีมีค่าดัชนีหักเหแสงสูงยิ่งมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิวได้ดี) [8] สมบัติของผงสีที่สำคัญ ได้แก่

ความคงทนต่อแสง (lightfastness) คือ ความสามารถในการคงสภาพสีเดิมไว้เมื่อได้รับแสงแดดและมลภาวะอากาศเป็นระยะเวลานานติดต่อกัน ไม่ซีดจาง มีอายุการใช้งานของเม็ดสีเท่ากับอายุการใช้งานของฟิล์มสี เนื่องจากผงสีบางชนิดเมื่อถูกแสงแดดมักซีดลงหรือคล้ำขึ้น หรือเกิดการเหลืองของฟิล์มสีในกรณีที่เป็นสีขาว หรือบางชนิดอาจเสื่อมสภาพเป็นฝุ่นผงขาว เพราะรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์สามารถทำลายพันธะเคมีของผงสีได้ ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลผงสีเปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงที่มองเห็นได้ (visible) ของผงสีเป็นผลให้สีเปลี่ยนไป

การคายสี (Bleeding) คือ การที่ผงสีเกิดการละลายในตัวทำละลายบางชนิด เช่น การทาสีสีขาวทับไปบนฟิล์มสีที่ทาสีแดงไว้จะเกิดสีชมพูขึ้น เพราะตัวทำละลายของสีสีขาวสามารถละลายผงสีแดงบางส่วนได้ และซึมเข้าไปในฟิล์มสีขาวที่ทาทับอยู่ แสดงให้เห็นว่าผงสีแดงคุณภาพไม่ดีและเกิดการคายสีได้ง่าย

กำลังซ่อนแสง (hiding power) ความสามารถในการปิดบังพื้นผิวของสีขึ้นกับความยาวคลื่นและปริมาณของแสงที่ผงสีดูดกลืน นอกจากนี้ยังขึ้นกับดัชนีหักเหของผงสี ขนาดและรูปร่างของอนุภาคผงสีด้วย กำลังซ่อนแสงของสีแสดงโดยจำนวนพื้นที่เป็นตารางฟุตหรือตารางเมตรที่ได้จากสี 1 แกลลอน หรือ 1 ลิตร ซึ่งถ้าสีในหนึ่งแกลลอนนั้นสามารถปิดบังพื้นผิวได้ดีตั้งแต่ทาเที่ยวแรกก็จะทำให้จำนวนรอบในการทาสีลดลงและไม่เปลืองค่าใช้จ่ายในการซื้อสี

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการปิดบังพื้นผิวของผงสีสีขาวที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง

| ผงสี                       | ค่ากำลังซ่อนแสง |
|----------------------------|-----------------|
| Titanium dioxide (Rutile)  | 147 – 157       |
| Titanium dioxide (Anatase) | 115             |
| Zinc sulfide               | 58              |
| Lithopone                  | 27              |
| Antimony oxide             | 22              |
| Zinc oxide                 | 20              |
| 35% Leaded zinc oxide      | 20              |

ตารางที่ 2.2 ดัชนีหักเหของผงสีสีขาวที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง

| ผงสี                       | ดัชนีหักเหแสง |
|----------------------------|---------------|
| Hiding pigments            |               |
| Titanium dioxide (Rutile)  | 2.73-2.55     |
| Titanium dioxide (Anatase) | 2.55          |
| Zinc sulfide               | 2.37          |
| Antimony oxide             | 2.09          |
| Zinc oxide                 | 2.02          |

ตารางที่ 2.3 สมบัติของผงสีสีขาวที่มีค่ากำลังซ่อนแสงสูง

| ผงสีสีขาวชนิดปิดบัง        | Density | Oil absorption<br>(g oil/100 g<br>pigment) | Hiding power<br>(ft <sup>2</sup> /lb.<br>pigment) | Tinting<br>strength |
|----------------------------|---------|--|---|---------------------|
| TiO <sub>2</sub> (Rutile)  | 4.2     | 17 – 26                                    | 147   | 1,000               |
| TiO <sub>2</sub> (Anatase) | 3.9     | 18 – 33                                    | 115   | 1,250               |
| Zinc sulfide               | 4.1     | 20   | 58  | 640                 |
| Lithopone                  | 4.3     | 15 – 18                                    | 27  | 280                 |
| Antimony oxide             | 5.8     | 12   | -   | -                   |
| Zinc oxide                 | 5.6     | 13 – 25                                    | 20  | 210                 |
| 35% Leaded zinc<br>oxide   | 5.8     | 12   | 20  | 175                 |

ขนาดอนุภาคของผงสี (particle size) ขนาดอนุภาคผงสีส่วนใหญ่เป็นค่าเฉลี่ย โดยขนาดอนุภาคผงสีจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวหน้า (surface area) และการดูดกลืนน้ำมัน (oil absorption) การดูดกลืนน้ำมันหมายถึงน้ำหนักเป็นกรัมที่น้อยที่สุดของน้ำมันในการทำให้ผงสี 100 กรัมเปลี่ยนสภาพเป็นสารชั้น (paste) นิยมใช้น้ำมันลินสีดในการทดสอบ ดังนั้นผงสีชนิดต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักเท่ากัน ผงสีที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าผงสีที่มีการค่าดูดกลืนน้ำมันสูงจะส่งผลต่อความเสถียรต่อการเก็บสี โดยอาจทำให้ความชื้นของสีเพิ่มมากขึ้นจนไม่สามารถใช้งานได้

พื้นผิวของผงสี (surface) ที่พื้นผิวของผงสีมีหมู่ฟังก์ชันซึ่งจะสัมผัสกับหมู่ฟังก์ชันของสารยึด (binder) ในสูตร หมู่ฟังก์ชันของผงสีเป็นตัวชี้วัดว่าผงสีจะเกิดการเปียก (wetting) ได้ง่ายหรือไม่ ถ้าหมู่ฟังก์ชันของผงสีรวมตัวกันเองจะทำให้อนุภาคของผงสีจับตัวเป็นก้อน ด้านทานการเปียกและการ

กระจายของผงสี (flocculation) ส่งผลต่อความเสถียรต่อการเก็บสีเช่นเดียวกัน รวมทั้งให้การปิดบังพื้นผิวลดลง

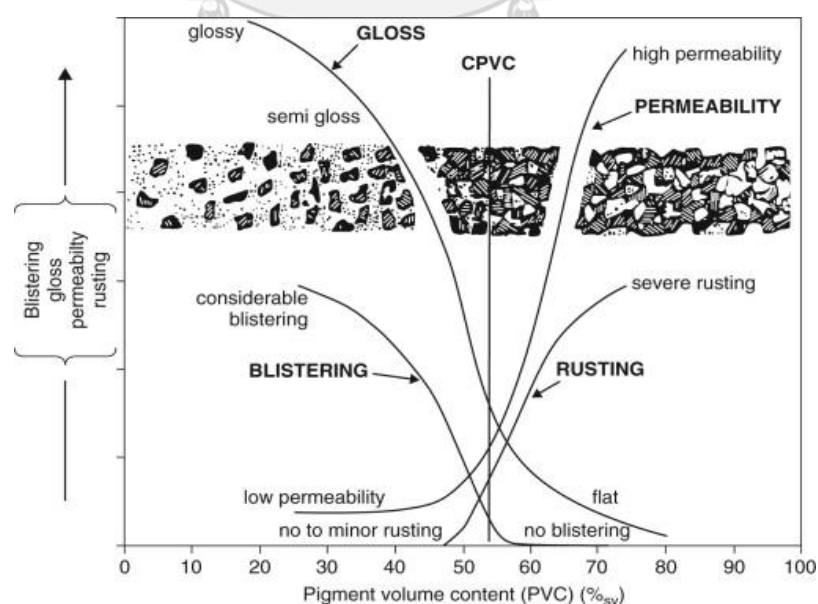
รูปร่างอนุภาคของสี (particle shape) อนุภาคของผงสีมีลักษณะต่างกัน เช่น กลม (spherical) หรือเป็นแผ่นบาง (lamellar) และส่งผลต่อการจัดเรียงตัว (pack) ของผงสี ดังนั้นจึงมีผลต่อความสามารถในการกลบพื้นผิวของผงสีด้วย

ความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี (chemical reactivity) อาจเป็นข้อจำกัดของผงสีต่อการใช้งานบางประเภท เช่น ซิงก์ออกไซด์ซึ่งเป็นทั้งกรดและเบส (amphoteric) ไม่ควรใช้กับสารยึดที่มีหมู่กรดสูงเพราะอาจทำให้สีมีความชื้นเพิ่มขึ้นและจับตัวเป็นก้อน ไม่สามารถใช้งานได้

ปริมาณผงสีเป็นร้อยละโดยปริมาตรในส่วนที่ไม่ระเหยของสี (Pigment Volume Concentration, PVC) โดยร้อยละโดยปริมาตรของผงสีต่อส่วนที่ไม่ระเหยของสี หมายถึงปริมาณผงสีเป็นร้อยละโดยปริมาตรในส่วนที่ไม่ระเหยของสี มีสูตรคำนวณดังนี้

$$PVC (\%) = \frac{\text{ปริมาตรของผงสี}}{\text{ปริมาตรของผงสี} + \text{ปริมาตรของสารยึดส่วนที่ไม่ระเหย}} \times 100$$

โดย PVC เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณผงสีต่อปริมาณสารยึด ถ้าค่า PVC สูงจะหมายความว่าปริมาณสารยึดน้อยเมื่อเทียบกับผงสี หรือกล่าวได้อีกอย่างว่าถ้าเพิ่มปริมาณผงสีและลดปริมาณสารยึด ค่า PVC จะมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.3 แสดงค่าสัดส่วน PVC ที่ส่งผลต่อสมบัติของสี [8]



รูปที่ 2.3 ค่าสัดส่วน PVC ที่ส่งผลต่อสมบัติของสี [10]

PVC ส่งผลต่อสมบัติของสี เช่น ความเงา ความทนทาน และความทึบแสง เมื่อค่า PVC สูงขึ้น ความเงาของสีจะลดลง ส่วนค่า PVC ต่ำความคงทนของสีจะดี หรือกล่าวได้ว่าถ้าค่า PVC สูงสมบัติของสีจะต่ำลง

### 2.1.2.2 ผงสีแบบให้กำลังซ่อนแสงต่ำ (Filler or Extender pigment)

เป็นผงสีอนินทรีย์ที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า 1.65 ไม่มีความสามารถในการปิดบังพื้นผิว นิยมใส่ผงสีแบบให้กำลังซ่อนแสงต่ำในสูตรเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น สมบัติเชิงกลของฟิล์ม ความคงทนต่อน้ำ เป็นต้น [8] โดยรูปที่ 2.4 แสดงการปิดบังพื้นผิวของสีน้ำทาอาคารที่ใช้ผงสีแบบให้กำลังซ่อนแสงสูงและกำลังซ่อนแสงต่ำชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 การปิดบังพื้นผิวของสีน้ำทาอาคารที่ใช้ผงสีแบบให้กำลังซ่อนแสงสูงและกำลังซ่อนแสงต่ำชนิดต่าง ๆ

ผงสีแบบกำลังซ่อนแสงต่ำชนิดต่าง ๆ ได้แก่

แบไรต์ (Barytes,  $\text{BaSO}_4$ ) มี  $\text{BaSO}_4$  เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ อนุภาคเป็นผลึกและมีรูปร่างกลมไม่สม่ำเสมอ ทนกรดและด่างได้ดี มีการดูดกลืนน้ำมันต่ำจึงมีผลต่อความชื้นของสีค่อนข้างน้อย ไม่ทำให้ความหนืดของสีเพิ่มขึ้น

แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) มีทั้งแบบได้จากกระบวนการทางธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผงสีแบบกำลังซ่อนแสงต่ำที่นิยมใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมสี เนื่องจากมีราคาถูกและมีหลายเกรด นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตยังมีสมบัติเป็นด่างเมื่อเทียบกับผงสีแบบกำลังซ่อนแสงต่ำชนิดอื่น ๆ โดยมีค่า pH จะอยู่ประมาณ 9 – 10

ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ได้จากธรรมชาติในรูปแบบต่าง ๆ กัน แต่ที่นิยมใช้เป็นผงสีมากที่สุดคือซิลิกาในรูปของควอร์ตซ์ (quartz) และซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐานเรียกกันว่า ไดอะตอมเมเชียสเอิร์ธ (diatomaceous earth) ซึ่งมีการนำไดอะตอมเมเชียสเอิร์ธมาใช้งานสี ไดอะตอมเมเชียสเอิร์ธมีการ

ดูดกลืนน้ำมันสูง มีอนุภาคเป็นรูปเข็มจึงช่วยลดการสะท้อนแสงของฟิล์มสี ทำให้ฟิล์มสีมีความเงาลดลงและช่วยเสริมแรงให้ฟิล์มสี

ไชนาเคลย์ (China Clay,  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) ไชนาเคลย์เป็นดินเหนียวที่มีความบริสุทธิ์สูง เมื่อนำมาใช้เป็นผงสีแบบกำลังอ่อนแสงต่ำ มักเรียกว่าเคอลิน (kaolin) อนุภาคของไชนาเคลย์จะอ่อนและละเอียดมาก รูปร่างเป็นแผ่นบางแต่สามารถจับกลุ่มกันเป็นรูปแบบ 3 มิติได้ (three-dimension flocculates) โดยตารางที่ 2.4 แสดงดัชนีหักเหของผงสีแบบกำลังอ่อนแสงต่ำชนิดต่าง ๆ [8]

ตารางที่ 2.4 ดัชนีหักเหของผงสีแบบกำลังอ่อนแสงต่ำ

| ผงสี                        | ดัชนีหักเหแสง |
|-----------------------------|---------------|
| Barytes (barium sulfate)    | 1.64          |
| Calcium sulfate (gypsum)    | 1.59          |
| Magnesium silicate (talc)   | 1.59          |
| Calcium carbonate (whiting) | 1.56          |
| China clay                  | 1.55          |
| Silica                      | 1.55          |

### 2.1.2.3 สารยึดหรือกาว

สารยึด คือ สารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มของสีติดแน่นกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดที่ใช้ในสีน้ำทาอาคารได้แก่ อะคริลิกอิมัลชัน (acrylic emulsion) ซึ่งมีความคงทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต มีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ที่กัดกร่อน ทนต่อการกระทบกระเทือนจากแรงภายนอก และมีความเงา จึงใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมเคลือบผิว นอกจากนี้ยังมีสไตรีน-บิวตะไดอินโคพอลิเมอร์อิมัลชัน เป็นสารยึดที่นิยมใช้ในสีน้ำทาอาคารเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากมีความไม่อึดตัวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีที่ใช้สารยึดจากสไตรีน-บิวตะไดอินโคพอลิเมอร์อิมัลชันจึงมีจุดอ่อนอยู่หลายประการ เช่น ไม่ทนต่อออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นสีที่ทำจากโคพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ทาภายนอกเพราะอาจเกิดการร่วนและเหลือง เป็นต้น [8]

### 2.1.2.4 ตัวทำละลายหรือตัวเจือจางในระบบ

ตัวทำละลายหรือตัวเจือจางมีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสีเพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้งาน โดยในสีน้ำทาอาคารซึ่งเป็นระบบอิมัลชันจะใช้น้ำสะอาดเป็นตัวเจือจางในระบบ



### 2.1.2.5 สารเติมแต่ง

เป็นสารที่เติมลงไปในสีเพียงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้สีมีสมบัติพิเศษต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่มีการใช้งานในสีน้ำทาอาคาร [11]

| สารเติมแต่ง (Additives)                                       | หน้าที่ของสารเติมแต่ง  |
|---|--|
| สารช่วยให้เปียก<br>(wetting additives)                        | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงตึงผิวของผิวของเหลวและช่วยเพิ่มการแทรกซึมของของเหลวเข้าสู่เนื้อสีในระบบ จึงช่วยให้การเปียกของผนังดีขึ้น   |
| สารช่วยกระจายตัว<br>(dispersing additives)                    | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยให้ผงสีในระบบกระจายตัวอย่างเหมาะสม เพื่อลดการเกาะกลุ่มและตกตะกอนของผงสีในระบบ  |
| สารช่วยปรับสมบัติของพื้นผิว<br>(surface additives)            | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดการเกิดข้อบกพร่องของพื้นผิวฟิล์มสี เช่น การเปียกอย่างไม่สมบูรณ์ของฟิล์มสี (poor substrate wetting) การเกิดฟิล์มสีเป็นผิวส้ม การไหลและการแผ่ของสีขณะกลิ้งและหลังกลิ้งอย่างไม่เหมาะสม      |
| สารทำลายฟอง<br>(defoamer additives)                           | สารเติมแต่งที่เป็นของเหลวและมีแรงตึงผิวต่ำ ใช้สำหรับทำลายฟองที่เกิดขึ้นในระบบ  |
| สารป้องกันการเกิดฟอง<br>(antifoam additives)                  | สารเติมแต่งที่เป็นของเหลวและมีแรงตึงผิวต่ำ ใช้สำหรับป้องกันการเกิดฟองในระบบ  |
| สารปรับสมบัติการไหล<br>(rheological additives)                | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยควบคุมการไหลของสีให้เป็นไปอย่างเหมาะสม และช่วยปรับสมบัติการไหลของสี ควบคุมความหนืดของสีระหว่างจัดเก็บไม่ให้ตกตะกอน นอนกัน หรือแยกชั้น  |
| สารช่วยเพิ่มความเสถียรต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต<br>(UV stabilizer) | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันฟิล์มสีจากสภาวะอากาศและสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ (chalk) ของฟิล์มสี ป้องกันความเงาของฟิล์มสีลดลง และป้องกันการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มสี |
| สารกันบูด<br>(preservatives additives)                        | เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันสีน้ำทาอาคารไม่ให้ถูกทำลายด้วยจุลินทรีย์ขนาดเล็ก (แบคทีเรีย เชื้อรา ตะไคร่) ซึ่งจะทำให้ฟิล์มสีมีกลิ่นบูดเน่าและเปลี่ยนสภาพไปในทางที่ด้อยลง  |

### 2.1.3 กระบวนการผลิตสีน้ำทาอาคาร

กระบวนการผลิตสีน้ำทาอาคารจะมีแบ่งขั้นตอนหลัก ๆ ออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเริ่มผสม การบด และการเติมส่วนประกอบช่วงท้าย โดยใช้เครื่องปั่นความเร็วรอบสูง (high speed disperser) และใบพัดฟันเลื่อย (saw disc impeller) เพื่อให้ส่วนประกอบที่เป็นผงของแข็งกระจายตัวในส่วนของเหลวในระบบอิมัลชันที่มีความละเอียด

#### 2.1.3.1 การเริ่มผสม (premixing หรือ pre-disperse)

นำส่วนประกอบที่เป็นของเหลวบางส่วนผสมเข้าด้วยกันในเครื่องปั่นความเร็วรอบสูง เช่น สารช่วยทำให้เปียก และสารช่วยกระจายตัว เพื่อเป็นการเตรียมสถานะของเหลวในระบบให้เหมาะสมสำหรับการใส่ผงสี และแบบตัวเติม ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้ความเร็วรอบของใบพัดในการปั่นความเร็วปานกลาง

#### 2.1.3.2 การบด (grinding)

ขั้นตอนนี้เป็นการเติมผงสี และใช้ความเร็วรอบสูงในการปั่นความเร็วรอบสูงเพื่อให้อนุภาคของผงสีมีขนาดเล็ก และกระจายตัวในระบบได้ดี ซึ่งขั้นตอนนี้จะมีอุณหภูมิของระบบสูงเนื่องจากการใช้ความเร็วรอบของใบพัดในการปั่นความเร็วสูง และระยะเวลาที่นานกว่าขั้นตอนอื่นเนื่องจากต้องทำให้ค่าความละเอียด (fineness) ของเนื้อสีเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด และอาจมีการเติมส่วนประกอบที่เป็นของเหลวที่เหลือนไปหรือไม่ก็ได้

#### 2.1.3.3 การเติมส่วนประกอบช่วงท้าย (let down)

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนที่มีการเติมสารยึด สารเติมแต่ง และน้ำที่เหลือนไป รวมถึงสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ไม่สามารถเติมในขั้นการบดได้เพราะจะทำให้เสียสมบัติไปจากการปั่นความเร็วสูง จากนั้นปั่นความเร็วรอบของใบพัดปานกลาง เนื่องจากเนื้อสีมีค่าความละเอียดผ่านเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว เมื่อปั่นความเร็วรอบได้ประมาณ 15 – 20 นาทีจึงนำสีไปทดสอบคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนดและผสมด้วยแม่สีที่ต้องการต่อไป

## 2.2 นาโนเซลลูโลส (Nanocellulose)

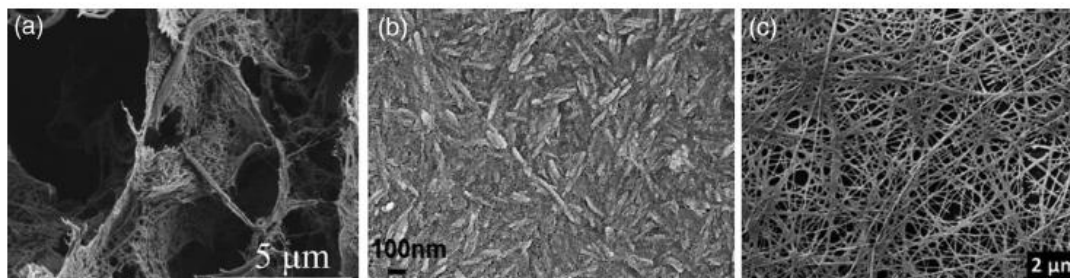
เซลลูโลสเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากมีปริมาณเพียงพอต่ออุปสงค์ของผู้ใช้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืชชั้นสูง สำหรับ สีเขียว ราและแบคทีเรียบางชนิด (*Acetobacter xylinum*) สัตว์ทะเลในกลุ่ม Urochordata เช่น เพรียงลอย เพรียงสายซึ่งเป็นสัตว์เพียงกลุ่มเดียวที่สร้างเซลลูโลสได้ [12] พบว่ากำลังการผลิตของ

ลิกโนเซลลูโลสสูงถึง  $1.3 \times 10^3$  เมตริกตันต่อปี สมบัติเด่นของเซลลูโลสคือสามารถนำไปใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากเซลลูโลสมีค่า high strength-to-weight ratio สูง มีค่าความหนาแน่นต่ำ จึงนิยมนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของเซลลูโลสคือการดูดซับความชื้นและความเข้ากันยากกับพอลิเมอร์ชนิดไม่ชอบน้ำที่เป็นเนื้อเมทริกซ์ในวัสดุคอมโพสิต ส่งผลให้สมบัติการเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตบางชนิดไม่ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับไมโครสเกล ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซลลูโลสที่มีอนุภาคเล็กขึ้นซึ่งเรียกว่านาโนเซลลูโลส เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดและความเข้ากันยากกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดไม่ชอบน้ำของเซลลูโลส อนุภาคนาโนเซลลูโลสนี้มีพื้นที่ผิวสูงทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเส้นใย และเส้นใยกับเมทริกซ์ยึดเกาะได้ดี ช่วยลดการบวมตัวของน้ำของชิ้นงานได้

### 2.2.1 ชนิดของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลสสามารถเตรียมได้จากพืชและการสังเคราะห์ด้วยแบคทีเรีย [7] ซึ่งนาโนเซลลูโลสจากพืชสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ นาโนเซลลูโลสแบบเส้นใย (microfibrillated cellulose หรือ nanofibrillated cellulose) และเซลลูโลสนาโนคริสตัลหรือผลิกนาโนเซลลูโลส (nanocrystalline cellulose หรือ nanowhiskers) ส่วนนาโนเซลลูโลสที่เตรียมจากแอโรบิกแบคทีเรียและไฮโดรไลซ์ด้วยกระบวนการปรับสภาพทางเคมี เรียกว่า นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย จากรูปที่ 2.5 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนาโนเซลลูโลสทั้ง 3 แบบ ซึ่งนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใยมีความยาวในระดับไมโครเมตรที่เกี่ยวข้องกัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ประกอบไปด้วยบริเวณที่เป็นผลึกและบริเวณที่เป็นอสัณฐาน ส่วนเซลลูโลสนาโนคริสตัลหรือผลิกนาโนเซลลูโลสจะมีบริเวณที่เป็นผลึกสูงกว่าและนิยมเตรียมผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดโดยการกำจัดบริเวณที่เป็นอสัณฐานออกจากเซลลูโลสก่อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนคริสตัลหรือผลิกนาโนเซลลูโลสนี้จะอยู่ที่ช่วง 5 – 40 นาโนเมตร และนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียมักเตรียมผ่านวิธีแบบล่างขึ้นบน (Bottom-up method) ซึ่งเป็นการผลิตเซลลูโลสจากกลูโคส โดยแบคทีเรียจากพวก *Acetobacter*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* และ *Alcaligenes* [12] ซึ่งนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียจะมีความบริสุทธิ์สูง และมีความเป็นผลึกมากกว่านาโนเซลลูโลสที่ได้จาก

พืช นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียผ่านวิธี SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนาโนเซลลูโลสทั้ง 3 แบบ  
(a) nanofibrillated cellulose (b) nanocrystalline cellulose และ (c)  
bacterialnanocellulose

### 2.2.2 การผลิตและการเตรียมนาโนเซลลูโลส [7]

การเตรียมนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใย (microfibrillated cellulose หรือ nanofibrillated cellulose) เตรียมได้จากไม้โดยใช้วิธีการทำให้เข้ากันด้วยแรงดันสูง (high-pressure homogenization) และไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ ทำให้วิธีนี้ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตสูงมาก ดังนั้นจึงพัฒนากระบวนการผลิตโดยใช้ปฏิกิริยา TEMPO-oxidized (2,2,6,6-tetramethylpiperidine-1-oxyl radical) cellulose nanofibers ร่วมกับแรงเชิงกลและการปรับสภาพทางเคมีเพื่อลดพลังงานในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ปฏิกิริยา TEMPO-oxidized cellulose nanofibers แล้ว ยังพัฒนาวิธีการเตรียมนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใยผ่านการย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis of cellulose) ร่วมกับใช้แรงเชิงกลและทำให้เข้ากันด้วยแรงดันสูง ซึ่งวิธีนี้ได้ประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในระยะหลังวิธีการเตรียมนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใยจึงนิยมใช้การย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์มากขึ้น

การเตรียมนาโนเซลลูโลสนาโนคริสตัลหรือผลึกนาโนเซลลูโลสนิยมเตรียมผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรดซัลฟิวริกหรือกรดไฮโดรคลอริก การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonication) เป็นต้น กระบวนการเตรียมนาโนเซลลูโลสนาโนคริสตัลจะสกัดบริเวณที่เป็นผลึกของเส้นใยเซลลูโลสออกมาและกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐานออก ซึ่งการแยกผลึกของเซลลูโลสออกมาเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากได้สมบัติเชิงกลที่ดี (มีค่าความแข็งแรงของเส้นใยและค่ามอดุลัสสูง) มีพื้นที่ผิวสูง และค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (aspect ratio) ที่สูงเช่นเดียวกัน

การเตรียมนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย เติบโตได้จากการนำสารที่อยู่ภายนอกเซลล์ของ เซลลูโลส (extracellular cellulose) ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ขนาดเล็กหลายชนิด โดยเฉพาะ *Acetobacter xylinus* (*A. xylinus*) ที่มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับเซลลูโลสจากพืช นอกจากนี้ นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียยังมีโครงสร้าง 3 มิติที่ประกอบไปด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาดเล็ก เกี่ยวพันกันอย่างแข็งแรง วิธีการเตรียมนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียไม่ต้องมีการกำจัดบริเวณที่เป็น อสัณฐานออกจากเซลลูโลส เนื่องจากเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียมีความบริสุทธิ์และเป็นผลึกสูง เพราะเป็นวิธีการสังเคราะห์ซึ่งต่างจากเซลลูโลสที่ได้จากพืชธรรมชาติ นอกจากนี้นาโนเซลลูโลสจาก แบคทีเรียยังมีสมบัติการทนน้ำที่ดี มีความแข็งแรง และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี ถึงแม้ว่า นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียจะประกอบด้วยข้อดีหลายประการ อย่างไรก็ตามนาโนเซลลูโลส จากแบคทีเรียมีข้อด้อยคือค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตที่สูงและได้ปริมาณ (yield) นาโนเซลลูโลส จากแบคทีเรียที่ต่ำมาก

นอกจากนี้ยังมีวิธีในการเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสผ่านกระบวนการหมักชาคอมบูฉะ (kombucha) ด้วยวิธี SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) คอมบูฉะเป็นชื่อของ เครื่องดื่มที่เชื่อว่ามีต้นกำเนิดจากประเทศจีนตอนเหนือ ได้จากการหมักใบชาดำหรือใบชาเขียวด้วย การใช้แอลกอฮอล์เพียงเล็กน้อย บางครั้งอาจเรียกว่าชาคอมบูฉะ ปัจจุบันเครื่องดื่มชนิดนี้ได้รับความนิยม เนื่องจากเชื่อว่าดีต่อสุขภาพและเหมาะกับการควบคุมน้ำหนัก ส่วนผสมของชาคอมบูฉะ ประกอบด้วยใบชาเขียวหรือใบชาดำผสมกับน้ำตาล ยีสต์ที่เจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำตาลสูง (osmophilic yeast) โดยระหว่างการหมักจะเกิดแผ่นวุ้นที่มีลักษณะคล้ายเจลลาติน รูปร่างคล้าย เห็ด ลอยอยู่บนผิวน้ำระหว่างอากาศและของเหลวในภาชนะ ซึ่งแผ่นวุ้นมีส่วนประกอบหลักเป็น นาโนเซลลูโลส และมีชื่อเรียกว่า SCOBY หรือรู้จักกันในชื่อชาเห็ด ประชากรสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กใน SCOBY มีหลากหลาย ซึ่งรวมถึงแบคทีเรียสายพันธุ์ *Acetobacter* และยีสต์ *Saccharomyces* เป็นต้น จากการศึกษาส่วนประกอบหลักที่พบในกระบวนการหมักชาพบว่าส่วนประกอบของตัวกลาง ที่ใช้ในระบบเป็นกรดกลูโคนิก กรดอะซีติก กรดแลคติก และเอทานอล นอกจากนี้ยังพบโปรตีน สารพอลิฟีนอล วิตามิน เกลือแร่อีกด้วย ส่วนแผ่นฟิล์มที่ลอยอยู่บนผิวน้ำระหว่างอากาศและ ของเหลวในภาชนะมีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียและจากพืชพบว่านาโนเซลลูโลส จากแบคทีเรียมีโครงสร้างเล็กกว่านาโนเซลลูโลสจากพืช 100 เท่า และยังมีโครงสร้างร่างแห 3 มิติที่มี ความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามการผลิตนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียทำได้น้อยและมีค่าใช้จ่ายใน

กระบวนการสูง การนำนาโนเซลลูโลสมาใช้งานส่วนใหญ่จึงเป็นนาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากพืช โดยนิยมนำนาโนเซลลูโลสมาใช้ในวัสดุคอมโพสิต ส่วนประกอบของวัสดุฉนวน ซึ่งนาโนเซลลูโลสที่ได้จากพืชและแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน กระบวนการเตรียม กระบวนการปรับสภาพทางเคมีแตกต่างกัน ระยะเวลา และความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้แตกต่างกันส่งผลให้ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนเซลลูโลสแตกต่างกันด้วย ดังตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 2.6 แหล่งที่มาของนาโนเซลลูโลส [7]

| โครงสร้างเซลลูโลส         | แหล่งของเซลลูโลส                              | การเตรียม   | สมบัติเด่นของเซลลูโลสที่ได้                                      |
|---------------------------|---|---|--|
| Nanofibrillated cellulose | เมล็ดซีกาเทศ ( <i>Citrullus colocynthis</i> ) | กรดซัลฟิวริก 40% (4 ชม. อุณหภูมิห้อง)   | เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm                                 |
|                           | เนื้อไม้เบิร์ช (Birch)                        | Deep eutectic solvent (aminoguanidine HCl and glycerol) (5 - 60 นาที 70 - 100°C) และการสลายเชิงกล (mechanical disintegration) | เส้นผ่านศูนย์กลาง $4.6 \pm 1.1$ nm                               |
|                           | กากของพืชตระกูลส้ม (citrus)                   | ไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (48 ชม. 45°C 90 rpm)  | ความยาว $458 \pm 115$ nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง $10 \pm 3$ nm      |
|                           | เปลือก เมล็ด และเส้นใยส้ม                     | กรดซัลฟิวริก 5 - 10 %v (30 นาที)  | เส้นผ่านศูนย์กลาง 18.4 - 20.5 nm                                 |
|                           | Microcrystalline cellulose                    | กรดซัลฟิวริก 64 wt% (60 นาที 45°C)  | ความยาว 200 - 300 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 - 50 nm             |
|                           | เปลือกกล้วย                                   | ไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์และการทำเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenization) (24 ชม. 35°C 150 rpm)   | เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 - 3.5 nm                                   |
|                           | ก้านใบบัว                                     | บำบัดด้วยเคมีร่วมกับ high-intensity ultrasonication   | ความยาวมีขนาดหลากหลาย $\mu$ m<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง $20 \pm 5$ nm |
|                           | เยื่อชานอ้อยฟอกสี                             | TEMPO oxidation ด้วยการทำเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแรงเฉือนสูง (high-shear homogenization)   | เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 - 5 nm                                       |
|                           | เนื้อไม้ยูคาลิปตัสฟอกสี                       | การทำเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแรงดันสูง (high-pressure homogenization)  | ความยาว 100 - 300 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 - 10 nm              |

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) แหล่งที่มาของนาโนเซลลูโลส

| โครงสร้างเซลลูโลส         | แหล่งของเซลลูโลส                                     | การเตรียม                           | สมบัติเด่นของเซลลูโลสที่ได้                            |
|---------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Nanocrystalline cellulose | กากมันเทศ  | กรดซัลฟิวริก 65 wt% (120 นาที 55°C) | เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 - 40 nm                           |
|                           | เส้นใยจากกล้วยพอกสี                                  | กรดซัลฟิวริก 62 wt% (70 นาที 45°C)  | ความยาว 135 ± 12 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.2 ± 1.9 nm  |
|                           | ก้นกรองบุหรี่ที่ถูกทิ้ง (discarded cigarette filter) | กรดซัลฟิวริก 55 wt% (45 นาที 45°C)  | ความยาว 143 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 nm               |
|                           | ทะเลาะปาล์มน้ำมันเปล้า                               | กรดไฮโดรคลอริก 3 M (2 ชม. 80°C)     | ความยาว 190 - 301 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 - 13 nm   |
|                           | ทะเลาะเปล้า (empty fruit bunch)                      | กรดซัลฟิวริก 62 wt% (60 นาที 45°C)  | เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 nm                        |
|                           | ไม้สับ   | AVAP® biorefinery                   | ความยาว 222 ± 139 nm<br>เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 ± 1.5 nm |
|                           | เปลือกข้าวโพด  | กรดซัลฟิวริก 55 wt% (1.5 ชม. 45°C)  | เส้นผ่านศูนย์กลาง 26.9 ± 3.35 nm                       |
|                           | Alpha cellulose                                      | กรดซัลฟิวริก 0.8 M (1 ชม. 82.2°C)   | เส้นผ่านศูนย์กลาง 18.36 ± 7.34 nm                      |
|                           | ชานอ้อย  | กรดซัลฟิวริก 50 wt% (10 นาที 40°C)  | เส้นผ่านศูนย์กลาง 95.9 nm                              |

### 2.2.3 การประยุกต์ใช้งาน (application)

ปัจจุบันพบว่านาโนเซลลูโลสเกี่ยวข้องกับงานวิจัยจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่มีการนำนาโนเซลลูโลสมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิเมอร์เมทริกซ์เนื่องจากอนุภาคนาโนที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพของวัสดุคอมโพสิต มีน้ำหนักเบา มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความเหนียวของเส้นใย และมีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้สมบัติอีกประการของนาโนเซลลูโลสคือเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ (low thermal conductivity) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.04 – 0.05 W/(m.K.) [6] และค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ (low thermal expansion coefficient) โดยมีค่าอยู่ที่ 0.01 ppm/K จึงมีการนำนาโนเซลลูโลสไปใช้งานด้านการป้องกันความร้อน เช่น การเป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารที่อยู่อาศัย หรือการนำนาโนเซลลูโลสไปเป็นส่วนประกอบในวัสดุอื่นเพื่อการใช้งานด้านการป้องกันความร้อนจากแสงแดด เป็นต้น

### 2.2.4 สมบัติในการเป็นฉนวน

Jian Zhou และ You-Lo Hsieh [13] ได้เตรียมเส้นใยจากนาโนเซลลูโลสและแอโรเจลที่มีความพรุนสูงสำหรับเป็นฉนวนอุณหภูมิ ซึ่งเตรียมเส้นใยกลวง (hollow fiber) ผ่านวิธี wet spinning จากนั้น infusing ด้วย aerogel precursor เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นฉนวนให้ดียิ่งขึ้น โดยเส้นใยที่เตรียมได้จะมีความพรุนสูงประมาณร้อยละ 85 เนื่องจากบริเวณเปลือกห่อหุ้มที่เป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลสประกอบด้วยรูพรุนหลายขนาดทั้ง microvoids (14.5  $\mu\text{m}$ ), sub-micropore (133 nm) และมีแกนกลางที่เป็นแอโรเจล ช่วยให้ค่าการนำความร้อนต่ำลงได้ 3 ประการคือ ช่วยยับยั้งและชะลอการไหลเวียนของอากาศเพื่อจำกัดการพาความร้อน ช่วยให้การนำความร้อนด้อยลงเนื่องจากพื้นผิวที่เป็นนาโนเซลลูโลสมีรูพรุน และบริเวณที่เป็นผลึกของ aerogel nanocellulose จะช่วยยับยั้งการแผ่รังสีอินฟราเรด สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและสามารถผลิตในระดับสเกลใหญ่ได้ ผลทดลองความเป็นฉนวนภายใต้สภาวะอากาศร้อนเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยกลวงและเส้นใยร่วมแกน (coaxial fibre) จากนาโนเซลลูโลสและแอโรเจล โดยนำเส้นใยทั้ง 2 แบบวางบนแท่นให้ความร้อนและบันทึกอุณหภูมิ พบว่า  $\Delta T_L$  ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งชี้วัดสมบัติการเป็นฉนวนของเส้นใยร่วมแกนมีค่าสูงกว่าเส้นใยกลวงโดยทดสอบทั้งแบบ single layer และ double layer เป็นผลมาจากสมบัติการพาความร้อนที่ต่ำกว่าเนื่องจากแกนกลางของเส้นใยร่วมแกนมี cellulose nanofiber-aerogel บรรจุอยู่ ส่วนการพาความร้อนภายในแกนกลางของเส้นใยกลวงจะเกิดได้มากกว่าเพราะมีพื้นที่ที่กว้างกว่า ส่วนผลทดลองความเป็นฉนวนอุณหภูมิภายใต้สภาวะอากาศเย็น พบว่าเมื่อนำเส้นใยทั้ง 2 แบบมาวางบนพื้นผิวพอลิस्टาไดรีนที่มีน้ำแข็งแห้งวางอยู่ด้านล่างหนา 3 เซนติเมตร ค่า  $\Delta T_L$  ของ เส้นใยร่วมแกนยังคงมากกว่าเส้นใยกลวงเป็นการยืนยันว่าเส้นใยร่วมแกนมีสมบัติการเป็นฉนวนทั้งสภาวะอากาศร้อนและอากาศเย็น และดีกว่าเส้นใยกลวงปกติ [3]

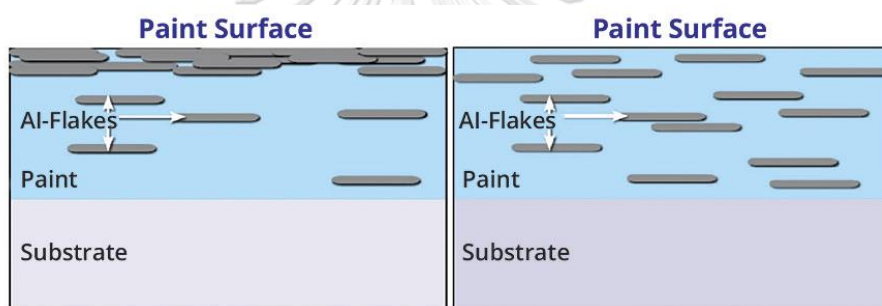
### 2.3 อะลูมิเนียม

ผงโลหะมีการใช้งานมานานในหลายอุตสาหกรรม เช่น ผงเงินนิยมนำมาใช้ในการเคลือบเพื่อเป็นตัวนำในแผ่นวงจรพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ ผงนิกเกิลและผงสแตนเลสนิยมใช้ในงานที่ต้องการสมบัติการทนต่อต่าง ส่วนผงอะลูมิเนียมก็ได้รับความนิยมใช้งานในหลายอุตสาหกรรม เช่น งานตกแต่งผิวเป็นวัสดุประสงค์หลัก นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังมีสมบัติสะท้อนความร้อน สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของความชื้นที่ดี และมีความทนทาน โดยผงอะลูมิเนียมมีทั้งแบบผง (powder) และแบบเปียก (paste) ขึ้นอยู่กับความสะดวกในการนำไปใช้งานของแต่ละอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่



อะลูมิเนียมแบบเปียกจะช่วยลดปัญหาการกระจายตัวที่ไม่ดีและความไม่สม่ำเสมอของแบบผง รวมทั้งช่วยลดระยะเวลาในการทำงานได้ โดยผงอะลูมิเนียมแบบเปียกยังแบ่งได้ทั้งแบบ leafing และ non-leafing ตามประเภทของสารหล่อลื่นที่ใช้ในกระบวนการบด (ball mill) ซึ่งสารหล่อลื่นที่ต่างกันส่งผลให้แรงดึงผิวของผงอะลูมิเนียมทั้ง 2 ประเภทนี้ต่างกัน

ผงสีประเภท leafing สารหล่อลื่นจะเป็นกรดสเตียริกซึ่งมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และสิ่งสกปรก (oleophobic) ทำให้ผงอะลูมิเนียมมีความดึงผิวสูงเข้ากับระบบที่มีน้ำได้ยาก และทำให้ผงอะลูมิเนียมลอยตัวขึ้นมาอยู่ด้านบนเมื่อตัวกลางที่เป็นของเหลวในระบบระเหยออกไป ส่วนผงอะลูมิเนียมแบบ non-leafing ใช้สารหล่อลื่นในระหว่างกระบวนการบดคือกรดโอเลอิก (oleic acid) ซึ่งแรงดึงผิวของผงอะลูมิเนียมชนิดนี้จะมีแรงดึงผิวต่ำกว่าแบบ leafing ทำให้ผงอะลูมิเนียมประเภทนี้กระจายในตัวกลางของระบบดีกว่าแบบแรก [14]



รูปที่ 2.6 ผงสีอะลูมิเนียมชนิด leafing (ซ้าย) และ non-leafing (ขวา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3.1 สมบัติในการสะท้อนความร้อน

หนึ่งในสมบัติที่สำคัญของผงอะลูมิเนียมคือการสะท้อนความร้อน สมบัติการสะท้อนต่อแสงใกล้อินฟราเรดและแสงอัลตราไวโอเล็ตนี้ส่งผลต่อความทนทานของชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวด้วย กรณีผงอะลูมิเนียมประเภท leafing อนุภาคของผงจะลอยตัวขึ้นมาอยู่ด้านบนของพื้นผิวที่เรานำไปใช้งาน ทำให้สะท้อนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ซึ่งช่วยปกป้องฟิล์มจากความร้อนได้ จึงนิยมนำไปใช้ในงานเคลือบผิวหลังคาอะลูมิเนียมสะท้อนความร้อนหรือถังขนาดใหญ่ (tank) อย่างไรก็ตามหากนำผงอะลูมิเนียมประเภท leafing ไปใช้งานในระบบที่สารละลายหรือสารยึดมีขี้สูง มีความเป็นกรดหรือมีความชื้นสูง อาจทำให้เกิดการ de-leafing ของผงอะลูมิเนียมได้ นอกจากนี้กรดสเตียริกซึ่งเป็นสารหล่อลื่นของผงอะลูมิเนียมอาจทำให้การยึดเกาะ (adhesion) ระหว่างชั้นของฟิล์มสีลดลง และทำให้สมบัติความ

ทนทานต่อการขีดเมื่อนำไปใช้เป็นสีทับหน้าลดลงเช่นเดียวกัน ส่วนผงอะลูมิเนียมแบบ non-leafing จะต่างออกไปเนื่องจากอนุภาคของผงอะลูมิเนียมจะกระจายตัวและจัดเรียงตัวอยู่ในเนื้อฟิล์มสี

ผงอะลูมิเนียมสามารถสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ถึง 90% ทำให้อุณหภูมิที่พื้นผิวลดต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในพื้นผิวของเหล็กที่มีขนาดใหญ่ และมีการขยายตัวทางความร้อนน้อย และจากความสามารถสะท้อนความร้อนของผงอะลูมิเนียม ทำให้ค่าการคายความร้อนมีค่าต่ำ [15]

### 2.3.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความร้อน

เนื่องจากพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์มีช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง แต่มีเพียงสัดส่วนเล็กน้อยเท่านั้นที่ตกกระทบผิวโลก โดยมีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 300 - 2,500 นาโนเมตร ประกอบไปด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร้อยละ 5 ซึ่งรังสีในช่วงนี้สามารถทำให้พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานเคลือบผิวเกิดการเสื่อมสภาพได้ นอกจากนี้ ยังมีช่วงแสงที่ตามองเห็นร้อยละ 42 และรังสีอินฟราเรดร้อยละ 52 ซึ่งความร้อนที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้มาจากทั้งช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงรังสีอินฟราเรด โดยช่วงที่ทำให้เกิดความร้อนมากที่สุดอยู่ที่ช่วง 700 - 1,100 นาโนเมตร หรือช่วงใกล้-อินฟราเรด [16]

ผงสีสะท้อนรังสีใกล้อินฟราเรดในสีน้ำทาอาคารเป็นส่วนประกอบที่ช่วยกระเจิงแสงที่มาจากกระทบ จึงป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งผงสีแต่ละแบบจะมีการกระเจิงแสงต่างกัน ผงสีที่นิยมใช้ในงานเคลือบผิวเป็นอนินทรีย์ของโลหะออกไซด์ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ซิงโครไทล์ เนื่องจากมีสมบัติในการกระเจิงแสงสูง ทนต่อสภาวะอากาศและสารเคมี [17] แต่ข้อจำกัดของการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์คือการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในตอนกลางวัน [18] ทำให้มีความร้อนบางส่วนตกค้างอยู่ที่ชั้นฟิล์มสี และเกิดการคายความร้อนผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคารตอนกลางคืน อุณหภูมิในอาคารตอนกลางคืนจึงสูงขึ้น นอกจากนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังสามารถทำลายพันธะของพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยึดของฟิล์มสีส่งผลให้เกิดการเสียหายของฟิล์มสีเร็วกว่ากำหนด นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำหน้าที่สะท้อนรังสีอินฟราเรดแล้วยังมีผงสีที่ทำจากโลหะบริสุทธิ์ เช่น ทองแดง บรอนซ์ และ อะลูมิเนียม ซึ่งมีสมบัติความเงาและพื้นผิวเรียบของโลหะ จึงช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดีและมีการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์

อีกทั้งยังมีการพัฒนาเติมธาตุ เช่น อะลูมิเนียม ลิเทียม และโพแทสเซียมในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงสมบัติการสะท้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการสร้างตำหนิให้เกิดในบริเวณที่เป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และเหนียวนาให้เกิดอิเล็กทรอนิกส์

และหลุมอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นเป็นการป้องกันไม่ให้อิเล็กทรอนิกส์และหลุมอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลจากการเติมอะลูมิเนียมเพื่อปรับปรุงสมบัติการสะท้อนของไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการโซลเจล (sol-gel Method) พบว่าเมื่อเติมอะลูมิเนียมทำให้เกิดการเปลี่ยนวัฏภาคอนุภาคจากอะนาเทสเป็นรูไทล์เพิ่มขึ้นแต่การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าความเสถียรต่ออุณหภูมิของผงสีเพิ่มขึ้นเมื่อเติมด้วยอะลูมิเนียมร้อยละ 0.1 แต่การสะท้อนความร้อนยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Robert Ianos และคณะ (2017) [19] ได้เตรียมผงสีสีชมพูจากโครเมียม และเพิ่มคุณสมบัติการสะท้อนรังสีอินฟราเรดโดยเติมอะลูมินาผ่านกระบวนการเผาไหม้ด้วยคลื่นไมโครเวฟ จากนั้นนำผงสีสีชมพูที่ได้ไปผสมในสีน้ำอะคริลิกปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และทาแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อทดสอบอุณหภูมิโดยวางใต้หลอดไฟที่มีรังสีอินฟราเรด เทียบกับแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำด้วยสีขาวที่มีองค์ประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์ และแผ่นสีดำที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนแบล็ค ที่อุณหภูมิสูงสุด 30 นาที หลังให้ความร้อนพบว่าแผ่นสีชมพูที่มีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบมีอุณหภูมิที่จุดสูงสุดสูงกว่าแผ่นสีขาวเพียง 2.1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำกว่าแผ่นสีดำถึง 23.3 องศาเซลเซียส และช่วงการลดลงของอุณหภูมิจากจุดสูงสุดกลับมาที่อุณหภูมิปกติ อัตราการลดลงของแผ่นสีชมพูเทียบเท่ากับแผ่นสีขาว

Merete Hallenstvet และคณะ (2006) [20] ได้พัฒนาผงสีที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมสำหรับสะท้อนรังสีอินฟราเรดและศึกษาสมบัติทางความร้อนเมื่อนำผงสีที่เตรียมได้ไปใช้งานเคลือบวัสดุ พบว่าค่าการคายความร้อนของวัสดุที่มีผงสีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบลดลง 0.5 หน่วย เมื่อเทียบกับผงสีปกติที่มีค่าการคายความร้อนอยู่ที่ 0.85 – 0.90 หน่วย

Richard Jenkins และคณะ (2019) [21] ได้เตรียมและศึกษาการเติมอะลูมิเนียมสำหรับเป็นสารเติมแต่งในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดโดยใช้เทคนิคการพ่นเคลือบด้วยก๊าซเย็นบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งพบว่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรด ความพรุน และความเรียบของพื้นผิวส่งผลต่อค่าการสะท้อนของพื้นผิวดังนี้ จึงต้องปรับสภาวะในการสเปรย์ให้เหมาะสม

Archana Nigrawal และคณะ (2012) [22] ได้เตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของนาโนเซลลูโลสที่ได้จากเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุประกอบ

ชีวภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสในชั้นฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยปริมาณที่ต่างกันและนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบ จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อน พบว่าสมบัติเชิงกลให้ผลดีขึ้น ค่าความแข็งของการดัดยัดเมื่อใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าร้อยละการดัดยัด ณ จุดขาดลดลงตามปริมาณของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น สมบัติทางความร้อนพบว่าช่วงแรกเมื่อใส่เส้นใยนาโนเซลลูโลสจากป่านศรนารายณ์เข้าไปค่า melting endotherm จะลดลงเมื่อเทียบกับที่ไม่ได้เติมนานาโนเซลลูโลส แต่ค่า melting endotherm จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมากขึ้น

Peipei Wang และคณะ (2019) [23] ได้เตรียมโฟมที่มีน้ำหนักเบาจากการใช้เซลลูโลสแบบนาโนคริสตัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นฉนวนกันความร้อน โดยพบว่าที่ขึ้นงานที่ประกอบไปด้วยนาโนเซลลูโลสร้อยละ 74 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 7.5 ส่วน 1,2,3,4-บิวเทน เตตระคาร์บอกซิลิกเอซิดและไดโพลไซมฟอสเฟตร้อยละ 18.5 มีค่าการนำความร้อนต่ำสุดอยู่ที่  $0.027 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  เมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของฉนวนจะอยู่ที่  $0.036 - 0.041 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

P.G. Gan และคณะ (2019) [7] ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนเซลลูโลสที่ใช้เป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ด้านเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนเซลลูโลสอยู่ที่ช่วง 200 – 300 องศาเซลเซียส ดังนั้นระหว่างกระบวนการผลิตต้องมีการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 200 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันไม่ให้นาโนเซลลูโลสสลายตัว นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มขึ้นของหมู่ซัลเฟตหลังการเตรียมนาโนเซลลูโลสผ่านปฏิกิริยาการย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกจะลดความเป็นผลึกของนาโนเซลลูโลสและทำให้การสลายตัวง่ายขึ้น เป็นต้น ด้านพฤติกรรมทางความร้อนของนาโนเซลลูโลสที่ศึกษาผ่านเครื่อง DSC พบว่านาโนเซลลูโลสที่มาจากแหล่งต่างกัน วิธีการเตรียมที่ต่างกัน จะให้สมบัติทางความร้อนที่แตกต่างกัน การเติมนานาโนเซลลูโลสช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตให้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในส่วนของการเป็นผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลว สมบัติพลวัตเชิงกลพบว่าการเติมนานาโนเซลลูโลสช่วยปรับปรุงสมบัติพลวัตเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตเพื่อรองรับการใช้งานในอุตสาหกรรม แต่ต้องใช้ในปริมาณที่มากพอจึงจะเห็นผลชัดเจน ส่วนสมบัติการนำความร้อนของวัสดุที่มีส่วนผสมของนาโนเซลลูโลส พบว่ามีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำความร้อน ตั้งแต่แหล่งที่มาของเซลลูโลสที่ต่างกัน ความเป็นผลึกตามแนวด้านกว้างและพื้นที่บริเวณภาคตัดขวางของแผ่นขึ้นงาน ทิศทางการจัดเรียงตัว และขนาดของรูพรุนของนาโนเซลลูโลสล้วนส่งผลต่อการนำความร้อนของวัสดุคอมโพสิต

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

| วัสดุและสารเคมีที่ใช้  | แหล่งที่มา   |
|--|--|
| สารช่วยกระจายตัว   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารที่ทำให้เปียก   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| ผงแคลเซียมคาร์บอเนต  | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| ผงดินขาว (kaolin)  | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| ผงไทเทเนียมไดออกไซด์   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| ผงอะลูมิเนียมแบบ paste ชนิด non-leafing (Al)                   | บริษัท กุลวงส์ จำกัด   |
| สารป้องกันการเกิดฟอง   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารยึดชนิดอะคริลิก   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารช่วยเพิ่มกำลังซ่อนแสงของฟิล์มสีชนิดเหลว                     | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารช่วยเพิ่มการอ่อนตัว   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารกันบูด  | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารลดฟอง   | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารเพิ่มความข้นหนืดชนิดเหลว                                    | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| สารเพิ่มความข้นหนืดชนิดผง                                      | บริษัท ทีโอเอ เพ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)   |
| นาโนเซลลูโลสจากฝ้าย (cotton nanocellulose, CO NCC)             | ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| นาโนเซลลูโลสจากยูคาลิปตัส (eucalyptus nanocellulose, EU NCC)   | บริษัท ภูิฑู จำกัด   |
| นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (SCOBY bacterial cellulose, SCOBY BC) | ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมสี

- ปีกเกอร์เหล็กสำหรับเตรียมสี
- เครื่องปั่นกวนแบบความเร็วรอบสูง (high speed mixer) สำหรับเตรียมสี
- ใบพัดสำหรับปั่นกวนสีชนิดฟันเลื่อย (saw disc impeller)
- เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง
- เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง
- กระจกพลาสติกสำหรับบรรจุสีหลังเตรียมเสร็จ
- ไม้พายกวนสี
- ข้อนตักสาร

#### 3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแผ่นทดสอบ

- แปรงชนอ่อนสำหรับทาสี
- แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน แบ่งตัดให้มีขนาด 15 × 30 ตร.ซม. ต่อสี 1 สูตร
- กระจกพลาสติกสำหรับแบ่งสีมาผสมน้ำสำหรับทา
- เครื่องวัดความหนาฟิล์มแบบไม่ทำลายพื้นผิวชนิดเหนือเสียง (ultrasonic thickness gauge)

#### 3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลคุณภาพของสี

- เครื่องวัดความละเอียดของสี (grind gauge)
- ถ้วยสำหรับหาความหนาแน่นของสี (pycnometer)
- เครื่องวัดความข้นของสี Stormer viscometer (Krebs Unit, KU)
- เครื่องวัดความเป็นกรดต่างของสี (pH meter)
- เครื่องวัดความชื้น (moisture analyzer) เพื่อหาร้อยละของของแข็งที่ไม่ระเหยในเนื้อสี
- แท่งเหล็กสำหรับเตรียมฟิล์มสี (wire bar coater) ขนาด 100  $\mu\text{m}$
- กระจกสำหรับวัดเฉดสี
- กระจกพื้นขาว – ดำสำหรับทดสอบกำลังซ่อนแสงของฟิล์มสี

- เครื่องวัดความเงา (gloss meter) ของฟิล์มสี
- เครื่อง spectrophotometer สำหรับวัดเฉดสีและวัดกำลังซ่อนแสงของฟิล์มสี
- แผ่นพลาสติกไวโนลสีสำหรับทดสอบความทนทานต่อการขีดถู
- ผงขัดสำหรับทดสอบความทนทานต่อการขีดถู
- แปรงสำหรับทดสอบความทนทานต่อการขีดถู
- เครื่องทดสอบความทนทานต่อการขีดถู
- เครื่องเร่งสภาวะอากาศภายใต้รังสียูวีเพื่อทดสอบความคงทนต่อสภาวะอากาศของสี (QUV)
- ชั้นวางแผ่นทดสอบสำหรับทดสอบฟิล์มสีกลางแจ้ง
- ตู้อบลมร้อนสำหรับทดสอบความเสถียรในการเก็บของสีแบบเร่งสภาวะ

### 3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านอุณหภูมิของสี

- ชุดทดสอบอุณหภูมิตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4803 ประกอบด้วยกล่องไม้ฝาเปิดด้านบนและตัวผนังทำจากฉนวนแคลเซียมซิลิเกตหนา 1 นิ้ว สำหรับเป็นฉนวนความร้อนในการทดสอบอุณหภูมิ หลอดไฟอินฟราเรด 250 วัตต์ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิด J หรือเทียบเท่า และเครื่องอ่านอุณหภูมิชนิด J หรือเทียบเท่า (ค่า Acceptable Error:  $\pm 2$  องศาเซลเซียส)
- กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermoscan)
- เครื่องวิเคราะห์ความร้อนเชิงกล (Thermomechanical Analyzer, TMA)
- เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

### 3.3 ขอบเขตการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

- 1) การเตรียมสีสำหรับทดสอบอุณหภูมิ
  - (1) การเตรียมสีชุดที่เดิม AI และ CO NCC แบบแยกกัน
  - (2) การเตรียมสีชุดที่เดิม AI และ CO NCC แบบผสมกัน
  - (3) การเตรียมสีชุดที่เดิม SCOPY BC และ EU NCC
- 2) การทาสีแผ่นสำหรับทดสอบอุณหภูมิและวัดความหนาฟิล์มสี

- 3) การทดสอบอุณหภูมิและสมบัติทางความร้อนของสี
  - (1) การทดสอบความร้อนสะสมบนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 และการคำนวณค่าความร้อนสะสม
  - (2) การทดสอบอุณหภูมิที่ผิวของฟิล์มสีทั้งด้านหน้าแผ่นทดสอบที่ได้รับแสงจากหลอดไฟโดยตรง และด้านหลังแผ่นทดสอบที่ไม่ได้รับแสงจากหลอดไฟโดยตรง
  - (3) การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสี
- 4) วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- 5) การทดสอบคุณภาพของสีหลังเติมผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส

### 3.3.1 การเตรียมสีสำหรับทดสอบอุณหภูมิ

หลักการเตรียมสีน้ำทาอาคารที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อนเริ่มจากผสมวัตถุดิบที่ใช้ในสูตรสีน้ำทาอาคาร ได้แก่ น้ำ สารช่วยกระจายตัว (dispersing additive) สารลดฟอง (anti-foam additive) และสารที่ทำให้เปียก (wetting additive) ตามสัดส่วนสูตรมาตรฐานของบริษัทลงในเครื่องปั่นกวนสีความเร็วรอบสูง (High speed disperser) ปั่นกวนให้เข้ากันด้วยใบพัดปั่นกวนชนิดฟันเลื่อย (saw disc impeller) ใช้ความเร็วรอบปานกลาง ระยะเวลาปั่นกวนประมาณ 5 – 10 นาที จากนั้นเติมส่วนผสมที่มีลักษณะผง ได้แก่ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ผงแคลเซียมคาร์บอเนต ผงดินขาว กรณีสสูตรที่ใส่ผงอะลูมิเนียมให้ใส่ในช่วงนี้ แล้วปั่นกวนให้เข้ากันด้วยความเร็วรอบสูง (1,000 - 1,200 รอบ สำหรับปริมาณสี 1 กิโลกรัม) เป็นระยะเวลา 25 – 30 นาที ตรวจสอบความละเอียดของฟิล์มสีให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดคือ 60 ไมโครเมตรด้วยเกจและเหล็กปาด หากสีที่เตรียมได้ร้อนให้ผึ่งไว้สักพักให้เย็นตัวใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง ขั้นตอนถัดไปเติมสารยึดและสารเติมแต่งอื่น ๆ จนครบสูตร กรณีสสูตรที่เติมนาโนเซลลูโลสซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งกึ่งเหลวสามารถใส่ได้ในช่วงทำขั้นนี้ โดยสัดส่วนต่าง ๆ เป็นดังนี้



### 3.3.1.1 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน

แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน

| รายการสีที่เตรียมสำหรับทดสอบ          | CO NCC (กรัม) | Al (กรัม) | ส่วนประกอบอื่น (กรัม) | รวม (กรัม) | ปริมาณเนื้อของแข็งที่เติม (กรัม) |
|---------------------------------------|---------------|-----------|-----------------------|------------|----------------------------------|
| สีสูตรมาตรฐาน                         | -             | -         | 100.00                | 100.00     | -                                |
| สูตรเติม CO NCC (0.12 กรัมโดยน้ำหนัก) | 1.00          | -         | 100.00                | 101.00     | 0.12                             |
| สูตรเติม CO NCC (0.60 กรัมโดยน้ำหนัก) | 5.00          | -         | 100.00                | 105.00     | 0.60                             |
| สูตรเติม Al (1.00 กรัมโดยน้ำหนัก)     | -             | 1.00      | 100.00                | 101.00     | 1.00                             |
| สูตรเติม Al (5.00 กรัมโดยน้ำหนัก)     | -             | 5.00      | 100.00                | 105.00     | 5.00                             |

หมายเหตุ: CO NCC ที่ปริมาณ 5.00 กรัม มีเนื้อของแข็งอยู่ 0.60 กรัม

CO NCC คือ นาโนเซลลูโลสที่เตรียมจากฝ้ายแต่ปริมาณเนื้อของแข็งค่อนข้างน้อย CO NCC ที่ 5 กรัมในรูปของแข็งที่กระจายอยู่ในของเหลว (dispersion) จะมีเนื้อของแข็งที่ 0.6 กรัม และในการทดลองที่ 3.1 นี้ ได้ทดลองเติมเพิ่ม CO NCC โดยที่ยังไม่ลดปริมาณของส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในสูตร โดยทดลองเติม CO NCC ที่ 1 กรัม และ 5 กรัม เพื่อดูแนวโน้มผลอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าผลอุณหภูมิความร้อนสะสมยังไม่ลดลงเมื่อเทียบกับสีสูตรมาตรฐาน ซึ่งอาจมาจากปริมาณเนื้อของแข็งน้อยเกินไป ทำให้นาโนเซลลูโลสยังไม่แสดงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าสีสูตรมาตรฐาน

## 3.3.1.2 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน

แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเตรียมสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน

| รายการสีที่เตรียมสำหรับทดสอบ                | Al<br>(กรัม) | CO NCC*<br>(กรัม) | น้ำ<br>(กรัม) | ส่วนประกอบ<br>อื่น<br>(กรัม) | รวม<br>(กรัม) | ปริมาณ<br>เนื้อของแข็งที่<br>เติม** (กรัม) |
|---|--------------|-------------------|---------------|------------------------------|---------------|--|
| สีสูตรมาตรฐาน                               | -            | -                 | 21.39         | 78.61                        | 100.00        | -  |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 1 | 0.50         | 1.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 0.62                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 2 | 0.50         | 3.00              | 16.39         | 78.61                        | 100.00        | 0.86                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 3 | 0.50         | 5.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.10                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 4 | 1.00         | 1.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.12                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 5 | 1.00         | 3.00              | 16.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.36                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 6 | 1.00         | 5.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.60                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 7 | 1.50         | 1.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.62                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 8 | 1.50         | 3.00              | 16.39         | 78.61                        | 100.00        | 1.86                                       |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน<br>สูตรที่ 9 | 1.50         | 5.00              | 20.39         | 78.61                        | 100.00        | 2.10                                       |

หมายเหตุ \* CO NCC ที่ปริมาณ 5.00 กรัม มีเนื้อของแข็งอยู่ 0.60 กรัม

\*\* ปริมาณเนื้อของแข็งที่เติมคิดรวมทั้ง Al และ CO NCC

### 3.3.1.3 การเตรียมสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเตรียมสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

| รายการสีที่เตรียมสำหรับทดสอบ | NCC (กรัม) | น้ำ (กรัม) | ส่วนประกอบอื่น (กรัม) | รวม (กรัม) | ปริมาณเนื้อของแข็งที่เติม (กรัม) |
|------------------------------|------------|------------|-----------------------|------------|----------------------------------|
| สีสูตรมาตรฐาน                | -          | 21.39      | 78.61                 | 100        | -                                |
| <i>SCOBY BC</i>              |            |            |                       |            |                                  |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.19 กรัม | 5          | 16.39      | 78.61                 | 100        | 0.19                             |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.38 กรัม | 10         | 11.39      | 78.61                 | 100        | 0.38                             |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.58 กรัม | 15         | 6.39       | 78.61                 | 100        | 0.58                             |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.82 กรัม | 21.39      | 0.00       | 78.61                 | 100        | 0.82                             |
| <i>EU NCC</i>                |            |            |                       |            |                                  |
| สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัม   | 5          | 16.39      | 78.61                 | 100        | 0.50                             |
| สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัม   | 10         | 11.39      | 78.61                 | 100        | 1.01                             |
| สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัม   | 15         | 6.39       | 78.61                 | 100        | 1.51                             |
| สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัม   | 21.39      | 0.00       | 78.61                 | 100        | 2.16                             |

หมายเหตุ: SCOBY BC ที่ปริมาณ 21.39 กรัม มีเนื้อของแข็งอยู่ 0.82 กรัม ส่วน EU NCC ที่ปริมาณ 21.39 กรัม มีเนื้อของแข็งอยู่ 2.16 กรัม

### 3.3.2 การทำสีแผ่นสำหรับทดสอบอุณหภูมิจัดความหนาฟิล์มสี

เมื่อเตรียมสีสำหรับทำแผ่นทดสอบเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทำสีแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหินเพื่อทดสอบอุณหภูมิจัดความหนา โดยตัดแผ่นกระเบื้องให้มีขนาด  $15 \times 30$  ตร.ซม. และนำสีที่ต้องการทดสอบอุณหภูมิมาทาบนแผ่นกระเบื้อง 1 แผ่นต่อ 1 สูตร จำนวนแผ่นละ 3 เทียวย โดยให้สีแห้งสนิทเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจึงทาเทียวยต่อไป หลังจากนั้นทิ้งฟิล์มให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$  และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $65 \pm 5$  เมื่อครบกำหนดแล้วจึงวัดความหนาของฟิล์มสีตอนแห้งสนิทด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์มชนิดแบบไม่ทำลายพื้นผิว (ultrasonic thickness gauge) บันทึกค่าความหนาที่วัดได้ และนำแผ่นเข้าทดสอบอุณหภูมิจัดความหนาตาม ASTM D4803

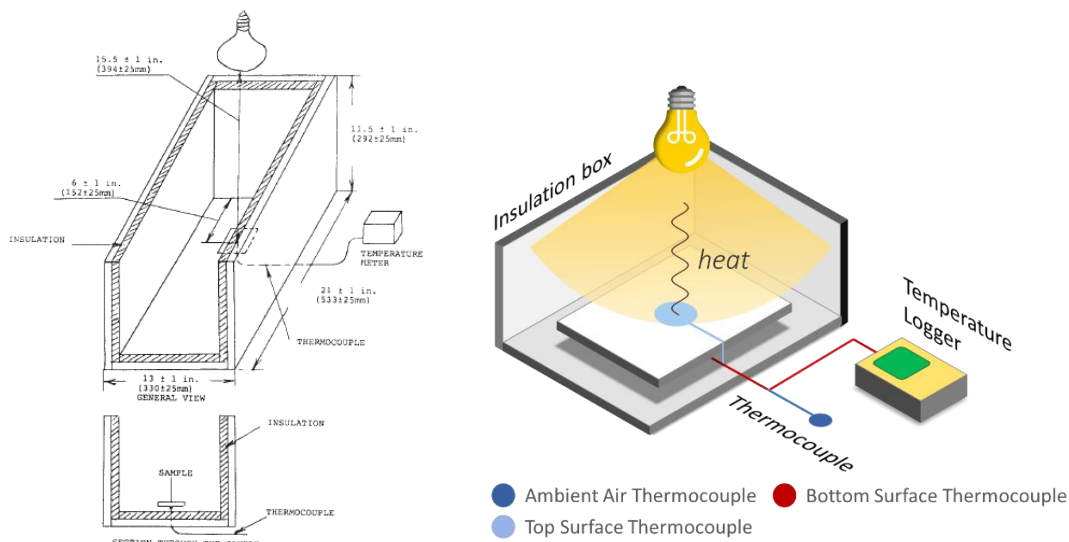
### 3.3.3 การทดสอบอุณหภูมิและสมบัติทางความร้อนของสี

#### 3.3.3.1 การทดสอบความร้อนสะสม (heat buildup) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 และการคำนวณค่าความร้อนสะสม

การทดสอบความร้อนสะสมบนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 [24] เพื่อทำนายค่าความร้อนสะสมของแผ่นทดสอบ โดยค่าความร้อนสะสมคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิอากาศเนื่องจากปริมาณการดูดซับพลังงานจากดวงอาทิตย์ของแผ่นทดสอบ (adsorption) ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบจะถูกตัดเป็นแผ่นเรียบและนำมาวางไว้ใต้หลอดไฟอินฟราเรด (infrared heat lamp) เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าอุณหภูมิอากาศในห้องปฏิบัติการ เทียบกับแผ่นควบคุมซึ่งมีสีดำ เนื่องจากปกติแล้วชิ้นงานที่มีสีดำจะมีการดูดซับพลังงานมากกว่าสีอื่น ๆ และมีค่าความร้อนสะสมมากกว่าสีอื่น ๆ การดูดซับพลังงานที่มากทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงและอาจส่งผลต่อความผิดปกติของรูปร่างชิ้นงานตามมา อย่างไรก็ตามถึงแม้ชิ้นงานจะมีสีเดียวกัน แต่ค่าความร้อนสะสมอาจจะไม่เท่ากัน เนื่องจากองค์ประกอบของสีหรือระบบแม่สีที่ใช้แตกต่างกัน โดยการทดลองนี้จะจำลองสภาวะภายนอกอาคารที่รุนแรงที่สุดโดยมีแดดแรงและไม่มีลม

การทดสอบเริ่มจากนำแผ่นควบคุมสีดำแผ่นเรียบ ขนาด 15 x 30 ตร.ซม. วางในกล่องไม้ที่ไม่มีฝาเปิดด้านบนและตัวผนังกล่องทำจากฉนวนแคลเซียมซิลิเกตหนา 1 นิ้ว สำหรับเป็นฉนวนความร้อนในการทดสอบอุณหภูมิ ส่วนด้านบนเป็นหลอดไฟอินฟราเรด 250 วัตต์สำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นทดสอบ จากนั้นสอดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด J (หรือเทียบเท่า) เส้นที่ 1 จากด้านล่างของกล่องทดสอบขึ้นมาระยะทาง 0.63 เซนติเมตร และติดปลายสายของอุปกรณ์ที่ด้านล่างของแผ่นทดสอบด้วยเทปกาว (ด้านที่ไม่โดนหลอดไฟโดยตรง) ส่วนปลายสายอีกด้านเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอุณหภูมิชนิด J (หรือเทียบเท่า) ส่วนอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลเส้นที่ 2 ติดที่ด้านบนของแผ่นทดสอบ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นทดสอบที่ได้รับความร้อนจากหลอดไฟโดยตรง ซึ่งอุณหภูมิด้านบนแผ่นทดสอบนี้วัดเพิ่มเติมจากมาตรฐาน ASTM D4803 เนื่องจากต้องการวัดค่าความร้อนด้านบนของแผ่นทดสอบด้วย และเส้นที่ 3 ติดที่ด้านบนของกล่องยื่นออกมานอกกล่องให้พ้นจากรังสีของหลอดไฟเพื่อไม่ให้ได้รับความร้อน ใช้วัดอุณหภูมิอากาศ (ambient) ในห้องปฏิบัติการ ส่วนระยะห่างระหว่างหลอดไฟกับชิ้นงานเท่ากับ 39.4 เซนติเมตร เปิดไฟและเปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิเพื่อเริ่มทดสอบอุณหภูมิ ระยะเวลาการทดสอบของแต่ละชิ้นงานเท่ากับ 30 นาที (โดยชิ้นงานที่มีความหนาระหว่าง 0 – 200 ไมโครเมตร ไม่ควรทดสอบเกินระยะเวลา 30 นาที) เมื่อครบระยะเวลาทดสอบที่กำหนด ปิดไฟและเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างที่แผ่นทดสอบเย็นลงต่อเป็นระยะเวลา 10

นาที่ จากนั้นปิดเครื่องทดสอบและนำข้อมูลจากเครื่องทดสอบมาวิเคราะห์ผล โดยชุดอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองชุดทดสอบอุณหภูมิตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4803

เมื่อทดสอบอุณหภูมิเสร็จแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากเครื่องอ่านอุณหภูมิมาคำนวณค่าความร้อนสะสม ดังนี้  
 ค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นกว่าอุณหภูมิอากาศ (Temperature rise;  $\Delta T_{lu}$ ) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta T_{lu} = T_m - T_a \tag{1}$$

โดยที่

$\Delta T_{lu}$  = อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลองภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ

$T_m$  = อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานที่อ่านได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศในห้องทดลอง

ค่าความร้อนสะสม (Heat buildup;  $\Delta T$ ) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{lu}}{\Delta T_{lb}} \times \Delta T_b \tag{2}$$

โดยที่

$\Delta T$  = การทำนายค่าความร้อนสะสมของชิ้นงานภายใต้ความร้อนจากดวงอาทิตย์

$\Delta T_{lu}$  = อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลองภายใต้  
สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ

$\Delta T_{lb}$  = อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลองภายใต้  
สภาวะความร้อนจากหลอดไฟของแผ่นควบคุมสีดำ

$\Delta T_b$  = ความร้อนสะสมของแผ่นควบคุมสีดำภายใต้สภาวะการทดสอบเนื่องมาจาก  
การดูดซับพลังงานจากดวงอาทิตย์

สำหรับตำแหน่งในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 41°C

สำหรับตำแหน่งในแนวนอนมีค่าเท่ากับ 50°C

### 3.3.3.2 การทดสอบอุณหภูมิที่ผิวของฟิล์มสีทั้งด้านหน้าแผ่นทดสอบที่ได้รับแสงจาก หลอดไฟโดยตรงและด้านหลังแผ่นทดสอบที่ไม่ได้รับแสงจากหลอดไฟโดยตรงด้วยกล้อง ถ่ายภาพความร้อน (Thermoscan)

การทดสอบอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านบนของแผ่นทดสอบที่ได้รับความร้อนจากหลอดไฟโดยตรง  
และด้านของแผ่นทดสอบที่ไม่ได้รับความร้อนจากหลอดไฟโดยตรง ทดสอบโดยนำแผ่นทดสอบวางใต้  
หลอดไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยวางในกล่องทดสอบกล่องเดียวกับที่ทดสอบ ASTM D4803 เมื่อ  
ครบ 30 นาที นำกล้องถ่ายภาพทางความร้อนไปยังที่แผ่นทดสอบ ระยะห่าง 1 เมตรเพื่อบันทึก  
อุณหภูมิและความร้อนที่เกิดขึ้นและกลับด้านเพื่อให้ด้านที่ไม่โดนหลอดไฟโดยตรงอยู่ด้านบน นำกล้อง  
ถ่ายภาพความร้อนไปยังที่แผ่นทดสอบ ระยะห่าง 1 เมตรเช่นเดียวกัน ทำเช่นเดียวกันทุกแผ่นทดสอบ

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3.3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลง ขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสี

วิธีทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนภายใต้สภาวะที่กำหนด โดย  
เตรียมชิ้นงานในรูปแบบของฟิล์มสีที่ความหนาฟิล์มเปียก (wet film) 300 ไมโครเมตร ด้วยเครื่อง  
Adjustable film applicator จากนั้นทิ้งให้ฟิล์มแห้งสนิทเป็นระยะเวลา 7 วันที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2^\circ\text{C}$   
และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $65 \pm 5$  เมื่อครบกำหนดตัดชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์เฉพาะของเครื่องพร้อม  
วัดความหนาของชิ้นงานที่แห้งสนิทอีกครั้ง ใส่ชิ้นงานลงในชุดยึดชิ้นงานที่มีหัวจับ 2 ด้าน (grip) วัด  
ระยะของชิ้นงานที่ไม่โดนยึดด้วยหัวจับและบันทึกค่า จากนั้นนำชิ้นงานไปเข้าเครื่องทดสอบโดยตั้งค่า  
สภาวะที่ทดสอบคืออุณหภูมิเริ่มต้น  $30^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิสุดท้าย  $150^\circ\text{C}$  ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของ

อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที่ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และน้ำหนักที่ใช้ 0.1 N ซึ่งเป็นน้ำหนักที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานที่ใช้เป็นฟิล์มที่มีขนาดเล็ก ระยะเวลาที่ทดสอบชิ้นงานประมาณ 25 นาทีต่อ 1 ชิ้นงาน และนำค่าที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน โดยเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน thermomechanical analysis (TMA) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน Thermomechanical Analysis (TMA)

### 3.3.4 วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

การวิเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียและนาโนเซลลูโลสจากพืช โดยนำนาโนเซลลูโลสทั้ง 2 แบบมาระเหยส่วนประกอบที่เป็นของเหลวออกด้วยเครื่อง moisture analyzer เพื่อให้เหลือแต่เนื้อของแข็งที่ไม่ระเหย จากนั้นนำนาโนเซลลูโลสทั้ง 2 แบบเคลือบผิวด้วยผงทองเพื่อช่วยให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า ก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

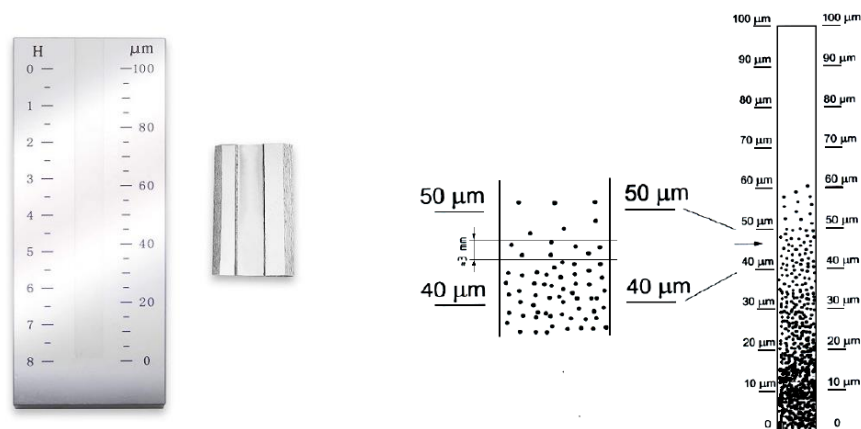
การวิเคราะห์ฟิล์มสีที่เตรียมได้หลังเติมนาโนเซลลูโลสทั้ง 2 แบบ โดยใช้แท่งเหล็กสำหรับเคลือบสี (wire bar coater) ขนาด 100  $\mu\text{m}$  เคลือบสีที่ต้องการทดสอบบนแผ่นกระดาษสำหรับวัดเฉดสี โดยเคลือบสีจำนวน 2 เทียว และผึ่งให้ฟิล์มสีแห้งสนิทประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นงานให้มีขนาดเล็กและเคลือบด้วยทองเช่นเดียวกัน ก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

### 3.3.5 การทดสอบคุณภาพของสีตัวอย่าง

การทดสอบคุณภาพของสีหลังเติมผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลสจะอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีอิมัลชันทนสภาวะอากาศ มอก. 2321-2549 ในหัวข้อการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 3.3.5.1 ความละเอียดของเนื้อสี

การวัดความละเอียดของเนื้อสีทดสอบตาม มอก. 285 เล่ม 8 โดยใช้เกจและเหล็กปาด (grind gauge) เริ่มจากวางเกจในแนวนอนบนพื้นเรียบ นำสีตัวอย่างหยดบนร่องของเกจทั้ง 2 ร่องที่จุด 100 ไมโครเมตรโดยให้เนื้อสีเต็มความกว้างของร่อง จากนั้นใช้สองมือจับเหล็กปาดปาดเนื้อสีจากด้านบน 100 ไมโครเมตรสู่ด้านล่างที่ 0 ไมโครเมตรโดยที่เหล็กปาดต้องตั้งฉากกับผิวเกจตลอดการปาดสี หลังจากปาดเสร็จให้อ่านค่าความละเอียดทันทีจากอนุภาคที่ปรากฏบนฟิล์มสีในร่อง ให้สังเกตจุดที่อนุภาคระจุกตัวหนาแน่นประมาณ 10 อนุภาคภายในช่วงแถบกว้าง 3 mm โดยนับจุดแรกที่มีการระจุกตัวดังกล่าวโดยไม่คำนึงถึงตำแหน่งที่เห็นอนุภาคกระจายอยู่ก่อนหน้าจุดที่เริ่มเห็นอนุภาคระจุกตัวชัดเจน



รูปที่ 3.3 เกจและเหล็กปาด (ซ้าย) และตัวอย่างการอ่านค่าความละเอียดที่ 45  $\mu\text{m}$  (ขวา)

#### 3.3.5.2 กำลังซ่อนแสง

การทดสอบกำลังซ่อนแสงทดสอบตาม มอก. 285 เล่ม 16 เพื่อทดสอบความสามารถในการซ่อนแสงของฟิล์มสี เริ่มจากเตรียมกระดาษแข็งพื้นขาวดำโดยยึดปลายด้านหนึ่งของกระดาษไว้กับแผ่นแก้วแบนเรียบหนาน้อย 6 มิลลิเมตร ระวางไม่ให้เกิดรอยนิ้วมือบนกระดาษบริเวณที่จะทำการเคลือบสี กวนสีที่จะทดสอบให้เข้ากันและระวางไม่ให้มีฟองอากาศเกิดขึ้น ใช้สีประมาณ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรหยอดเป็นแนวตามขวางที่ปลายด้านหนึ่งของกระดาษแข็ง แล้วใช้เครื่องทำฟิล์ม



ชนิดแท่งเหล็ก (wire bar coater) สำหรับเตรียมฟิล์ม 100  $\mu\text{m}$  เคลือบสีมาอีกด้านหนึ่งของกระดาษด้วยความเร็วประมาณ 100 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นจึงวางกระดาษที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มสีบนพื้นราบเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมงและไม่เกิน 168 ชั่วโมงก่อนนำไปวัดค่าการสะท้อนแสง โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Spectrophotometer เลือกโหมดทำงาน overlight/overdark เพื่อวัดค่ากำลังช่องแสงจากอัตราส่วนความมืดแพก (contrast ratio)

### 3.3.5.3 เสถียรภาพต่อการเก็บ

การทดสอบเสถียรภาพของสีต่อการเก็บทดสอบตาม มอก. 285 เล่ม 12 เพื่อตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาและภาวะการเก็บที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเก็บสีตัวอย่างที่ 1 เดือน และมีเกณฑ์การพิจารณาลักษณะดังนี้ การนอนกันแข็ง การชันแข็ง การจับเป็นก้อน ไม่มีผงหยาบ ไม่เป็นวุ้นเหนียว ความหนืดเพิ่มขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ไม่เป็นเม็ด ไม่มีกลิ่นบูดเน่า ไม่เป็นฝ้า ไม่เกิดก๊าซ ไม่แยกชั้น ไม่แห้งช้า และไม่มี การเปลี่ยนสี

### 3.3.5.4 เสถียรภาพต่อการเก็บที่อุณหภูมิสูง

การทดสอบเสถียรภาพของสีต่อการเก็บที่อุณหภูมิสูงอ้างอิง มอก. 285 เล่ม 12 เพื่อตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาและอุณหภูมิการเก็บที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการเก็บตัวอย่างสีในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยทุก 168 ชั่วโมงจะนำสีออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการวัดและมีเกณฑ์การพิจารณาลักษณะ คือ สีต้องไม่จับตัวเป็นก้อนแข็ง ไม่เป็นฝ้า ไม่มีของแข็งนอนกันภาชนะ ไม่เปลี่ยนสี และต้องสามารถปรับหรือลดความหนืดให้เหมาะสมเพื่อใช้งานได้

### 3.3.5.5 การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ

การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ ทดสอบโดยวิธีเร่งสภาวะ โดยเคลือบสีบนแผ่นกระเบื้องซีเมนต์โยหินแล้วฝังในเครื่องเร่งสภาวะตามที่กำหนดใน ASTM G154 โดยมีภาวะวงจรคือ รับรังสียูวี 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C และควบแน่น 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50°C ใช้เวลาในการฝังในเครื่องเร่งสภาวะ 1,000 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดแล้วฟิล์มสีต้องไม่เกิดการกัดกร่อน ร้าว ล่อน เป็นเกล็ด พอง และพื้นผิวต้องอยู่ในสภาพที่เคลือบสีทับได้ ระหว่างการฝังฟิล์มของสีต้องยังคงอยู่ในสภาพปกติ ไม่เกิดการเป็นฝุ่น และการเปลี่ยนสีจะแตกต่างจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรย์สเกลระดับ 3

### 3.3.5.6 การทดสอบความทนทานต่อน้ำ

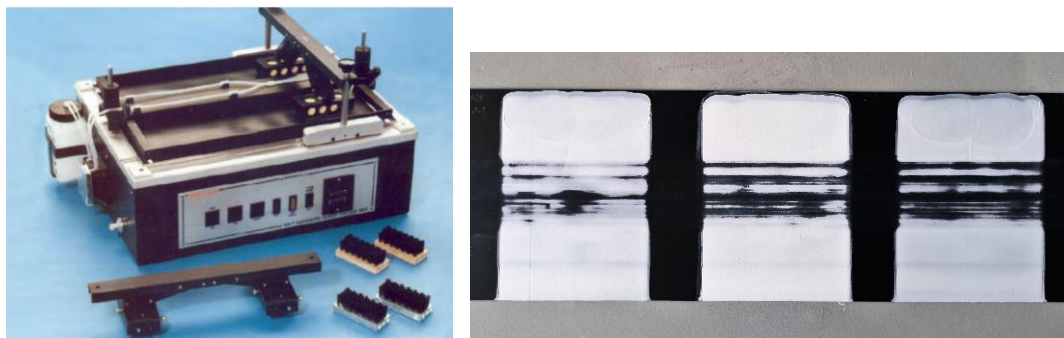
การทดสอบตาม มอก. 285 เล่ม 22 เริ่มจากเคลือบสีด้วยแปรงให้เรียบสม่ำเสมอบนแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหินขนาดประมาณ 150 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง แล้วเคลือบซ้ำ โดยให้ความหนาของฟิล์มขณะเปียกแต่ละชั้นประมาณ 50 ไมโครเมตร ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นระยะเวลา 14 วัน แล้วเคลือบด้านหลังและขอบด้วยพาราฟิน จากนั้นให้แช่แผ่นทดสอบในน้ำเป็นระยะเวลา 10 วัน เมื่อทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ฟิล์มสีต้องไม่พอง ไม่ย่น แตก หลุดล่อน หรือมีข้อบกพร่องอื่น ๆ และการเปลี่ยนสีจะแตกต่างจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรย์สเกลระดับ 4

### 3.3.5.7 การทดสอบความทนทานต่อค้าง

การทดสอบตาม มอก. 285 เล่ม 23 เริ่มจากเคลือบสีด้วยแปรงให้เรียบสม่ำเสมอบนแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหินขนาดประมาณ 150 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง แล้วเคลือบซ้ำ โดยให้ความหนาของฟิล์มขณะเปียกแต่ละชั้นประมาณ 50 ไมโครเมตร ทิ้งไว้ให้แห้งเป็นระยะเวลา 14 วัน แล้วเคลือบด้านหลังและขอบด้วยพาราฟิน และให้แช่แผ่นทดสอบในสารละลายอิมัลชัน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 144 ชั่วโมงสำหรับสีภายนอก เมื่อทดสอบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ฟิล์มสีต้องไม่พอง ไม่ย่น แตก หลุดล่อน หรือมีข้อบกพร่องอื่น ๆ และการเปลี่ยนสีจะแตกต่างจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรย์สเกลระดับ 4

### 3.3.5.8 การทดสอบความทนทานต่อการขีดถู

การทดสอบความทนทานต่อการขีดถูอ้างอิง ASTM D2486 เริ่มจากเคลือบสีที่ต้องการทดสอบด้วยแท่งเหล็กสำหรับเตรียมฟิล์มสี (wire bar coater) 100  $\mu\text{m}$  บนแผ่นพลาสติกไวโนลีสดำ สำหรับทดสอบความทนทานต่อการขีดถู ทิ้งแผ่นทดสอบให้แห้งเป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นนำแผ่นทดสอบขีดด้วยแปรงบนเครื่องทดสอบความทนทานต่อการขีดถู โดยใช้สารละลายที่มีผงขัดร้อยละ 10 เป็นตัวกลางในการขีดเพื่อเร่งเวลาทดสอบ บันทึกกรอบที่ฟิล์มสีขาดจนเห็นพื้นดำเป็นแนวยาวและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อพิจารณาความทนทานต่อการขีดถู



รูปที่ 3.4 แปรงขัดและเครื่อง wet abrasion scrub tester (ซ้าย) และแผ่นไวนิลสีดำที่ขัดถูเสร็จแล้ว (ขวา)

### 3.3.5.9 การทดสอบความชื้นของสี

การทดสอบความชื้นของสีอ้างอิง มอก. 285 เล่ม 14 เริ่มจากนำสีตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นของสี Storer viscometer (Krebs Unit, KU) แบบที่มีอัตราแรงเฉือนสม่ำเสมอที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที บันทึกค่าที่ได้เพื่อนำมาพิจารณาค่าความหนืด



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความชื้นหนืดแบบ storer-type

### 3.3.5.10 การทดสอบความหนาแน่นของสี

การทดสอบความหนาแน่นของสีตาม ASTM D1475 เริ่มจากนำถ้วยสำหรับหาความหนาแน่นของสี (pycnometer) มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกเป็นน้ำหนักถ้วยเปล่าเริ่มต้น จากนั้นชั่งสีใส่ถ้วยสำหรับหาความหนาแน่นของสีโดยค่อย ๆ เทสีจนเต็มถ้วยและระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ จากนั้นนำถ้วยที่ใส่สีไปชั่งอีกครั้ง บันทึกน้ำหนักของถ้วยและสีเพื่อนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของสีร่วมกับปริมาตรของถ้วย

### 3.3.5.11 การทดสอบหาของแข็งที่ไม่ระเหยของสี

การทดสอบหาของแข็งที่ไม่ระเหยของสีโดยใช้เครื่องวัดความชื้น (moisture analyzer) ตาม ASTM D7232 เพื่อหาร้อยละของของแข็งที่ไม่ระเหยในเนื้อสี เริ่มจากชั่งสีใส่ถาดของเครื่อง เครื่องจะเริ่มทำงานโดยให้ความร้อนแก่เนื้อสี สารที่ระเหยได้จะระเหยออกไปจากความร้อน จนกระทั่งได้น้ำหนักสีเริ่มคงที่และเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด นับเป็นน้ำหนักสีที่เหลือจากการระเหยหรือของแข็งที่ไม่ระเหย บันทึกค่าที่ได้

### 3.3.5.12 การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของสี

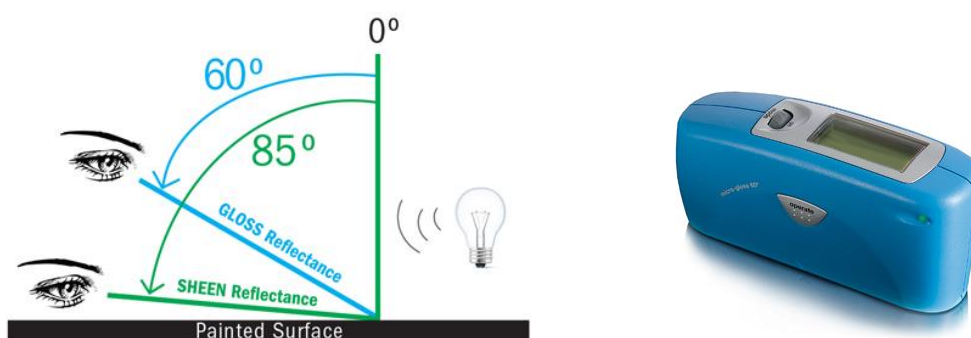
การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของสีโดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรดต่างของสี (pH meter) และบันทึกค่าที่ได้

### 3.3.5.13 การทดสอบเฉดสี

การทดสอบเฉดสีแบบ CIE L\*, a\*, b\* โดยใช้แท่งเหล็กสำหรับเตรียมฟิล์มสี (wire bar coater) 100  $\mu\text{m}$  เคลือบสีที่ต้องการทดสอบบนแผ่นกระดาษสำหรับวัดเฉดสี โดยเคลือบสีจำนวน 2 เที้ยว และผึ่งให้ฟิล์มสีแห้งสนิทประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทดสอบไปวัดค่าเฉดสีด้วยเครื่อง spectrophotometer ด้วยโหมดทำงาน reflectance

### 3.3.5.14 การทดสอบความเงาของฟิล์มสี

การทดสอบความเงาของฟิล์มสีตาม มอก. 285 เล่ม 17 โดยใช้แท่งเหล็กสำหรับเตรียมฟิล์มสี (wire bar coater) 100  $\mu\text{m}$  เคลือบสีที่ต้องการทดสอบบนแผ่นกระดาษสำหรับวัดเฉดสี โดยเคลือบสีจำนวน 2 เที้ยว และผึ่งให้ฟิล์มสีแห้งสนิทประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทดสอบวัดค่าความเงาของฟิล์มสีด้วยเครื่องวัดความเงาที่มุม  $60^\circ$  และ  $85^\circ$



รูปที่ 3.6 การวัดความเงาที่มุม 60 และ 85 องศา (ซ้าย) เครื่องวัดความเงา (ขวา)

### 3.3.5.15 การทดสอบความทนทานต่อการเกาะฝุ่น

การทดสอบความทนทานต่อการเกาะฝุ่น (Dirt pickup resistance and stain removal) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3719 เป็นการทดสอบความต้านทานต่อการเกาะติดฝุ่นของฟิล์มสีและการเช็ดล้างคราบฝุ่นออก โดยเริ่มจากเคลือบสีด้วยแปรงให้เรียบสม่ำเสมอบนแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน จากนั้นทิ้งฟิล์มสีให้แห้งสนิทระยะเวลา 7 วัน และโรยผงสีอนินทรีย์สีแดงที่เป็นตัวแทนฝุ่นให้เกาะติดบนฟิล์มสี นำไปอบในตู้อบ 60°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นออกมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เคาะผงที่เป็นตัวแทนฝุ่นออกเป็นจำนวนการเคาะ 10 ครั้ง แล้วปิดด้วยแปรงขนอ่อน นำแผ่นทดสอบไปผ่านน้ำเป็นเวลา 10 วินาที (ให้น้ำไหลท่วมแผ่น จากด้านบนลงล่าง) ใช้ไม้บรรทัดทาบกับแผ่นกระเบื้องตามแนวยาว เอาฟองน้ำจุ่มน้ำหมาด ๆ ถูกับสบู่จำนวน 10 ครั้ง นำฟองน้ำที่ถูสบู่แล้วไปเช็ดแผ่นกระเบื้องที่ไม้บรรทัดทาบไว้จำนวน 10 รอบ ให้เท่ากันทุกแผ่นการทดสอบ ล้างน้ำให้สะอาด ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง บันทึกผลเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีในระดับเกรย์สเกล

### 3.3.5.16 การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศตามสภาวะจริง

การทดสอบความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศตามสภาวะจริง ตาม ASTM D7897 ทดสอบโดยทา กลิ้ง หรือพ่นบนชิ้นงานที่เป็นกระเบื้องซีเมนต์ใยหินจำนวน 2-3 เทียหรือจนวนกลมมิตพื้นผิว โดยให้แต่ละเทียแห้งสนิท จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน กำหนดบริเวณพื้นที่ทดสอบของชิ้นงาน เพื่อวัดค่าก่อนการทดสอบ ได้แก่ ค่า reflectance เช่น ค่า  $L^* a^* b^*$  โดยใช้เครื่อง spectrophotometer และค่าความเงาของฟิล์มสี นำแผ่นชิ้นงานไปตากบนชั้นทดสอบเพื่อให้ได้รับแสงแดดและสภาพอากาศตามธรรมชาติโดยตรง โดยให้ชิ้นงานทำมุม 45 องศาจากพื้น เก็บผลทุก 1 เดือน หรือตามระยะเวลาที่กำหนด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมสีน้ำทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อน โดยใช้ผงอะลูมิเนียม (Al) และนาโนเซลลูโลส (NCC) วัตถุประสงค์ที่นำมาใช้คือผงอะลูมิเนียมที่มีสมบัติเงาวาวช่วยสะท้อนความร้อน และนาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฝ้าย (cotton nanocellulose, CO NCC) นาโนเซลลูโลสจากยูคาลิปตัส (eucalyptus nanocellulose, EU NCC) และนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (SCOBY bacterial cellulose, SCOBY BC)

การเตรียมสีขั้นเริ่มผสม (premixing หรือ pre-disperse) เริ่มจากปั่นกวนส่วนผสมสีน้ำทาภายนอกตามสูตรมาตรฐานเพื่อปรับสถานะสำหรับการใส่ผงสี ใช้ความเร็วรอบของใบพัดในการปั่นกวนปานกลาง ถัดมาเป็นขั้นการบด (grinding) เป็นขั้นตอนการใส่ผงสี สูตรทดลองที่ใช้ Al จะใส่ในขั้นตอนนี้ด้วยและใช้ความเร็วใบพัดรอบสูงเพื่อให้ Al เข้ากับของเหลวในระบบได้ดี ส่วนการเติมส่วนผสมช่วงท้าย (let down) คือ การใส่สารยึด สารกันบูด และสารเติมแต่งต่าง ๆ รวมทั้งน้ำที่เป็นตัวเจือจางในระบบ ซึ่ง NCC สามารถเติมในช่วงนี้ได้เนื่องจาก NCC อยู่ในรูปของแข็งที่กระจายอยู่ในของเหลว (dispersion) จึงเข้ากับระบบได้ง่ายและไม่ต้องใช้ความเร็วรอบของใบพัดที่สูง ในการเติม NCC จะเติมแทนที่น้ำในระบบเพื่อไม่ให้กระทบต่อสมบัติการใช้งานของสีและผลคุณภาพอื่น ๆ

เมื่อได้สีน้ำทาภายนอกตามสูตรทดสอบครบแล้วจึงนำไปทาบนกระเบื้องแผ่นเรียบด้วยแปรงทาสี จำนวน 3 รอบ พร้อมวัดความหนาฟิล์ม เพื่อหาค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 ทดสอบความสามารถในการนำความร้อนของสีด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน (Thermoscan) ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสี และวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รวมทั้งทดสอบคุณภาพของสีหลังเติมด้วยผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส

#### 4.1 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803

##### 4.1.1 ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน

จากตารางที่ 4.1 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกันที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน พบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานที่อ่านได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Tm) ที่ระยะเวลา 30 นาที เท่ากับ 82.1°C ซึ่งเป็นค่าสูงสุด

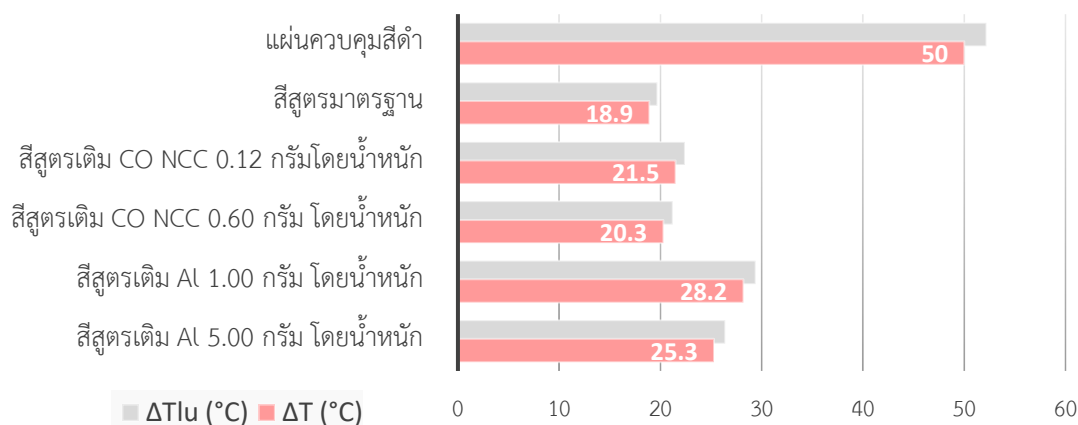
แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานเท่ากับ 49.4°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.12 กรัมโดยน้ำหนักเท่ากับ 52.3°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.60 กรัมโดยน้ำหนักเท่ากับ 51.1°C ส่วนแผ่นที่ทำด้วยสีสูตร Al 1.00 กรัม โดยน้ำหนักและ 5.00 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 59°C และ 58°C ตามลำดับ

เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาคำนวณค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ ( $\Delta T_{lu}$ ) พบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่า 52.2°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานเท่ากับ 19.7°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.12 กรัมโดยน้ำหนักเท่ากับ 22.4°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.60 กรัมโดยน้ำหนัก 21.2°C ส่วนแผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม Al 1.00 กรัม โดยน้ำหนักและ 5.00 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 29.4°C และ 26.4°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานมีค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟต่ำที่สุด ส่วนแผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.12 กรัม และ 0.60 กรัม โดยน้ำหนัก มีค่าสูงกว่าสีสูตรมาตรฐานประมาณ 1 – 3°C เท่ากับ 22.4°C และ 21.2°C ส่วนแผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม Al 1.00 กรัม และ 5.00 กรัมมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าสีสูตรมาตรฐานประมาณ 6 – 10°C เท่ากับ 29.4°C และ 26.4°C ตามลำดับ การที่สีสูตรมาตรฐานมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าการเติมด้วย CO NCC มาจากปริมาณเนื้อของแข็ง (solid) ของ CO NCC น้อยเกินไป เมื่อนำมาทดลองเติมในสีแบบยังไม่ลดปริมาณของส่วนประกอบอื่น ๆ ในสูตรทำให้ไม่ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิมากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมด้วยผงอะลูมิเนียมที่มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าสีสูตรมาตรฐานค่อนข้างมาก น่าจะเป็นผลมาจากอะลูมิเนียมมีสมบัติในการนำความร้อนในตัวเอง เมื่อนำมาเติมในสีน้ำแบบระบบอิมัลชันซึ่งไม่มีตัวทำละลายอินทรีย์ที่ช่วยพยุ่งอนุภาคของผงอะลูมิเนียมให้จัดเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอบนผิวฟิล์ม ทำให้ฟิล์มสีไม่แสดงความเงา ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อนของฟิล์มสีไม่ตีเท่าสูตรมาตรฐาน นอกจากนี้มีงานวิจัยพบว่าเมื่อนำอะลูมิเนียมมาปรับปรุงสมบัติสะท้อนความร้อนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเติมอะลูมิเนียมในผงไทเทเนียมไดออกไซด์ผ่านกระบวนการ sol-gel ร้อยละ 0.1 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรต่อแสงดีขึ้น (photostability) แต่สมบัติเรื่องการสะท้อนความร้อนไม่เปลี่ยนแปลง [25]

จากนั้นนำค่า  $\Delta T_{lu}$  มาคำนวณค่าความร้อนสะสม ( $\Delta T$ ) พบว่าแผ่นควบคุมมีค่าความร้อนสะสมเท่ากับ 50°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานมีค่าความร้อนสะสมเท่ากับ 18.9°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.12 กรัม และ 0.60 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าความร้อนสะสมเท่ากับ 21.5°C และ 20.3°C ตามลำดับ ส่วนแผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม Al 1.00 กรัม และ 5.00 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าความ

ตารางที่ 4.1 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน

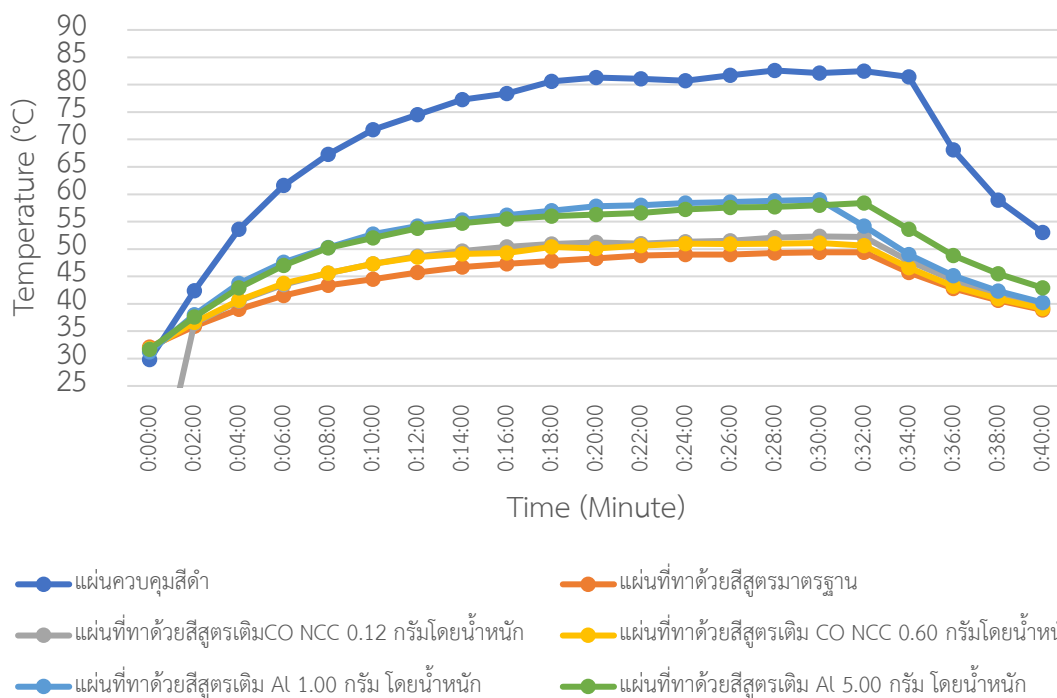
| ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 | Tm (°C) | Ta (°C) | $\Delta T_{lu}$ (°C) | $\Delta T_{lb}$ (°C) | $\Delta T_b$ (°C) | $\Delta T$ (°C) | อุณหภูมิผิวด้านบน (°C) | ความหนาฟิล์ม ( $\mu\text{m}$ ) |
|---|---------|---------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------|
| แผ่นควบคุมสีดำ                                | 82.1    | 29.9    | -                    | 52.2                 | 50                | 50              | 83                     | 70..2                          |
| แผ่นสูตรมาตรฐาน                               | 49.4    | 29.7    | 19.7                 | -                    | 50                | 18.9            | 52.7                   | 70.5                           |
| แผ่นเติม CO NCC 0.12 กรัมโดยน้ำหนัก           | 52.3    | 29.9    | 22.4                 | -                    | 50                | 21.5            | 53.9                   | 70.2                           |
| สีสูตรเติม CO NCC 0.60 กรัมโดยน้ำหนัก         | 51.1    | 29.9    | 21.2                 | -                    | 50                | 20.3            | 53.1                   | 70.3                           |
| สีสูตรเติม Al 1.00 กรัม โดยน้ำหนัก            | 59      | 29.6    | 29.4                 | -                    | 50                | 28.2            | 61.9                   | 70.3                           |
| สีสูตรเติม Al 5.00 กรัม โดยน้ำหนัก            | 58      | 31.6    | 26.4                 | -                    | 50                | 25.3            | 64.5                   | 70.3                           |



รูปที่ 4.1 ผลต่างอุณหภูมิของฟิล์มสีกับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat buildup,  $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม Al เทียบกับสีที่เติม CO NCC

ร้อนสะสมเท่ากับ 28.2°C และ 25.3°C ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความร้อนสะสมที่ได้พบว่า สูตรที่เติม CO NCC ทั้ง 0.12 กรัมและ 0.60 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าสูงกว่าสีสูตรมาตรฐานเล็กน้อย และไม่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนอาจเนื่องมาจากปริมาณที่เติมน้อยเกินไป ส่วนสูตรที่เติมด้วย Al 1.00 กรัม และ 5.00 กรัมโดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนสะสมค่อนข้างสูงกว่าสีสูตรมาตรฐาน และสูตรที่เติมด้วย CO NCC โดยกราฟแสดงผล  $\Delta T$  แสดงดังรูปที่ 4.2



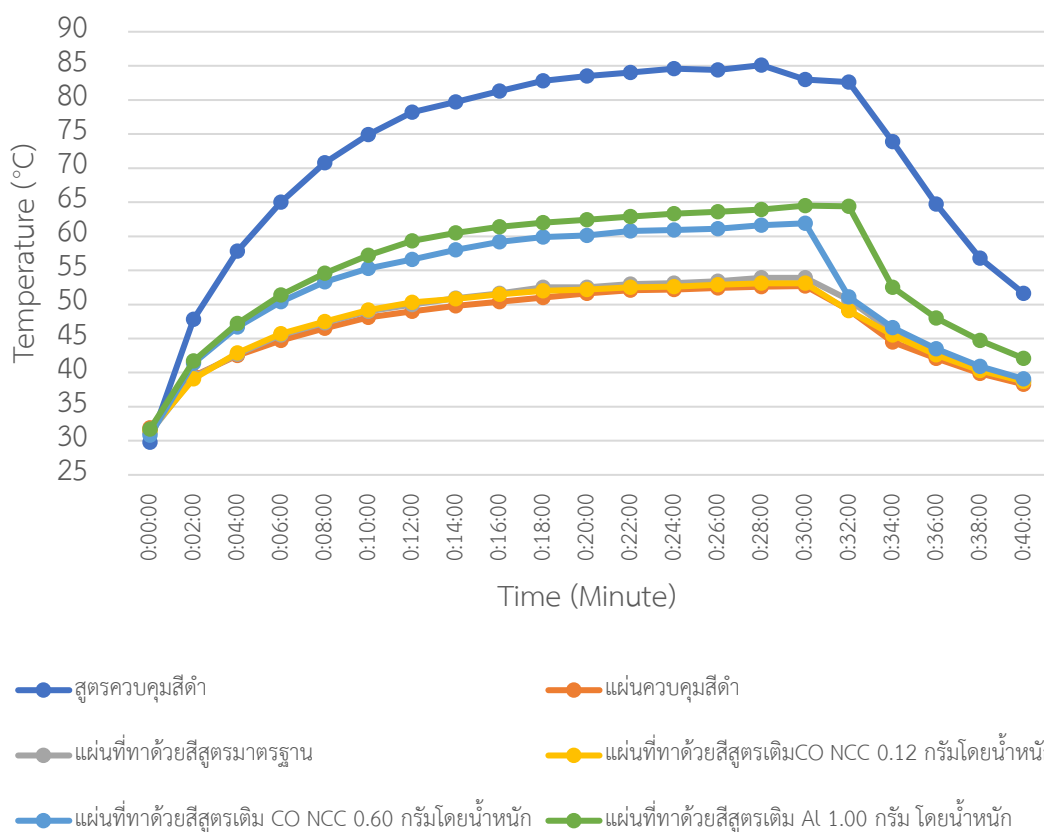


รูปที่ 4.2 ผลอุณหภูมิค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบแยกกัน

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลอุณหภูมิค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) หรือ  $\Delta T$  พบว่าช่วงเริ่มต้นของการทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟจนถึงระยะเวลา 10 นาที อุณหภูมิของแผ่นทดสอบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ตั้งแต่ช่วงระยะเวลา 20 – 30 นาที โดยที่ระยะเวลา 30 นาทีเป็นเวลาที่แผ่นทดสอบได้รับความร้อนสูงสุดก่อนที่จะทำการปิดหลอดไฟ หลังจากนั้นทิ้งให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบลดลงเป็นระยะเวลา 10 นาทีจึงทำการปิดเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ซึ่งจากเส้นกราฟแสดงแนวโน้มของแผ่นควบคุมสีดำมีค่าความร้อนสะสมสูงสุดตลอดการทดลอง ส่วนสีสูตรมาตรฐานและสูตรเติม CO NCC ทั้ง 0.12 กรัมและ 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก มีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน แต่สูตรมาตรฐานจะมีค่าต่ำกว่า ในขณะที่สูตรที่เติม Al มีอุณหภูมิสูงกว่าสูตรมาตรฐานอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟประกอบกันดังรูปที่ 4.3 พบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่าสูงสุดซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนความร้อนของผงสีสีดำ เนื่องจากปกติแล้วผงสีสีดำมีสมบัติในการดูดกลืนแสงมากกว่าการกระเจิงแสง [25] มีค่าเท่ากับ  $83^{\circ}\text{C}$  แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานมีค่าเท่ากับ  $52.7^{\circ}\text{C}$  แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรเติม CO NCC 0.12 กรัม และ 0.60 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ  $53.9^{\circ}\text{C}$  และ  $53.1^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ส่วนแผ่นที่ทำด้วย

สีสูตรเติม Al 1.00 กรัมและ 5.00 กรัมโดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 61.9°C และ 64.5°C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนสะสมของฟิล์มสีได้แผ่นทดสอบ โดยกราฟอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นทดสอบแสดง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลทดสอบอุณหภูมิด้านบนของแผ่นกระเบื้อง (ด้านที่ทาสี) ภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ

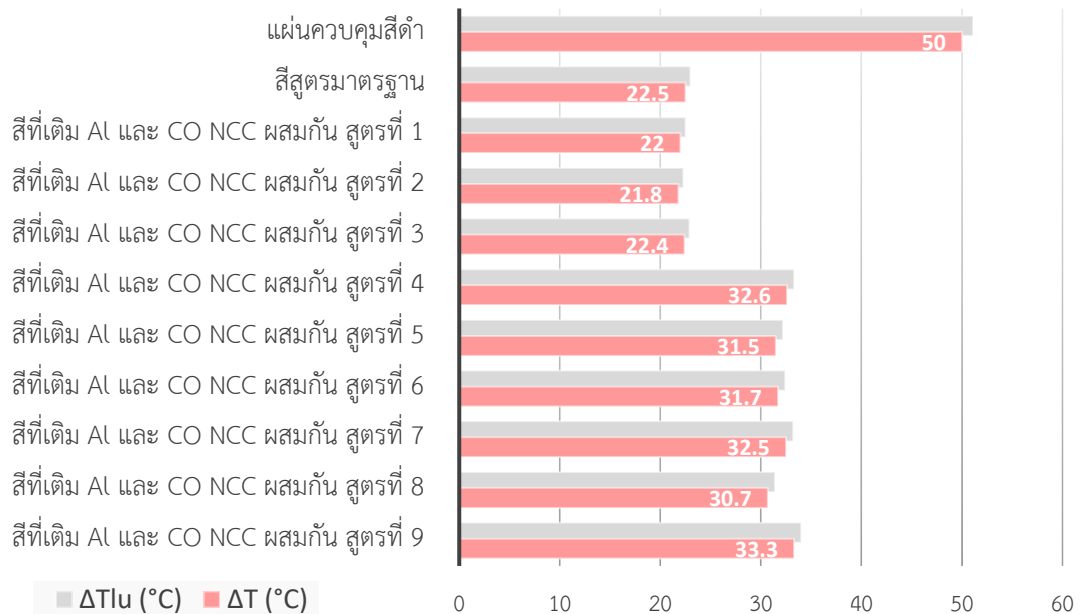
ผลทดสอบอุณหภูมิด้านบนของแผ่นกระเบื้องพบว่ากรณีที่เติมนาโนเซลลูโลสซึ่งมีความพรุนจากตัวโครงสร้างใส่ลงในเนื้อสี ส่งผลให้ความเรียบของฟิล์มสีและค่าสะท้อนความร้อนลดลงเล็กน้อยกว่าสูตรมาตรฐานที่ไม่ได้เติมนาโนเซลลูโลส [13] ทำให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวบนสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนอุณหภูมิผิวบนที่สูงขึ้นจากการเติมอะลูมิเนียมเนื่องจากอนุภาคของอะลูมิเนียมไม่สามารถจัดเรียงตัวขนานกับผิวฟิล์มได้ ทำให้ไม่แสดงสมบัติในการสะท้อนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสมบัติการนำความร้อนของอะลูมิเนียมเองส่งผลให้อุณหภูมิของสีที่ผิวบนมีค่าสูงกว่าสูตรมาตรฐานที่ไม่ได้เติมด้วยอะลูมิเนียม

#### 4.1.2 ค่าความร้อนสะสมชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน พบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานที่อ่านได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Tm) ที่ระยะเวลา 30 นาทีเท่ากับ 81.6°C ซึ่งเป็นค่าสูงสุด แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานเท่ากับ 53.5°C ส่วนสีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกันคือ สูตรที่ 1 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดให้ใส่ Al 0.5 กรัมโดยน้ำหนักและ CO NCC 1 กรัม 3 กรัม และ 5 กรัมโดยน้ำหนักตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับสูตรมาตรฐาน โดยมีค่าอยู่ที่ 53°C 52.7°C และ 53.3°C ตามลำดับ

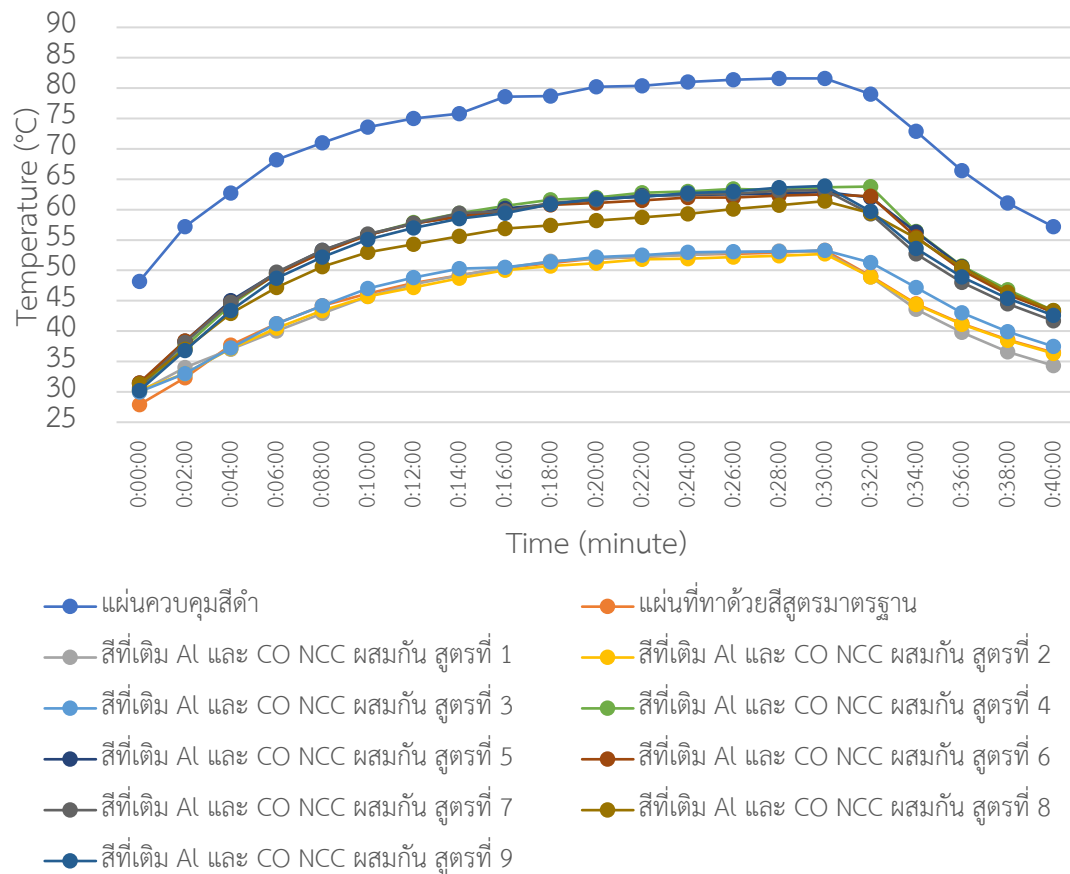
ตารางที่ 4.2 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน

| ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 | Tm (°C) | Ta (°C) | $\Delta T_{lu}$ (°C) | $\Delta T_{lb}$ (°C) | $\Delta T_b$ (°C) | $\Delta T$ (°C) | อุณหภูมิผิวด้านบน (°C) | ความหนาฟิล์ม ( $\mu\text{m}$ ) |
|---|---------|---------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------|
| แผ่นควบคุมสีดำ                                | 81.6    | 30.5    | -                    | 51.1                 | 50                | 50.0            | 83.5                   | 70.2                           |
| สีสูตรมาตรฐาน                                 | 53.5    | 30.5    | 23.0                 | -                    | 50                | 22.5            | 58.3                   | 70.4                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 1      | 53.0    | 30.5    | 22.5                 | -                    | 50                | 22.0            | 59.0                   | 70.3                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 2      | 52.7    | 30.4    | 22.3                 | -                    | 50                | 21.8            | 58.0                   | 70.4                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 3      | 53.3    | 30.4    | 22.9                 | -                    | 50                | 22.4            | 56.8                   | 70.8                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 4      | 63.7    | 30.4    | 33.3                 | -                    | 50                | 32.6            | 66.3                   | 70.4                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 5      | 62.9    | 30.7    | 32.2                 | -                    | 50                | 31.5            | 66.0                   | 70.6                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 6      | 62.5    | 30.1    | 32.4                 | -                    | 50                | 31.7            | 69.0                   | 70.3                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 7      | 63.2    | 30.0    | 33.2                 | -                    | 50                | 32.5            | 68.8                   | 70.4                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 8      | 61.4    | 30.0    | 31.4                 | -                    | 50                | 30.7            | 63.4                   | 70.2                           |
| สีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน สูตรที่ 9      | 63.9    | 29.9    | 34.0                 | -                    | 50                | 33.3            | 70.3                   | 70.5                           |



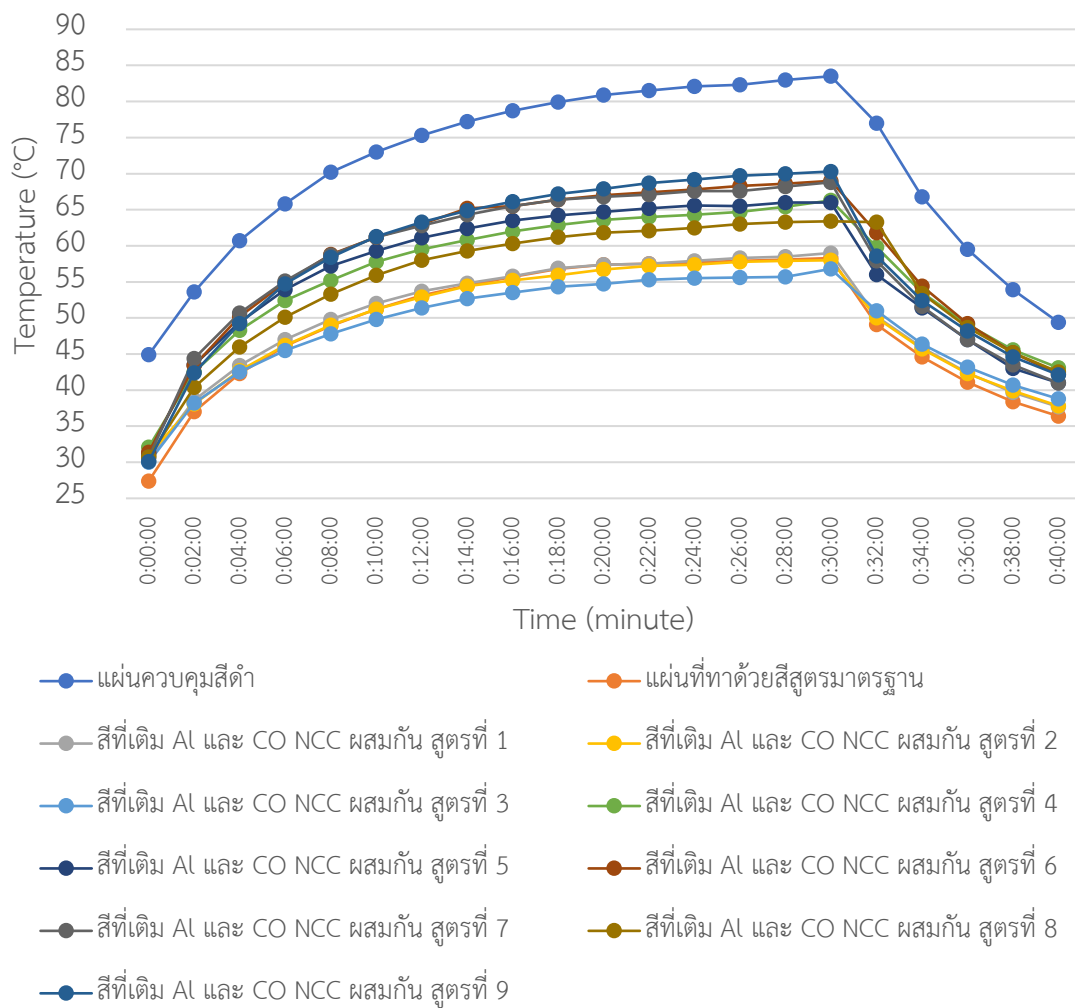
รูปที่ 4.4 ผลต่างอุณหภูมิของสีกับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat buildup,  $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน

ส่วนสีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกันคือ สูตรที่ 4 สูตรที่ 5 และสูตรที่ 6 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดให้ใส่ Al 1.0 กรัมโดยน้ำหนักและ CO NCC 1 กรัม 3 กรัม และ 5 กรัมโดยน้ำหนักตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างชัดเจนโดยมีค่าอยู่ที่ 63.7°C 62.9°C และ 62.5°C ตามลำดับ และยิ่งเพิ่มปริมาณของ Al สูงขึ้นคือเป็น 1.5 กรัมโดยน้ำหนัก และ CO NCC 1 กรัม 3 กรัม และ 5 กรัมโดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าผลอุณหภูมิยังคงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เมื่อนำค่า  $T_m$  มาคำนวณค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม ( $\Delta T$ ) ของสูตรที่ใช้ Al น้อยกว่าจึงมีค่าความร้อนสะสมที่แผ่นทดสอบน้อยกว่า (ในขณะที่ปริมาณของ CO NCC มีค่าเท่ากัน) ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม Al และ CO NCC ผสมกัน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นทดสอบภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ ประกอบกันพบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่าสูงสุดซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนความร้อนของผงสีดำ มีค่าเท่ากับ 83.5°C แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 58.3°C ส่วนสีที่เติม Al และ CO NCC ผสมกันคือ สูตรที่ 1 สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดให้ใส่ Al 0.5 กรัมโดยน้ำหนักและ CO NCC 1 กรัม 3 กรัม และ 5 กรัมโดยน้ำหนักตามลำดับ มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับสูตรมาตรฐาน โดยมีค่าอยู่ที่ 59°C 58°C และ 56.8°C ตามลำดับ แต่ในสูตรที่ 4 ถึงสูตรที่ 9 ที่มีการใส่ Al เพิ่มขึ้นทำให้ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบนสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงแนวโน้มอุณหภูมิในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ

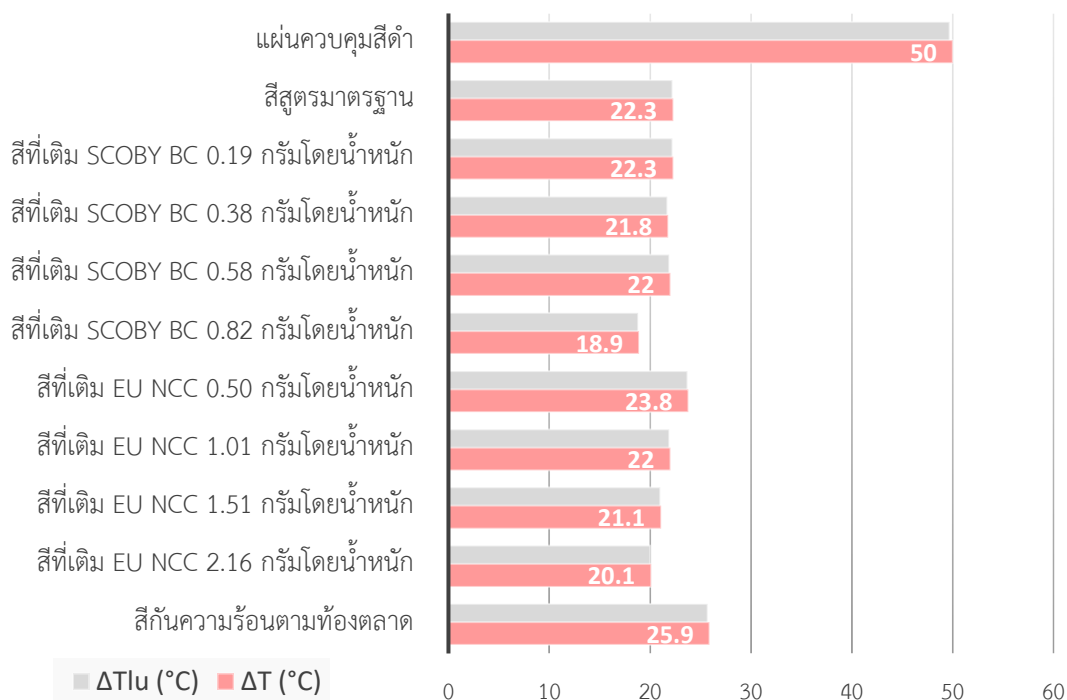
เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่เติม AL เพื่อช่วยในการสะท้อนความร้อนร่วมกับการเติม CO NCC พบว่าค่าความร้อนสะสมและค่าอุณหภูมิผิวด้านบนแผ่นทดสอบไม่ลดลงต่ำกว่าสูตรมาตรฐาน แต่กลับมีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงตัดการเติม AL ออก ส่วนการเติมนาโนเซลลูโลสที่นำมาเพิ่มประสิทธิภาพพจนวนกันความร้อนพบว่ายังมีการเติมมากขึ้นค่าความร้อนสะสมมีแนวโน้มลดลงและไม่สูงไปกว่าสูตรมาตรฐาน แต่ด้วยปริมาณเนื้อของแข็งที่ได้จากนาโนเซลลูโลสยังไม่มากพอที่จะแสดงประสิทธิภาพการเป็นฉนวนที่ดีได้ จึงยังเลือกใช้นาโนเซลลูโลสเติมในสูตรสำหรับเป็นฉนวนกันความร้อนในการทดลองนี้ แต่มีการนำนาโนเซลลูโลสจากพืชชุกคาลิปตัสซึ่งมีค่าเนื้อของแข็งที่ไม่ระเหยเท่ากับร้อยละ 2.16 กรัม และนาโนเซลลูโลสที่เตรียมจากแบคทีเรียด้วยวิธี

SCOBY ซึ่งมีค่าเนื้อของแข็งที่ไม่ระเหยเท่ากับร้อยละ 0.82 กรัม มาทดลองประสิทธิภาพการเป็นฉนวนกันความร้อนเทียบกัน

#### 4.1.3 ค่าความร้อนสะสมบนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

ตารางที่ 4.3 ค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

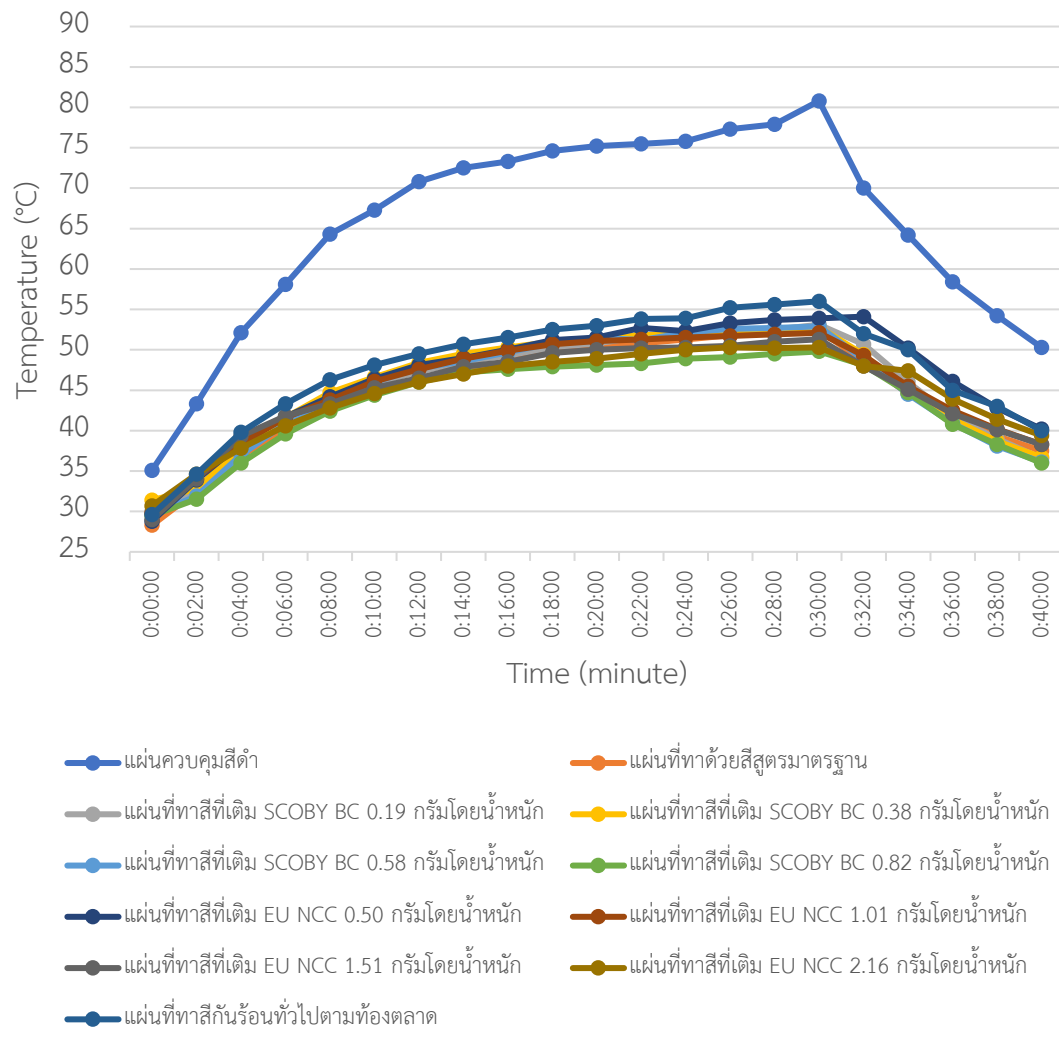
| ค่าความร้อนสะสมของฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 | Tm (°C) | Ta (°C) | $\Delta T_{lu}$ (°C) | $\Delta T_{lb}$ (°C) | $\Delta T_b$ (°C) | $\Delta T$ (°C) | อุณหภูมิผิวด้านบน (°C) | ความหนาฟิล์ม ( $\mu\text{m}$ ) |
|--|---------|---------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------|
| แผ่นควบคุมสีดำ                                 | 80.8    | 31.1    | -                    | 49.7                 | 50                | 50.0            | 82.4                   | 70.4                           |
| สีสูตรมาตรฐาน                                  | 52.5    | 30.3    | 22.2                 | -                    | 50                | 22.3            | 55.3                   | 70.3                           |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก         | 53.1    | 30.9    | 22.2                 | -                    | 50                | 22.3            | 57.2                   | 70.3                           |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก         | 52.8    | 31.1    | 21.7                 | -                    | 50                | 21.8            | 56.4                   | 70.2                           |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก         | 52.9    | 31.0    | 21.9                 | -                    | 50                | 22.0            | 57.1                   | 70.5                           |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก         | 49.8    | 31.0    | 18.8                 | -                    | 50                | 18.9            | 56.5                   | 70.3                           |
| สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก           | 53.9    | 30.2    | 23.7                 | -                    | 50                | 23.8            | 56.0                   | 70.3                           |
| สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก           | 52.1    | 30.2    | 21.9                 | -                    | 50                | 22.0            | 56.3                   | 70.3                           |
| สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก           | 51.3    | 30.3    | 21.0                 | -                    | 50                | 21.1            | 56.5                   | 70.4                           |
| สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก           | 50.3    | 30.3    | 20.0                 | -                    | 50                | 20.1            | 56.1                   | 70.5                           |
| สีกันความร้อนตามท้องตลาด                       | 56.0    | 30.3    | 25.7                 | -                    | 50                | 25.9            | 60.2                   | 72.0                           |



รูปที่ 4.7 ผลต่างอุณหภูมิของสีที่กับอุณหภูมิอากาศ ( $\Delta T_{lu}$ ) และค่าความร้อนสะสม (Heat buildup,  $\Delta T$ ) สำหรับสีที่เติม SCOBY BC เทียบกับ EU NCC

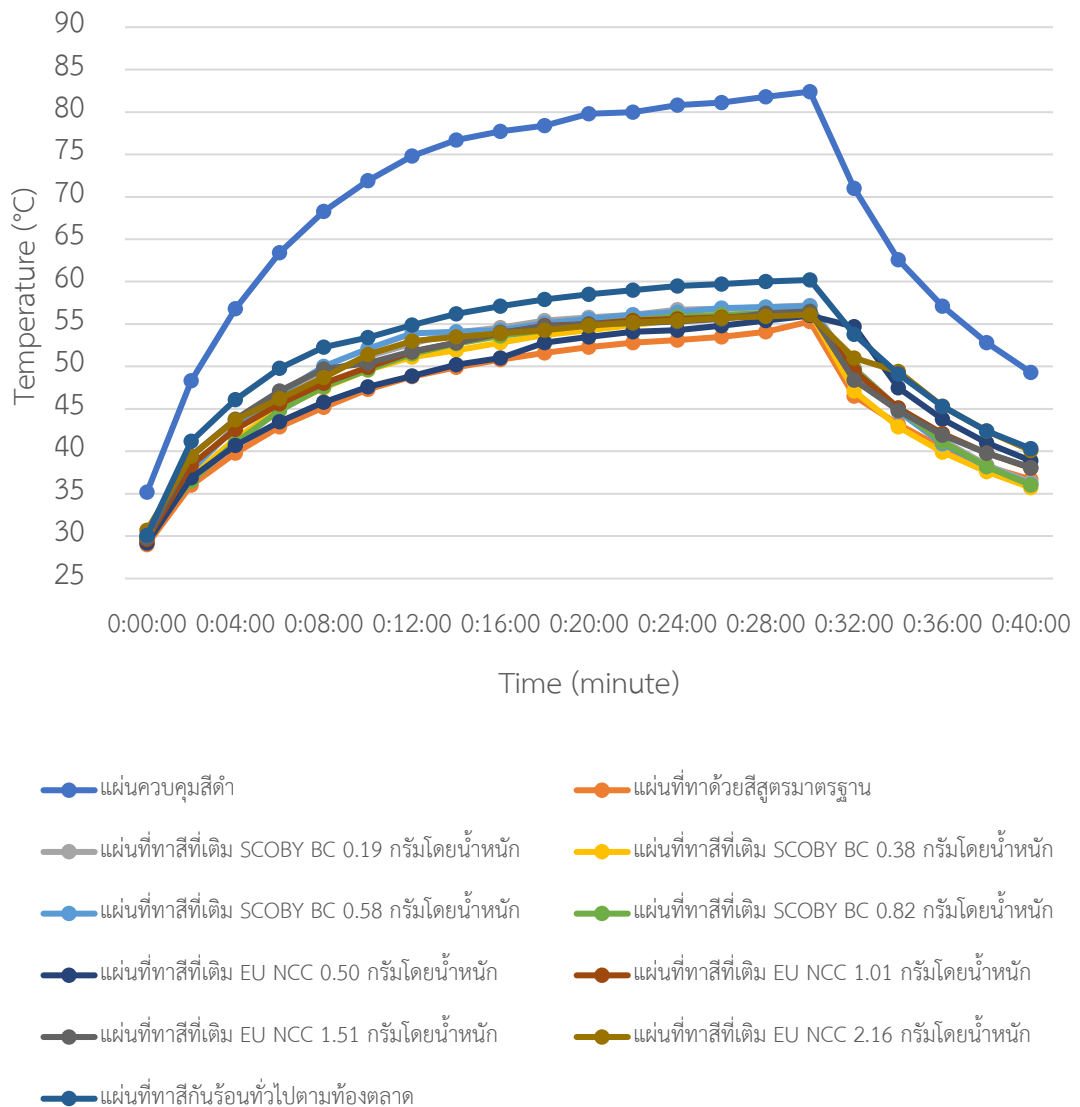
จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 ชุดที่เติม Al และ CO NCC แบบผสมกัน พบว่าแผ่นควบคุมสีดำมีค่าอุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานที่อ่านได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Tm) ที่ระยะเวลา 30 นาทีเท่ากับ  $80.8^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุด แผ่นที่ทำด้วยสีสูตรมาตรฐานเท่ากับ  $52.5^{\circ}\text{C}$  ส่วนสีที่เติม SCOBY BC ที่ 0.19 กรัม 0.38 กรัม 0.58 กรัม และ 0.82 กรัมโดยน้ำหนักมีค่า Tm เท่ากับ  $53.1^{\circ}\text{C}$   $52.8^{\circ}\text{C}$   $52.9^{\circ}\text{C}$  และ  $49.8^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อปริมาณของ SCOBY BC เพิ่มขึ้น ค่า Tm จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตรมาตรฐาน ซึ่งเป็นในแนวโน้มเดียวกับการเติมด้วย EU NCC ที่ 0.50 กรัม 1.01 กรัม 1.51 กรัม และ 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก มีค่า Tm เท่ากับ  $53.9^{\circ}\text{C}$   $52.1^{\circ}\text{C}$   $51.3^{\circ}\text{C}$  และ  $50.3^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทดลองนำสีกันความร้อนตามท้องตลาดมาทดสอบเปรียบเทียบกับพบว่า มีค่า Tm เท่ากับ  $56^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเมื่อนำค่า Tm มาคำนวณค่า  $\Delta T_{lu}$  ดังแสดงในตารางและค่าความร้อนสะสม  $\Delta T$  พบว่ายิ่งปริมาณการเติมของ SCOBY BC และ EU NCC ในสีเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนสะสม  $\Delta T$  ยิ่งมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8





รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

เมื่อพิจารณาผลทดสอบอุณหภูมิผิวด้านบนพบว่าค่าอุณหภูมิไม่แตกต่างกัน และมีค่าสูงกว่าสีสูตรมาตรฐาน 1 - 2°C ส่วนสีกันความร้อนตามท้องตลาดมีค่าอุณหภูมิที่ผิวบนสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC

จากผลทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat Built up) บนฟิล์มสีตามมาตรฐาน ASTM D4803 ชุดที่เติม SCOBY BC และ EU NCC และทดสอบอุณหภูมิผิวด้านบน พบว่าการเติม SCOBY BC 0.82 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณมากที่สุดของการเติมด้วย SCOBY BC ให้ค่าความร้อนสะสมต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 18.9°C และอุณหภูมิผิวด้านบนมีค่าเท่ากับ 56.5°C ส่วนการเติมด้วย EU NCC 2.16 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณมากที่สุดของการเติมด้วย EU NCC ให้ค่าความร้อนสะสมต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 20.1°C และอุณหภูมิผิวด้านบนมีค่าเท่ากับ 56.1°C ตามลำดับ ซึ่งการที่ SCOBY BC หรือนาโนเซลลูโลสจาก

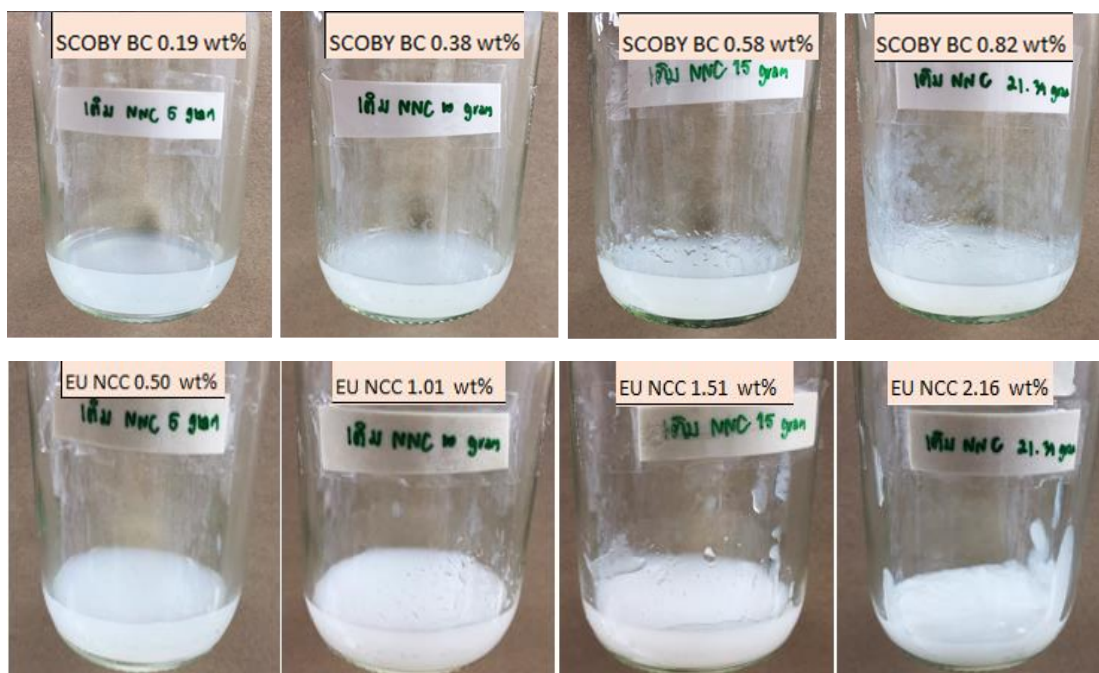
แบบที่เรียกว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนอุณหภูมิมากกว่ามากกว่า EU NCC หรือนาโนเซลลูโลสจากพืชคาบิลิปัส เป็นผลจากประสิทธิภาพของนาโนเซลลูโลสจากแบบที่เรียกว่ามีความบริสุทธิ์และมีโครงสร้าง 3 มิติที่ประกอบไปด้วยเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาดเล็กเกี่ยวพันกันอย่างแข็งแรงกว่า [7]

ทดลองหาค่าร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและด้านล่างเพื่อดูประสิทธิภาพการเป็นฉนวนเพิ่มเติม โดยคำนวณที่ระยะเวลา 20 – 30 นาทีก่อนปิดหลอดไฟ ได้ผลทดสอบดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนและด้านล่างเพื่อดูประสิทธิภาพการเป็นฉนวน

| แผ่นตัวอย่างทดสอบ                      | ผลรวมอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแผ่นทดสอบ (°C) | ผลรวมอุณหภูมิที่ผิวด้านล่างของแผ่นทดสอบ (°C) | ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C) | ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ |
|--|--|--|--------------------------------|------------------------------|
| สีสูตรมาตรฐาน                          | 321.1                                      | 309.3  | 11.8                           | 3.67                         |
| สีที่เติม SCOPY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก | 339.6                                      | 311.9  | 27.7                           | 8.16                         |
| สีที่เติม SCOPY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก | 333.4                                      | 312.7  | 20.7                           | 6.21                         |
| สีที่เติม SCOPY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก | 339.1                                      | 313.0  | 26.1                           | 7.70                         |
| สีที่เติม SCOPY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก | 335.3                                      | 293.7  | 41.6                           | 12.41                        |
| สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก   | 328.1                                      | 317.4  | 10.7                           | 3.26                         |
| สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก   | 334.1                                      | 309.6  | 24.5                           | 7.33                         |
| สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก   | 333.8                                      | 303.3  | 30.5                           | 9.14                         |
| สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก   | 333.1                                      | 299.2  | 33.9                           | 10.18                        |
| สีกันความร้อนตามท้องตลาด               | 356.9                                      | 327.5  | 29.4                           | 8.24                         |

จากการคำนวณร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิที่แสดงในตาราง พบว่าสีที่เติม SCOPY BC มีแนวโน้มความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่าสีที่เติมด้วย EU NCC และสีกันความร้อนตามท้องตลาด ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนของ SCOPY BC ที่มากกว่า



รูปที่ 4.10 ลักษณะของ SCOBY BC และ EU NCC ที่นำมาผสมกับน้ำในสูตรทดลองก่อนเติมในสี

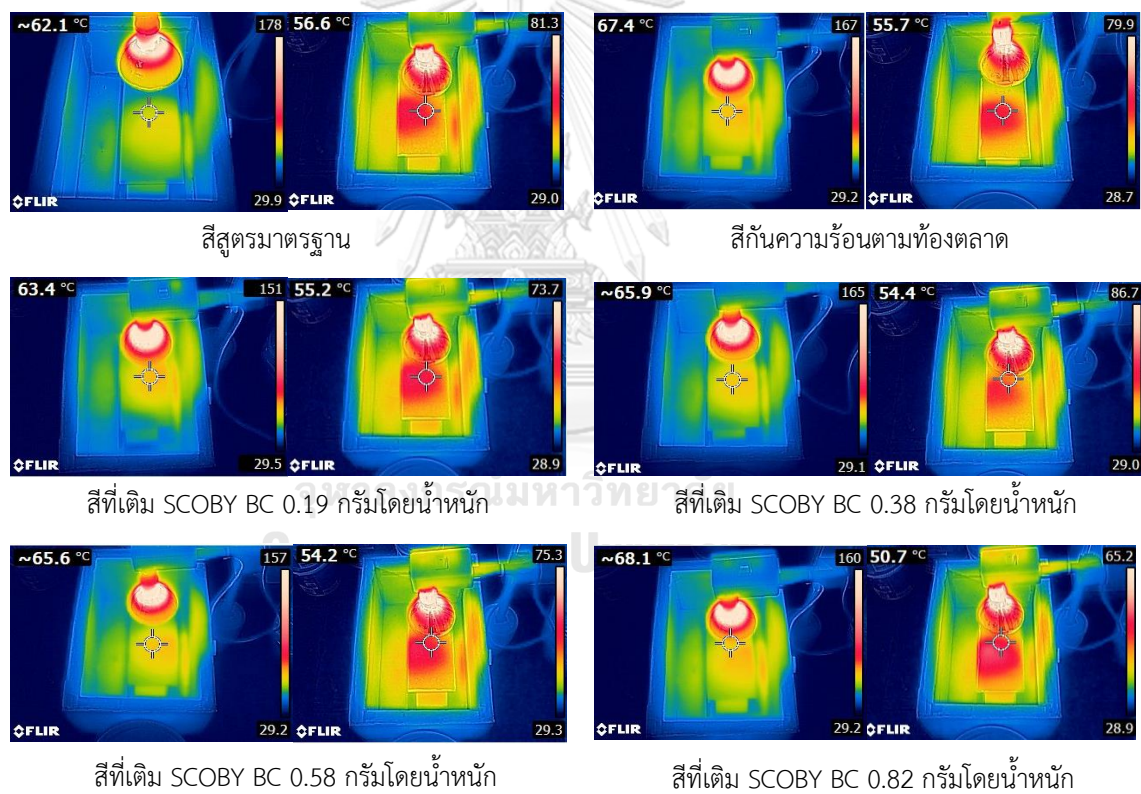
โดยลักษณะของ SCOBY BC และ EU NCC ที่นำมาผสมกับน้ำในสูตรทดลองก่อนเติมในสีแสดงดังรูปที่ 4.10 ลักษณะของ SCOBY BC เมื่อเทียบกับ EU NCC พบว่า SCOBY BC จะมีความเหลวและใสกว่า EU NCC ซึ่งข้นและหนืดกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณเนื้อของแข็ง EU NCC ที่มากกว่า

จากผลอุณหภูมิในชุดทดสอบที่ 4.1.1 และ 4.1.2 ที่ใช้ผงอะลูมิเนียมในสูตรสีเพื่อดูการสะท้อนของฟิล์มสีภายใต้สภาวะความร้อนจากหลอดไฟ พบว่าการเติมผงอะลูมิเนียมในสูตรสีที่เป็นระบบอิมัลชันไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของผงอะลูมิเนียมกระจายอยู่ด้านบนและจัดเรียงตัวเป็นระเบียบบนผิวฟิล์มได้ ส่งผลต่อค่าการสะท้อนที่ไม่ลดลง ส่วนการเติมด้วยนาโนเซลลูโลสจากฝ้ายหรือ CO NCC พบว่าปริมาณเนื้อของแข็งที่เยอะจากนาโนเซลลูโลสมีส่วนช่วยเรื่องความเป็นฉนวนของฟิล์มสี ในทางตรงข้ามหากปริมาณเนื้อของแข็งจากนาโนเซลลูโลสมีค่าน้อยมากอาจทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมนาโนเซลลูโลส ส่วนในชุดทดสอบ 4.1.3 เป็นการเปรียบเทียบนาโนเซลลูโลสที่ใช้ในสูตรสีเพื่อเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนโดยเติมแบบแทนที่น้ำหรือตัวเจือจางในสูตรเพื่อไม่ให้กระทบต่อสมบัติอื่น ๆ ของสี และเติมแทนที่น้ำในอัตราส่วนที่เท่ากัน แต่เนื่องจากนาโนเซลลูโลสจากพืชยูคาลิปตัสหรือ EU NCC และนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย SCOBY BC มีปริมาณเนื้อของแข็งไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อนำมาเติมในสูตรสีจะได้ปริมาณเนื้อของแข็งจากเซลลูโลสไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามผลทดสอบพบว่าแนวโน้มการเติมด้วย SCOBY BC ช่วยลดอุณหภูมิการสะสมความร้อนของฟิล์มสีได้ดีกว่าแม้จะมีเนื้อของแข็งที่น้อยกว่า อาจเนื่องมาจากความบริสุทธิ์ของนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรีย SCOBY BC ที่มากกว่าและมีโครงสร้างร่างแหเกี่ยวพันกันกระจาย

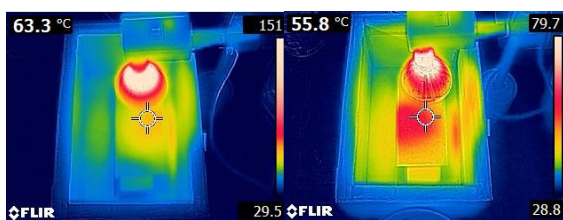
อยู่ นอกจากนี้ นานาเซลลูโลสจากพืชจะมีความเป็นเสี้ยวมากกว่าทำให้การกระจายตัวในเนื้อสีไม่ดี และส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ

#### 4.2 ความสามารถในการนำความร้อนของสี (Thermoscan)

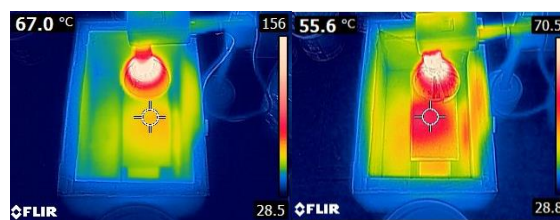
ทดสอบความเป็นฉนวนความร้อนด้วยเครื่อง Infrared Thermometer โดยวางแผ่นชิ้นงานไว้ในชุดทดสอบ Heat Built up ได้หลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) (250 วัตต์) และใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด (Thermoscan) วัดอุณหภูมิที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นทดสอบ จากนั้นนำไปคำนวณค่าสภาพการนำความร้อน ตามสมการ  $k = QL / A \Delta T$  พบว่าได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



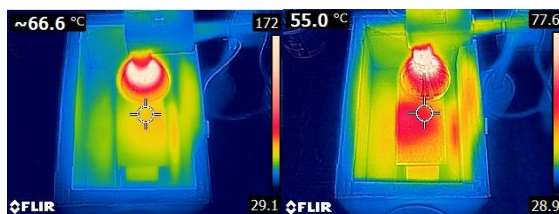
รูปที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบน (รูปซ้าย) และผิวด้านล่าง (รูปขวา) ของแผ่นทดสอบที่ตรวจวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermoscan) แหล่งกำเนิดความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) 250 วัตต์



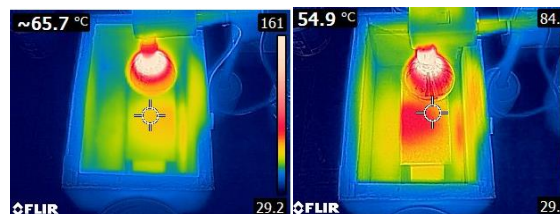
สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก



สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก



สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก



สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบน (ซ้าย) และผิวด้านล่าง (ขวา) ของแผ่นทดสอบที่ตรวจวัดจาก กล้องถ่ายภาพความร้อน (Thermoscan) แหล่งกำเนิดความร้อนอินฟราเรด (Infrared heater) 250 วัตต์

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบค่าสภาพการนำความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง

| ตัวอย่าง                               | Q<br>(W) | A<br>(m <sup>2</sup> ) | L<br>(m) | ΔT<br>(K) | สภาพการนำ<br>ความร้อน<br>(k, W/m.K) |
|--|----------|------------------------|----------|-----------|-------------------------------------|
| สีสูตรมาตรฐาน                          | 250      | 0.045                  | 0.005    | 5.5       | 5.051                               |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก | 250      | 0.045                  | 0.005    | 8.2       | 3.388                               |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก | 250      | 0.045                  | 0.005    | 11.5      | 2.415                               |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก | 250      | 0.045                  | 0.005    | 11.4      | 2.437                               |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก | 250      | 0.045                  | 0.005    | 17.4      | 1.596                               |
| สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก   | 250      | 0.045                  | 0.005    | 7.5       | 3.704                               |
| สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก   | 250      | 0.045                  | 0.005    | 11.4      | 2.437                               |
| สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก   | 250      | 0.045                  | 0.005    | 11.6      | 2.395                               |
| สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก   | 250      | 0.045                  | 0.005    | 10.8      | 2.572                               |
| สีกันความร้อนตามท้องตลาด               | 250      | 0.045                  | 0.005    | 11.7      | 2.374                               |

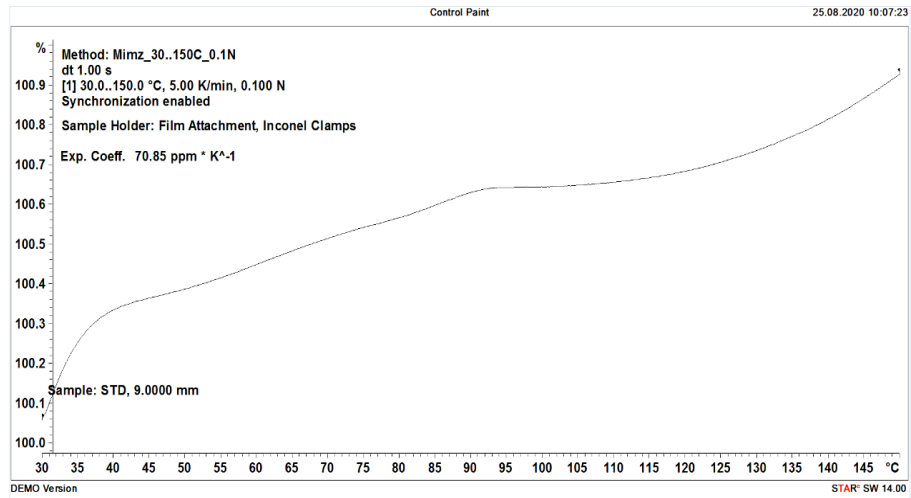
จากผลทดสอบตารางที่ 4.5 พบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสที่เป็นวัสดุธรรมชาติซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยมีค่าประมาณ 0.04 – 0.05 W/(m.K). [6] เมื่อเติมลงในสีทำให้แนวโน้มของค่าสภาพการนำความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับสีสูตรมาตรฐานที่ไม่ได้เติมด้วยนาโนเซลลูโลส และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง SCOBY BC กับ EU NCC พบว่า SCOBY BC มีค่าสภาพการนำความร้อนที่ต่ำกว่า EU NCC โดย SCOBY BC มีค่า 1.596 (W/m.K) ส่วน EU NCC 2.572 (W/m.K) และสีกันร้อนตามท้องตลาดมีค่า 2.374 (W/m.K)

#### 4.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis

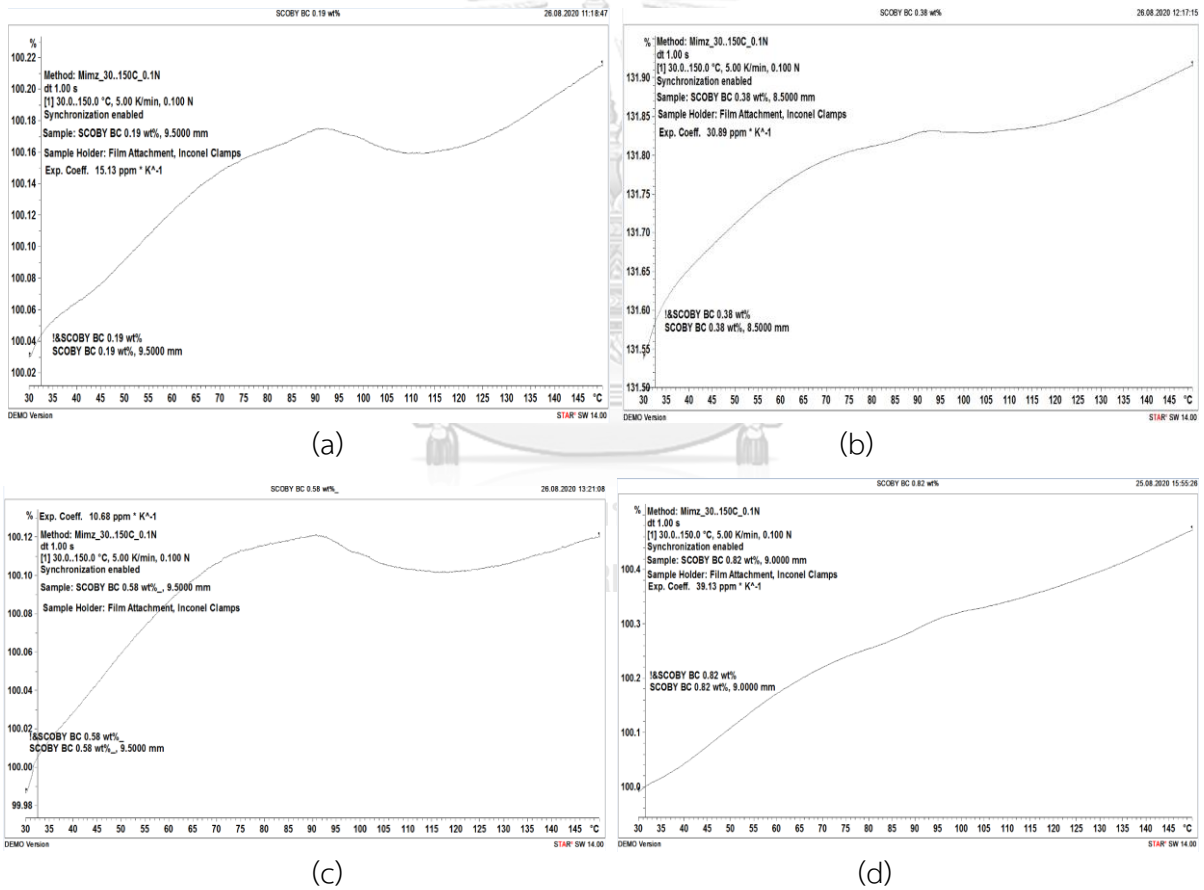
การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) เพื่อดูการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์มสีสภาวะที่ทดสอบคืออุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้าย 150 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลวิน/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และน้ำหนักที่ใช้ 0.1 N ระยะเวลาที่ทดสอบขึ้นงานประมาณ 25 นาทีต่อ 1 ขึ้นงาน และนำค่าที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน แสดงค่าดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของตัวอย่างสีที่ผสม SCOBY BC หรือ EU NCC

| ตัวอย่างขึ้นงานที่ทดสอบ                | ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (CTE, ppm/K) |
|--|---|
| สีสูตรมาตรฐาน                          | 70.85   |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก | 15.13   |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก | 30.89   |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก | 10.68   |
| สีที่เติม SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก | 39.13   |
| สีที่เติม EU NCC 0.50 กรัมโดยน้ำหนัก   | 74.12   |
| สีที่เติม EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก   | 78.52   |
| สีที่เติม EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก   | 98.85   |
| สีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก   | 79.16   |
| สีกันความร้อนตามท้องตลาด               | ไม่ได้ทดสอบเนื่องจากฟิล์มเป็นชนิดยืดหยุ่น         |

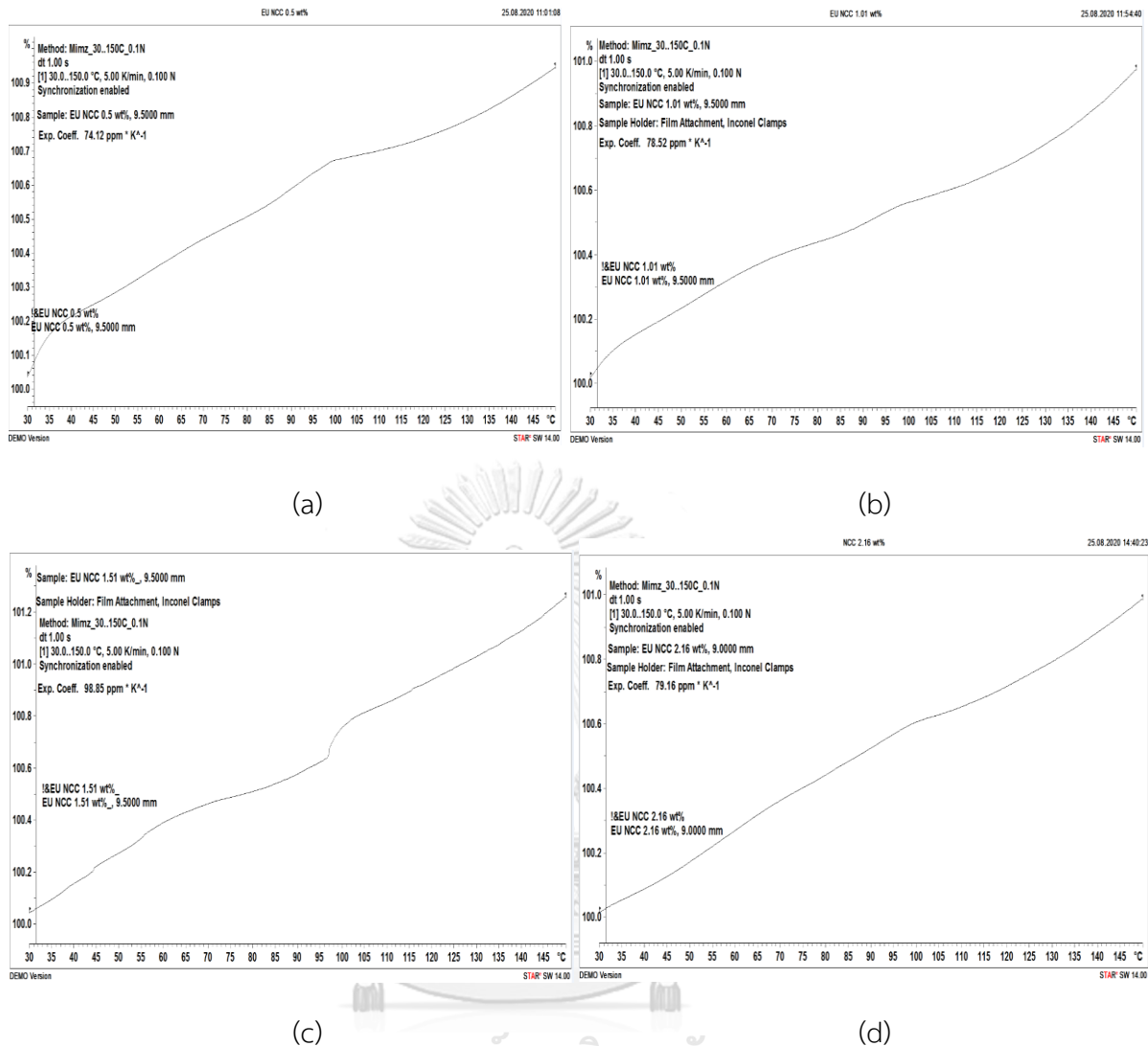


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน สีสูตรมาตรฐาน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานสีที่เติม (a) SCOBY BC 0.19 กรัมโดยน้ำหนัก (b) SCOBY BC 0.38 กรัมโดยน้ำหนัก (c) SCOBY BC 0.58 กรัมโดยน้ำหนัก และ (d) SCOBY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก



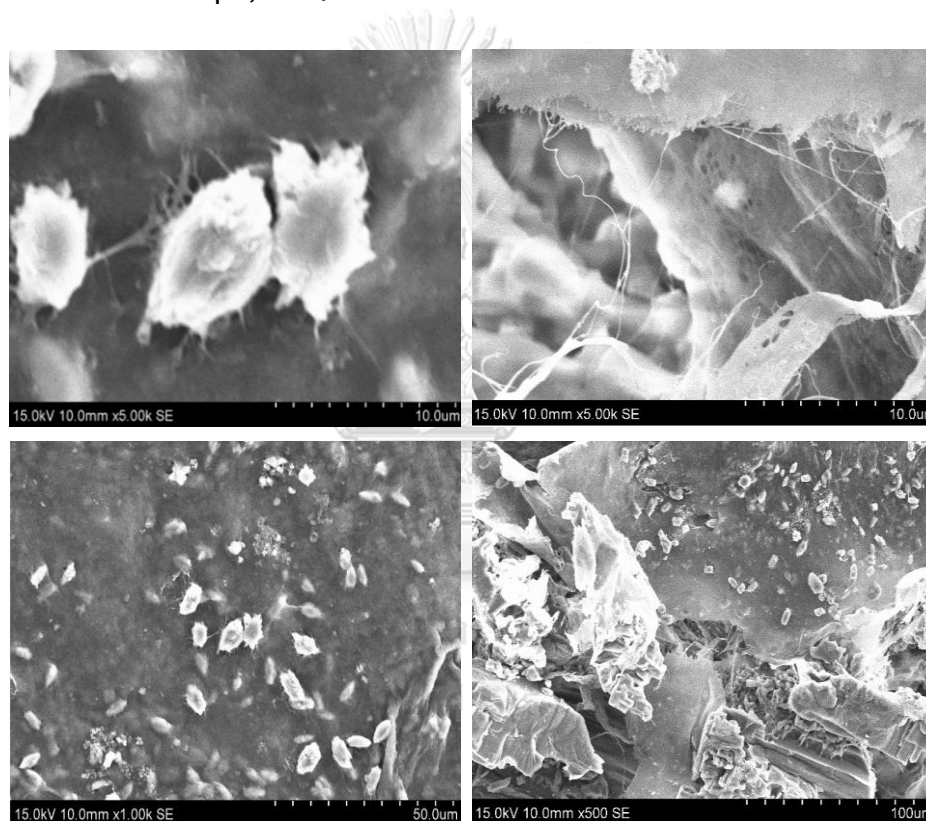


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานสีที่เติม (a) EU NCC 0.50 กรัมโดย น้ำหนัก (b) EU NCC 1.01 กรัมโดยน้ำหนัก (c) EU NCC 1.51 กรัมโดยน้ำหนัก และ (d) EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก

จากผลทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนและกราฟการขยายตัวทางความร้อนพบว่าสีที่เติม SCOPY BC มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าสูตรมาตรฐานและต่ำกว่าสีที่เติมด้วย EU NCC โดยหนึ่งในสมบัติอีกประการของนาโนเซลลูโลสคือการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ จึงนิยมนำไปทำส่วนประกอบของชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กในรูปแบบของฟิล์มนาโนเซลลูโลสหรือ nanocellulose paper เพื่อลดความเค้นทางความร้อนของพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างนาโนเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน (anisotropic) โดยเฉพาะนาโนเซลลูโลสแบบเส้นใย (CNF) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ ในทางตรงข้ามถ้าค่า

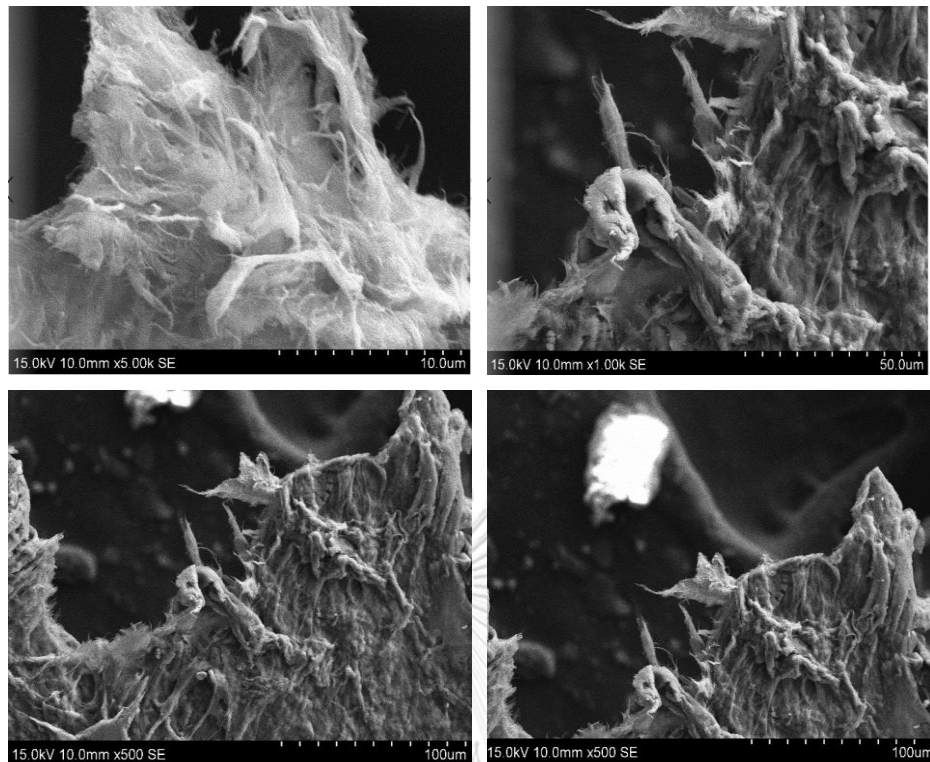
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีค่าเพิ่มอาจเกิดจากนาโนเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน [26] ซึ่งอาจเกิดจากวิธีการเตรียมสีที่มีการปั่นกวนด้วยใบพัดให้เข้ากัน ทำให้ส่วนผสมต่าง ๆ และนาโนเซลลูโลสกระจายตัวอยู่ในเนื้อสีและเมื่อใสในปริมาณเพิ่มขึ้นจึงเห็นผลชัดขึ้น เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบจึงมีค่าสูง ส่วนสีที่เติมด้วย SCOBY BC มีค่าต่ำกว่าแต่ไม่เกาะกลุ่มกันอาจเกิดจากการกระจายตัวของนาโนเซลลูโลสในฟิล์มสี

#### 4.4 วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มสีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



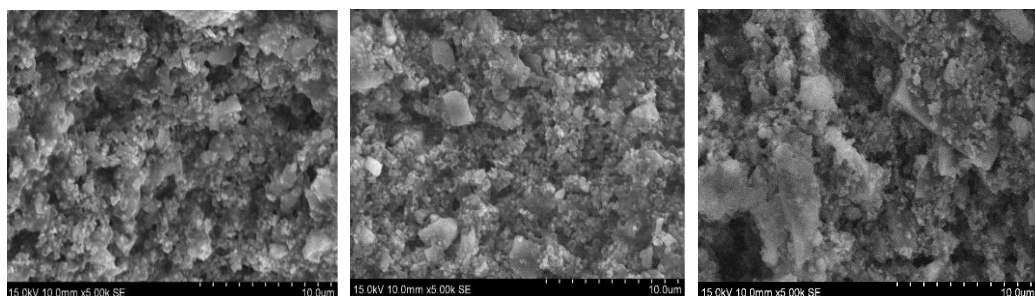
รูปที่ 4.15 โครงสร้างของ SCOBY BC จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพแสดงโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียโดยเตรียมผ่านวิธี SCOBY พบว่าลักษณะของนาโนเซลลูโลสที่เห็นเป็นรูปท่อนหรือรูปกลมรีกระจายตัวอยู่ มองเห็นรูพรุนอยู่ในโครงสร้าง บางตำแหน่งมีโครงสร้างร่างแหที่เกาะเกี่ยวกัน ซึ่งเป็นลักษณะของนาโนเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรีย



รูปที่ 4.16 โครงสร้างของ EU NCC จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากรูปที่ 4.16 แสดงโครงสร้างของนาโนเซลลูโลสจากพืชยูคาลิปตัสที่เป็นเส้นใยและนิยมนเตรียมผ่านกระบวนการ TEMPO oxidation มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ส่วนรูปที่ 4.17 แสดงฟิล์มสีสูตรมาตรฐาน สีที่เติม SCOPY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก และฟิล์มสีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่ามองไม่ค่อยเห็นอนุภาคของนาโนเซลลูโลส ซึ่งอาจมาจากการบดบั้งของสารยึดและผงสีที่ใช้ในสูตร



รูปที่ 4.17 ฟิล์มสีสูตรมาตรฐาน (ซ้าย) สีที่เติม SCOPY BC 0.82 กรัมโดยน้ำหนัก (กลาง) และฟิล์มสีที่เติม EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก (ขวา)

#### 4.5 ผลทดสอบคุณภาพของสี

ตารางที่ 4.7 เกณฑ์ทดสอบคุณภาพของสี

| หัวข้อคุณภาพที่ทดสอบ                    | มาตรฐานการทดสอบ  | เกณฑ์ในการทดสอบ   |
|---|------------------|---|
| ความละเอียดของเนื้อสี                   | มอก. 285 เล่ม 8  | $\leq 60 \mu\text{m}$   |
| กำลังซ่อนแสง                            | มอก. 285 เล่ม 16 | $\geq 85$ (ร้อยละ)  |
| เสถียรภาพต่อการเก็บ                     | มอก. 285 เล่ม 12 | สีต้องไม่ขึ้นแข็ง จับตัวเป็นก้อน เป็นวุ้น เป็นเม็ด เป็นวุ้นเหนียว มีกลิ่นที่เกิดจากการบูดเน่า หรือก๊าซเกิดขึ้น เมื่อคนจนทั่วต้องไม่นอนกัน หรือแยกชั้น   |
| เสถียรภาพต่อการเก็บที่อุณหภูมิสูง       | มอก. 285 เล่ม 12 | สีต้องไม่ขึ้นแข็ง จับตัวเป็นก้อน เป็นวุ้น เป็นเม็ด เป็นวุ้นเหนียว มีกลิ่นที่เกิดจากการบูดเน่า หรือก๊าซเกิดขึ้น เมื่อคนจนทั่วต้องไม่นอนกัน หรือแยกชั้น   |
| ความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ              | ASTM G154        | ฟิล์มต้องไม่เกิดการกัดกร่อน ร้าว ล่อน เป็นเกล็ดหรือพองและพื้นผิวต้องอยู่ในสภาพที่เคลือบสีทับได้ระหว่างการผึ่งฟิล์มของสีต้องยังคงอยู่ในสภาพปกติ ไม่เกิดการเป็นฝุ่นและเปลี่ยนสีไปจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรดสเกลระดับ 3 |
| ความทนน้ำ                               | มอก. 285 เล่ม 22 | ฟิล์ม ต้องไม่พอง ย่น แตก หลุดล่อน หรือมีข้อบกพร่องอื่น ๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีต่างไปจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรดสเกลระดับ 4   |
| ความทนด่าง                              | มอก. 285 เล่ม 23 | ฟิล์ม ต้องไม่พอง ย่น แตก หลุดล่อน หรือมีข้อบกพร่องอื่น ๆ และเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีต่างไปจากเดิมได้ไม่น้อยกว่าเกรดสเกลระดับ 4   |
| ความทนทานต่อการขัดถู                    | ASTM D2486       | ฟิล์มของสีต้องไม่แตก หลุดล่อน หรือสึกจนถึงพื้นผิวชั้นล่างเป็นแนวยาวเกิน 10 มม. ตามทิศทางการถู   |
| ความชื้นของสี                           | มอก. 285 เล่ม 14 | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ความหนาแน่นของสี                        | ASTM D1475       | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ของแข็งที่ไม่ระเหย                      | ASTM D7232       | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH)                   | ASTM E70         | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ทดสอบเฉดสี                              | CIE Lab          | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ความเงาของฟิล์มสี                       | มอก. 285 เล่ม 17 | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้นตั้งมา  |
| ความทนทานต่อการเกาะฝุ่น                 | ASTM D3719       | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้น (เกรดสเกลระดับ 4)  |
| ความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศตามสภาวะจริง | ASTM D7879       | ตามเกณฑ์ที่ผลิตภัณฑ์นั้น (เกรดสเกลระดับ 4)  |



ผลทดสอบคุณภาพของสีที่เติมด้วยนาโนเซลลูโลสทั้ง SCOBY BC และ EU NCC พบว่าความละเอียดของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนกำลังซ่อนแสงของฟิล์มสีลดลงตามปริมาณของนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นแต่ยังผ่านเกณฑ์ที่กำหนด เสถียรภาพต่อการเก็บของสีที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงผ่านเกณฑ์กำหนด โดยสีมีสภาพปกติ ไม่ข้นเหนียว ไม่แข็งตัว ความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศ ความทนน้ำและความทนต่างของฟิล์มสีผ่านเกณฑ์กำหนด ความทนทานต่อการขัดถูพบว่ามีค่าร้อยละการขัดถูลดลงเมื่อเติมด้วย EU NCC ส่วนเมื่อเติมด้วย SCOBY BC พบว่าร้อยละการขัดถูลดลงแต่น้อยกว่าการเติมด้วย EU NCC เนื่องจาก SCOBY BC มีโครงสร้างที่มีส่วนเป็นร่างแหอยู่ด้วย จึงมีความแข็งแรงมากกว่า EU NCC ส่วนความชื้นของสีพบว่าเมื่อเติมนาโนเซลลูโลสทั้ง 2 แบบส่งผลให้ความชื้นของสีเพิ่มขึ้น ของแข็งที่ไม่ระเหยของสีและความเป็นกรดต่างของสีเมื่อเติมด้วย EU NCC มีค่าใกล้เคียงกับสูตรสีมาตรฐาน แต่เมื่อเติมด้วย SCOBY BC พบว่ามีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เหนือสีมีสีขาวตามเกณฑ์กำหนด ความเงาที่มุม  $60^\circ$  ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนความเงาที่มุม  $85^\circ$  เมื่อเติมด้วย EU NCC มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด การทดสอบความทนทานต่อการเกาะฝุ่นและ ความทนทานต่อสภาพลมฟ้าอากาศตามสภาวะจริงค่าผ่านเกณฑ์กำหนด

โดยสรุปผลการเติมนาโนเซลลูโลสจากพืชและจากแบคทีเรียในสีน้ำทาอาคารและนำมาทดสอบคุณภาพพบว่านาโนเซลลูโลสส่งผลต่อความชื้นสีที่มากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากนาโนเซลลูโลสที่นำมาเติมอยู่ในรูปของแข็งที่กระจายอยู่ในของเหลวและมีลักษณะที่ขึ้นมากกว่าน้ำ จึงส่งผลให้ค่าความชื้นสีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การปิดบังพื้นผิวที่ลดลงอาจเกิดจากการกระจายตัวของนาโนเซลลูโลสที่ไม่สม่ำเสมอในเนื้อสี และความเงาที่มุม  $85^\circ$  มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากลักษณะความพรุนของนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อความเรียบของฟิล์ม ความทนทานต่อการขัดถูแนวโน้มลดลงเห็นได้ชัดเมื่อเติม EU NCC อาจมาจากการความเป็นเส้นใยและการจัดเรียงตัวที่กระจายไม่สม่ำเสมอ แต่สมบัติอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ผลของการเติมผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์พัฒนาสีน้ำทาภายนอกที่มีสมบัติสะท้อนความร้อนและเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้ผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส ซึ่งพบว่า การเติมผงอะลูมิเนียมและนาโนเซลลูโลส ที่เติมในสีส่งผลดังนี้

1. การสะท้อนความร้อนโดยใช้ผงอะลูมิเนียมเติมในสีปริมาณร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 กรัมโดยน้ำหนัก และทดสอบค่าความร้อนสะสมและค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านบนร่วมกับการใช้นาโนเซลลูโลส พบว่าไม่ทำให้ค่าการสะท้อนของฟิล์มสีภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตลดลง ในทางตรงกันข้ามสีที่เติมด้วยผงอะลูมิเนียมในปริมาณมากขึ้นที่ปริมาณร้อยละ 1.5 กรัมโดยน้ำหนัก ทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านบนของชิ้นงานที่ได้รับความร้อนโดยตรงมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของผงอะลูมิเนียมในระบบสีนี้ อิมัลชันไม่ได้จัดเรียงตัวในแนวขนานกับฟิล์มสีเหมือนโลหะอะลูมิเนียมที่ผิวมีความเงาและเรียบ รวมทั้งอะลูมิเนียมมีค่าการนำความร้อนในตัวเอง เมื่อมีผงอะลูมิเนียมกระจายอยู่ในฟิล์มสีอาจส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสูงกว่าสูตรมาตรฐานที่ไม่ได้เติม
2. การเติมนาโนเซลลูโลสลงในสีพบว่าค่าเนื้อของแข็งที่ไม่ระเหย และชนิดของนาโนเซลลูโลส ส่งผลต่อค่าความร้อนสะสมของฟิล์มสี ซึ่งชนิดและปริมาณของนาโนเซลลูโลสที่เติมในสีคือ ชนิดที่ได้จากแบคทีเรีย ได้แก่ SCOPY BC 0.19 กรัม SCOPY BC 0.38 กรัม SCOPY BC 0.58 กรัม และ SCOPY BC 0.82 กรัม โดยน้ำหนัก ส่วนชนิดที่ได้จากพืชนาโนเซลลูโลสคือ EU NCC 0.50 กรัม EU NCC 0.50 กรัม EU NCC 1.01 กรัม EU NCC 1.51 กรัม และ EU NCC 2.16 กรัมโดยน้ำหนัก โดยนาโนเซลลูโลสจากแบคทีเรียที่เตรียมผ่านวิธี SCOPY จะให้ผลทดสอบความร้อนสะสมที่ฟิล์มสีน้อยกว่านาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากพืชยูคาลิปตัสซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยมากกว่า นอกจากนี้ผลทดสอบความสามารถในการนำความร้อนของสี (Thermoscan) เพื่อหาค่าสภาพการนำความร้อนของชิ้นงานตัวอย่าง (W/m.K) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง Thermomechanical Analysis (TMA) ของสีที่เติมด้วย SCOPY BC ยังให้ประสิทธิภาพดีกว่าและใช้ปริมาณที่น้อยกว่า

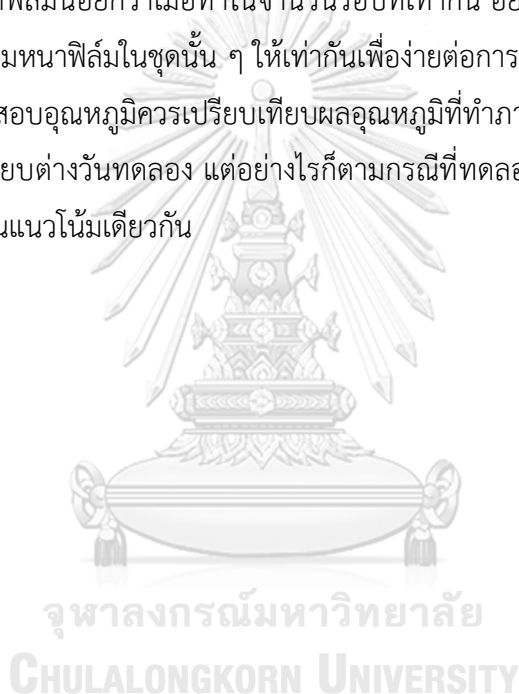
## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีที่ทำให้ผงอะลูมิเนียมมีการจัดเรียงตัวขนานกับฟิล์มสีเมื่อฟิล์มสีแห้งตัว เพื่อเพิ่มสมบัติการสะท้อนความร้อนของฟิล์มสี หรือหาผงอะลูมิเนียมชนิดพิเศษที่สามารถเข้ากับระบบของสีน้ำอิมัลชันได้

2. การเติมนาโนเซลลูโลสควรวหาชนิดและปริมาณของแข็งที่ใกล้เคียงกันเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบสมบัติฉนวนความร้อน

3. ความหนาฟิล์มที่ทดสอบขึ้นกับสีแต่ละรุ่นและการดูดซึมของพื้นผิวแต่ละชนิด เช่น แผ่นกระเบื้องมีความพรุนจึงมีการดูดซับสีในปริมาณค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับพื้นผิวอื่นที่ดูดซับน้อยกว่า อาจทำให้ได้ความหนาฟิล์มน้อยกว่าเมื่อทำในจำนวนรอบที่เท่ากัน อย่างไรก็ตามในการทดสอบแต่ละครั้งจึงควรควบคุมความหนาฟิล์มในชุดนั้น ๆ ให้เท่ากันเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบ

4. ในการทดสอบอุณหภูมิควรเปรียบเทียบผลอุณหภูมิที่ทำภายในชุดเดียวกันหรือวันเดียวกัน จะดีกว่าการเปรียบเทียบต่างวันทดลอง แต่อย่างไรก็ตามกรณีที่ทดลองต่างวันถึงแม้ว่าค่าอุณหภูมิจะไม่ได้ไม่เท่ากันแต่ควรเป็นแนวโน้มเดียวกัน





## บรรณานุกรม

1. กรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย. กองพัฒนาอุตุนิยมหาวิทยาลัย. ศูนย์ภูมิอากาศ, ความผันแปรและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2562. 2563.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน, ระบบกรอบอาคาร, ใน ตำราชุดฝึกอบรมหลักสูตร "ผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (อาคาร)". 2553, สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน: กรุงเทพฯ.
3. สุนทร บุญญาธิการ, การใช้ฉนวน. เอกสารเผยแพร่การออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงาน: สกอ/65/9-42/วช/TT02. 2543, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงาน.
4. คณะอนุกรรมการการพิจารณาความต้องการการใช้ไฟฟ้า การพิจารณาความต้องการในการใช้ไฟฟ้า. 2560.
5. พัฒนา รักความสุข, จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, และ วัลลภ หาญณรงค์ชัย, สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ, 2550(30): น. 591-600.
6. Muthuraj, R., et al., *Applications of Polysaccharide and Protein Based Aerogels in Thermal Insulation*. 2018. p. 261-294.
7. Gan, P.G., et al., *Thermal properties of nanocellulose-reinforced composites: A review*. Journal of Applied Polymer Science, 2020. 137(11): p. 48544.
8. อรุษา สรวารี, สารเคลือบผิว : สี วาร์นิช และแล็กเกอร์. 2537, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. Jesionowski, T. and F. Ciesielczyk, *Pigment, Inorganic*, in *Encyclopedia of Color Science and Technology*, M.R. Luo, Editor. 2016, Springer New York: New York, NY. p. 1040-1058.
10. Yebra, D.M. and C.E. Weinell, 13 - *Key issues in the formulation of marine antifouling paints*, in *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*, C. Hellio and D. Yebra, Editors. 2009, Woodhead Publishing. p. 308-333.
11. Scholz, W., *Coatings Additives*. 2006, Munich, Germany.
12. ชาญนลิน วิญญูประสิทธิ์, ยุราพร สหสกุล, และ น้ำผึ้ง รุ่งเรือง, นาโนเซลลูโลส: การประยุกต์ใช้ในอาหารและความปลอดภัยอาหาร. วารสารพิษวิทยาไทย, 2560. 32(1): น. 67-79.
13. Zhou, J. and Y.-L. Hsieh, *Nanocellulose aerogel-based porous coaxial fibers for thermal insulation*. Nano Energy, 2020. 68: p. 104305.
14. Harris, R.M., *Coloring Technology for Plastics*. Plastics Design Library. 1999, Norwich, NY: William Andrew.

15. S.P. Morell and Company, *Metallic Pigments – The Science of Optics*, in *back2basics*. Armonk, NY.
16. Coser, E., et al., *Development of paints with infrared radiation reflective properties*. *Polímeros*, 2015. 25: p. 305-310.
17. Kennedy, J., J. Futter, and J. Manning, *A review of near infrared reflectance properties of metal oxide nanostructures*. *GNS Science Report*, 2013: p. 20 p.
18. Atigyanun, S., et al., *Effective Radiative Cooling by Paint-Format Microsphere-Based Photonic Random Media*. *ACS Photonics*, 2018. 5(4): p. 1181-1187.
19. Ianoş, R., et al., *Combustion synthesis of pink chromium-doped alumina with excellent near-infrared reflective properties*. *Ceramics International*, 2017. 43(2): p. 2568-2572.
20. Hallenstvet, M., et al., *Heat reflective coatings of aluminium*. *ATB Metallurgie*, 2006. 45.
21. Jenkins, R., et al., *Solid state additive manufacture of highly-reflective Al coatings using cold spray*. *Optics & Laser Technology*, 2019. 115: p. 251-256.
22. Nigrawal, A., S.C. Prajapati, and N. Chand, *Mechanical and thermal properties of nano-cellulose obtained from sisal fiber reinforced polyvinyl alcohol (PVA) bio-composites*. *J Sci Res Rev*, 2012. 1: p. 020-025.
23. Wang, P., et al., *Strong ultralight foams based on nanocrystalline cellulose for high-performance insulation*. *Carbohydrate Polymers*, 2019. 218: p. 103-111.
24. ASTM International, *Standard Test Method for Predicting Heat Buildup in PVC Building Products*. 2018: West Conshohocken, PA.
25. Kennedy, J., J. Futter, and J. Manning, *A review of near infrared reflectance properties of metal oxide nanostructures*. 2013. 20 p.
26. Hirano, T., et al., *Anisotropic Thermal Expansion of Transparent Cellulose Nanopapers*. *Frontiers in Chemistry*, 2020. 8(68).

## ประวัติผู้เขียน

|                   |  |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล         | ธนิกานต์ ชุนภักดี  |
| วัน เดือน ปี เกิด | 7 มิถุนายน 2534  |
| สถานที่เกิด       | อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี  |
| วุฒิการศึกษา      | วิทยาศาสตรบัณฑิต เคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า<br>คุณทหารลาดกระบัง                                   |
| ที่อยู่ปัจจุบัน   | 59/5 ตำบลนาเริก อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี  |
| ผลงานตีพิมพ์      | "IMPROVING THERMAL INSULATION PROPERTY OF WATER-BASED<br>PAINTS BY NANOCELLULOSE"<br>Petromat and PPC Symposium 2020 |



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY