



การใช้วัสดุนาโนร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อการออกแบบพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสำหรับวัสดุก่อสร้างที่เป็น  
กระเบื้องโดยวิธีพ่นเคลือบ



โดย  
นายธีรพัฒน์ ชันใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การใช้วัสดุนาโนร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อการออกแบบพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสำหรับวัสดุก่อสร้าง  
ที่เป็นกระเบื้องโดยวิธีพ่นเคลือบ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

COMPOSITE NANOMATERIALS AND POLYMERS TO PREPARATION OF  
HYDROPHOBIC SURFACE FOR BUILDING MATERIALS BY SPRAY COATING  
METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (CHEMICAL STUDIES)  
Department of CHEMISTRY  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การใช้วัสดุนาโนร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อการออกแบบพื้นผิวที่ไม่ชอบ  
น้ำสำหรับวัสดุก่อสร้างที่เป็นกระเบื้องโดยวิธีพ่นเคลือบ  
โดย ธีรพัฒน์ ชันใจ  
สาขาวิชา เคมีศึกษา แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร. สุธินี เกิดเทพ

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

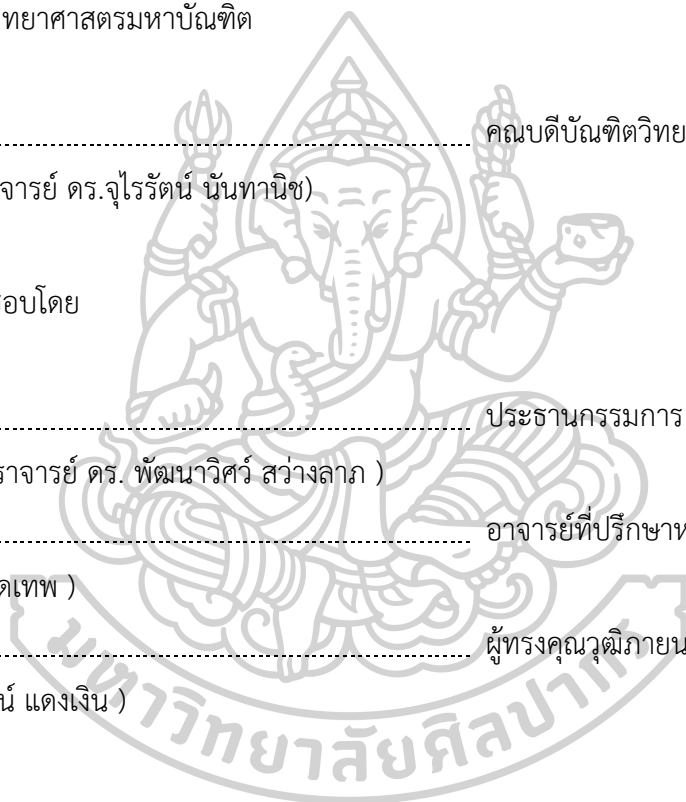
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัฒนวิศว์ สว่างลาภ )

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร. สุธินี เกิดเทพ )

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร. รฐวรธรณ์ แดงเงิน )



60301203 : เคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พระมหาธาตุเจดีย์, แผ่นโมเสก, อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์, พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ

นาย ธีรพัฒน์ ชันใจ: การใช้วัสดุนาโนร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อการออกแบบพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ สำหรับวัสดุก่อสร้างที่เป็นกระเบื้องโดยวิธีพ่นเคลือบ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ดร. สุธินี เกิดเทพ

งานวิจัยนี้ได้สำรวจและวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นบนพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพภูมิสิริ ณ ดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ นอกจากนี้วัสดุเคลือบผิวถูกสังเคราะห์เพื่อป้องกันคราบไม่พึงประสงค์และตะไคร่บนผิวของพระมหาเจดีย์ด้วย แผ่นโมเสกที่มีสี 5 ชนิดบนพื้นผิวของพระมหาเจดีย์ คือ ทอง เทาเข้ม เทาอ่อน น้ำตาลและม่วง นอกจากนี้พื้นผิวของโมเสกแสดงความชอบน้ำโดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำน้อยกว่า 90 องศา นอกจากนี้ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของคราบไม่พึงประสงค์บนผิวของพระมหาเจดีย์ คือ แคลเซียม และน้ำฝนตัวอย่างชี้ให้เห็นถึงปริมาณของแคลเซียมไอออนประมาณ 10.125 ppm โดยมีความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7 ซึ่งเป็นลักษณะของน้ำฝนธรรมชาติ ดังนั้นปัญหาหลักของคราบไม่พึงประสงค์ภายใต้สภาวะความชื้นสูงบนดอยอินทนนท์ คือ การผุกร่อนของปูนยาแนวระหว่างแผ่นโมเสกเป็นคราบหินปูนและการเจริญเติบโตของตะไคร่บนพื้นผิวพระมหาเจดีย์

องค์ประกอบที่เหมาะสมของวัสดุเคลือบพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำประกอบด้วยพอลิยูรีเทนและซิลิกาฟุ่มไม่ชอบน้ำเตรียมผ่านวิธีการเคลือบที่ดีที่สุดคือ วิธีการพ่นเคลือบ 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกด้วยพอลิยูรีเทนบนพื้นผิวของแผ่นโมเสกเป็นชั้นเคลือบพื้นล่าง หลังจากนั้นสารละลายซิลิกาฟุ่มไม่ชอบน้ำ (ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 10-12 phr) จะถูกพ่นทับไปที่บนชั้นของพอลิยูรีเทนเป็นการเคลือบชั้นบน พื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน/ซิลิกาฟุ่มไม่ชอบน้ำที่เตรียมใหม่นี้ได้ถูกพบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่ามากกว่า 90 องศาซึ่งแสดงคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งสำนักงานวิทยาของพื้นผิวได้ชี้ให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวหลังจากการเคลือบ

นอกจากนี้ความคงทนของการเคลือบบนพื้นผิวโม่เสกได้ถูกทดสอบการยึดติดและทดสอบการขัดถูภายใต้สภาพอากาศแบบเร่งสภาวะเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ของประเทศไทย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเคลือบนี้มีความคงทนและสามารถป้องกันการเกิดตะไคร่น้ำได้ จากผลการวิจัยนี้พบว่าวัสดุเคลือบผิวพอลิยูรีเทน/ซิลิกาฟุ่มไม่ชอบน้ำแสดงถึงศักยภาพในการประยุกต์สำหรับเคลือบผิวบนพื้นวัสดุอื่นได้เพื่อเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสำหรับการป้องกันคราบไม่พึงประสงค์และตะไคร่น้ำ



60301203 : Major (CHEMICAL STUDIES)

Keyword : Phra Maha Dhatu, Mosaic, Doi Inthanon National Park, Hydrophobic surface

MR. TEERAPAT KHANJAI : COMPOSITE NANOMATERIALS AND POLYMERS TO PREPARATION OF HYDROPHOBIC SURFACE FOR BUILDING MATERIALS BY SPRAY COATING METHOD THESIS ADVISOR : SUTINEE GIRDTHEP, Ph.D.

This work has been determined the cause of stains that occur on the Phra Maha Dhatu Nabhamethanidol and Phra Maha Dhatu Nabhapolbhumisiri, Doi Inthanon, Chiang Mai, Thailand. Moreover, the coating surface materials were synthesized to protect the stains and algae on pagoda surface. Five colors of mosaic on pagoda surface were gold, dark gray, light gray, brown and purple. In addition, the mosaics surface showed a hydrophilicity with water contact angle less than 90 degrees. Moreover, the main elements of stains on pagoda surface was calcium. The rain water sample indicated amount of calcium ion about 10.125 ppm with 7 of pH which was a natural rain character. Thus, the main problem of stains under high moisture condition at Doi Inthanon were degenerating of cement grout between mosaics as a limestone and algae growth on pagoda surface.

The optimal composition of hydrophobic surface coating materials contained polyurethane (PU) and hydrophobic fumed silica (HFS). The best method to coating as a two-step spraying method. First, PU was sprayed on the mosaics substrate as base coating. After that, the HFS solution (the optimal concentrations about 10-12 phr) was immediately sprayed on PU layer as top coating. It was found that the large contact angle of PU/HFS surface was observed more than 90° being a hydrophobicity. The surface morphology indicated the roughness of surface after coating.

Moreover, the coating stability on mosaics surfaces were analyzed the adhesive and the abrasion test under accelerated weathering conditions; following the Thai Industrial Standard (TIS) of Thailand. It suggested the coating was more stability and could prevent the algae. As a results of this research, the PU/HFS coating materials showed the potential to apply for surface coating on other surface materials to prepare the hydrophobic surface for stains and algae protection.





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. สุธินี เกียรติเทพ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมไปถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒน์วิศิษฐ์ สว่างลาภ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ตลอดจนคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยทางด้านนาโนเทคโนโลยี และ อาจารย์ ดร.รัฐวรรธน์ แดงเงิน ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์แก่ผู้วิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.กุลทัศน์ สุวัฒน์พิพัฒน์ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนได้กรุณาแนะนำวิธีใช้อุปกรณ์ในการพันเคลือบที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณกองทัพอากาศที่ได้เอื้อเพื่อข้อมูลสภาพอากาศ ณ ดอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ รวมไปถึงการให้ข้อมูลเกี่ยวกับพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพหลภูมิสิริ ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากมูลนิธิพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพหลภูมิสิริ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากรที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณทุนการศึกษาจากโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ

ธีรพัฒน์ ชันใจ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุเซรามิก.....	6
2.2 การเกิดคราบสกปรก.....	7
2.3 มุมสัมผัสของน้ำ.....	8
2.4 การเตรียมพื้นผิวให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ.....	10
2.5 วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบ.....	11
2.6 อนุภาคนาโน.....	14
2.7 เทคนิคการเคลือบ.....	16
2.8 การทดสอบการยึดเกาะ.....	18
2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	20

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
บทที่ 3 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.4.1 การหาสาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์ .....	35
3.4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโมเสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์ .....	35
3.4.1.2 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของแผ่นโมเสก .....	35
3.4.1.3 การวิเคราะห์หมุ่สัมผัสพื้นผิวของแผ่นโมเสก .....	35
3.4.1.4 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโมเสกด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	36
3.4.1.5 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโมเสก .....	36
3.4.1.6 การวิเคราะห์สมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโมเสก .....	37
3.4.1.7 การวิเคราะห์หาสาเหตุจากตัวอย่างคราบหินปูน และตัวอย่างน้ำฝน.....	37
3.4.2 การหาสารเคลือบผิว อนุภาคนาโน และสูตรเคลือบผิว .....	38
3.4.2.1 การหาพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว .....	38
3.4.2.2 การหาอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ.....	39
3.4.2.3 การหาวิธีเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคนาโน .....	39
3.4.2.4 การหาสภาวะของการพ่นเคลือบ .....	41
3.4.3 การศึกษาสมบัติการทนต่อสภาวะต่างๆ .....	44
3.4.3.1 การทดสอบความโปร่งใสของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ.....	44
3.4.3.2 การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิว.....	45
3.4.3.3 การทดสอบความทนน้ำของสารเคลือบ .....	46
3.4.3.4 การทดสอบความทนต่อกรดของสารเคลือบ .....	47

3.4.3.5 การทดสอบความทนต่อเบสของสารเคลือบ .....	48
3.4.3.6 การทดสอบความทนต่อความร้อนของสารเคลือบ .....	49
3.4.3.7 การทดสอบความทนต่อแสง UV ของสารเคลือบ.....	50
3.4.3.8 การทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ .....	51
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง .....	52
4.1 ผลการหาสาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์.....	52
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโมเสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์.....	52
4.1.2 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของแผ่นโมเสก .....	55
4.1.3 ผลการวิเคราะห์มุมสัมผัสน้ำของแผ่นโมเสก.....	57
4.1.4 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโมเสกด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	58
4.1.5 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโมเสก.....	59
4.1.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโมเสก.....	62
4.1.7 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุจากตัวอย่างคราบหินปูน และตัวอย่างน้ำฝน .....	64
4.2 ผลการหาสารเคลือบผิว อนุภาคนาโน และสูตรเคลือบผิว .....	68
4.2.1 ผลการหาพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว .....	68
4.2.2 ผลการหาอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ .....	72
4.2.3 ผลการหาวิธีเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคนาโน .....	73
4.2.4 ผลการหาสถานะของการพ่นเคลือบ.....	75
4.3 ผลการศึกษาสมบัติการทนต่อสภาวะต่างๆ.....	80
4.3.1 ผลการทดสอบความโปร่งใสของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ .....	80
4.3.2 ผลการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิว .....	83
4.3.3 ผลการทดสอบค่าความแตกต่างของสี (Delta E) หลังการทดสอบที่สภาวะต่างๆ.....	88
4.3.4 ผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำหลังการทดสอบการทนที่สภาวะต่างๆ.....	90
4.3.5 ผลการทดสอบลักษณะผิวของฟิล์มหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ .....	92

4.3.6 ผลการทดสอบความทนต่อการขัดถูที่สภาวะต่างๆ ..... 97

4.3.7 ผลการทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ ..... 101

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ ..... 104

5.1 สรุปผลการทดลอง ..... 104

5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 107

รายการอ้างอิง ..... 108

ภาคผนวก..... 113

ประวัติผู้เขียน..... 131



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงระดับของผลการทดสอบการยึดติด .....	19
ตารางที่ 2 แสดงการแปลความหมายจากค่า $\Delta E$ .....	22
ตารางที่ 3 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย .....	34
ตารางที่ 4 อัตราส่วนการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซิน และพอลิยูรีเทน (Part A : Part B).....	38
ตารางที่ 5 แสดงสูตรสารเคลือบที่ทดสอบโดยวิธีการจุ่มเคลือบ .....	39
ตารางที่ 6 แสดงค่าสีในระบบสี CIE D65 ( $L^*$ $a^*$ $b^*$ ) ของโมเสก 5 ชนิด.....	54
ตารางที่ 7 แสดงผลการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซินและพอลิยูรีเทน .....	68
ตารางที่ 8 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังจุ่มเคลือบ .....	74
ตารางที่ 9 แสดงลักษณะมุมสัมผัสของน้ำของพื้นผิวที่ทำเคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ.....	74
ตารางที่ 10 แสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำด้วยการพ่นเคลือบแบบธรรมดาและแบบ Base – top coat .....	77
ตารางที่ 11 แสดงค่าสีในระบบ $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS.....	80
ตารางที่ 12 แสดงค่าสีในระบบ $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS.....	81
ตารางที่ 13 แสดงค่าสีในระบบ $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 14 phr HFS.....	82
ตารางที่ 14 แสดงผลการทดสอบการยึดติดของฟิล์ม .....	83
ตารางที่ 15 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 10 phr HFS	84
ตารางที่ 16 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 12 phr HFS	85
ตารางที่ 17 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 14 phr HFS	86

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แสดงพื้นผิวของใบบัวที่มีหนามในระดับไมโครเมตร และปุ่มเล็กๆ ในระดับนาโนเมตร [4].....	2
รูปที่ 2 แสดงคราบหินปูนหรือคราบขาวที่เกิดขึ้นบนพระมหาราชตุ.....	8
รูปที่ 3 แสดงลักษณะของเหลวที่หยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็งที่ทำมุมสัมผัสแตกต่างกัน [20].....	9
รูปที่ 4 แสดงแนวทิศทางของแรงดึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวที่แสดงในรูปเวกเตอร์ [21].....	9
รูปที่ 5 แสดงลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว [22].....	10
รูปที่ 6 แสดงความขรุขระของพื้นผิว [23].....	11
รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน [26].....	12
รูปที่ 8 แสดงปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมเซต [15].....	12
รูปที่ 9 แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซี [27].....	14
รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยสารเคลือบผิว [29].....	16
รูปที่ 11 แสดงวิธีพ่นเคลือบแบบ Conventional Air Spray [30].....	17
รูปที่ 12 แสดงวิธีการทดสอบการยึดเกาะ [31].....	18
รูปที่ 13 แสดง Color space ของสีในระบบ CIELAB [32].....	20
รูปที่ 14 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [38] .....	23
รูปที่ 15 องค์ประกอบของเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy; EDX [39].....	24
รูปที่ 16 แสดงลักษณะของกราฟ TGA [41].....	25
รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างกราฟ DSC ที่พล็อตระหว่าง Heat flow กับอุณหภูมิ [42].....	26
รูปที่ 18 ภาพ SEM แสดงความขรุขระของพื้นผิวของ PU ที่มีการเพิ่มอัตราส่วนของ $MoS_2$ [43]....	27
รูปที่ 19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PU ที่ใช้แม่แบบ PAA [44].....	28
รูปที่ 20 แสดงการทดสอบการยึดติดของฟิล์ม MCPU/PMC [47].....	29

รูปที่ 21 แสดงการวัดมุมสัมผัสของน้ำ.....	36
รูปที่ 22 แสดงสารยึดเกาะที่ใช้ในงานวิจัย (ซ้าย) อีพ็อกซีเรซิน (ขวา) พอลิยูรีเทน.....	38
รูปที่ 23 อุปกรณ์ที่ใช้พ่นเคลือบและลักษณะการพ่นเคลือบ.....	40
รูปที่ 24 แสดงภาพจำลองการนำรอบของการพ่นเคลือบ.....	42
รูปที่ 25 แสดงการทดสอบการทนน้ำเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว.....	46
รูปที่ 26 แสดงการทดสอบการทนกรดเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว.....	47
รูปที่ 27 แสดงการทดสอบการทนเบสเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว.....	48
รูปที่ 28 แสดงการทดสอบการทนความร้อนเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว.....	49
รูปที่ 29 แสดงการทดสอบการทนแสง UV เป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว.....	50
รูปที่ 30 แสดงโมเสกตัวอย่างที่ใช้เป็นพื้นผิวของมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์.....	52
รูปที่ 31 แสดงลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาเจดีย์ธาตุนภเมทนีดลในตำแหน่งต่างๆ [50] .....	53
รูปที่ 32 แสดงลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริในตำแหน่งต่างๆ [51] .....	53
รูปที่ 33 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด.....	54
รูปที่ 34 การทดสอบความทนต่อสารเคมี และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเบื้องต้นของโมเสก.....	56
รูปที่ 35 แสดงผลการแช่ในตัวทำละลายของแผ่นโมเสกเป็นเวลา 7 วัน.....	56
รูปที่ 36 แสดงมุมสัมผัสของน้ำของแผ่นโมเสก.....	57
รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) และค่า %T ของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด.....	58
รูปที่ 38 แสดง ATR-FTIR spectrum ของ Polyurethane [52].....	59
รูปที่ 39 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวดัดขวางของแผ่นโมเสกสีทองที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	60
รูปที่ 40 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวดัดขวางของแผ่นโมเสกสีน้ำตาลที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	61
รูปที่ 41 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวดัดขวางของแผ่นโมเสกสีเทาเข้ม 200 เท่า.....	61
รูปที่ 42 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวดัดขวางของแผ่นโมเสกสีเทาอ่อนที่กำลังขยาย 200 เท่า.....	61



รูปที่ 43 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโม่เสกสีม่วงที่กำลังขยาย 200 เท่า .....	62
รูปที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า Normalized Heat Flow Endo Up (W/g) ของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด.....	62
รูปที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight ของโม่เสก.	63
รูปที่ 46 ภาพ SEM+EDX คราบหินปูนพื้นทางเดินของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ.....	64
รูปที่ 47 ภาพ SEM+EDX หินปูนของพระธาตุคราบหินปูนบนบันไดทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุ.....	64
รูปที่ 48 ภาพ SEM-EDX ปูนยาแนวของซุ้มรอบองค์พระธาตุฯ บริเวณรอยต่อของแผ่นโม่เสก .....	65
รูปที่ 49 แสดงโม่เสกหลุดออกจากองค์พระธาตุ.....	65
รูปที่ 50 แสดงการวิเคราะห์หน้าผิวดังตัวอย่างด้วยเทคนิคต่างๆ.....	66
รูปที่ 51 แสดงสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ 12 เดือน ช่วง พ.ศ. 2558 – 2560	67
รูปที่ 52 แสดงค่ามอดูลัสของอีพ็อกซีเรซิน .....	69
รูปที่ 53 แสดงค่า Tensile strength ของอีพ็อกซีเรซิน .....	69
รูปที่ 54 แสดงค่ามอดูลัสของพอลิยูรีเทน .....	70
รูปที่ 55 แสดงค่า Tensile strength ของพอลิยูรีเทน .....	70
รูปที่ 56 แสดงค่า Elongation ของพอลิยูรีเทน .....	70
รูปที่ 57 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการหล่อลงเข้าหล่อ .....	71
รูปที่ 58 แสดงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนที่ได้หลังจากการเผาที่ 800°C.....	72
รูปที่ 59 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายทินเนอร์ .....	72
รูปที่ 60 แสดงตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการจุ่มเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน .....	73
รูปที่ 61 แสดงการจุ่มเคลือบพอลิยูรีเทน/ZnO ในสารละลายอะซิโตน.....	73
รูปที่ 62 แสดงลักษณะของโม่เสกหลังจากการจุ่มเคลือบด้วย Stearic acid .....	73
รูปที่ 63 แสดงค่ามอดูลัสสัมผัสของพื้นผิวที่ถูกพ่นเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน/HFS ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	75
รูปที่ 64 แสดงการกระจายตัวของ HFS ในสารละลาย Thinner ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	76
รูปที่ 65 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบที่แตกต่างกัน.....	77

รูปที่ 66 แสดงค่ามัมสัมผัสของน้ำที่การพ่นเคลือบในจำนวนรอบที่แตกต่างกัน.....	78
รูปที่ 67 แสดงมัมสัมผัสของน้ำที่การพ่นสภาวะความชื้นระบบแตกต่างกัน.....	79
รูปที่ 68 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส).....	80
รูปที่ 69 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส).....	81
รูปที่ 70 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 14 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส).....	82
รูปที่ 71 แสดงรูปโมเสกหลังการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ในเวลา 7 วัน .....	87
รูปที่ 72 แสดงค่าความแตกต่างของสี (Delta E) หลังการทดสอบ .....	88
รูปที่ 73 แสดงค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำหลังการทดสอบ .....	90
รูปที่ 74 แสดงลักษณะผิวของฟิล์มหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ.....	92
รูปที่ 75 แสดงการวิเคราะห์ผลหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ .....	93
รูปที่ 76 ค่ามัมสัมผัสของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปหลังจากทำการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ .....	95
รูปที่ 77 แสดงการทดสอบการขัดถู (abrasion) และวัดความหนาของโมเสกที่สภาวะต่างๆ.....	97
รูปที่ 78 ค่ามัมสัมผัสของโมเสกที่เปลี่ยนแปลงหลังการทดสอบการขัดถูที่สภาวะ .....	99
รูปที่ 79 แสดงพื้นผิวของแผ่นกระจก และแผ่นโมเสกหลังจากการแช่ตะไคร่น้ำที่สภาวะแรง .....	101
รูปที่ 80 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นกระจก และโมเสกหลังจากการแช่ตะไคร่น้ำที่สภาวะแรง .....	102
รูปที่ 81 แสดงโมเสกและกระจกหลังจากการแช่ที่สภาวะจริง.....	103

## บทที่ 1

### บทนำ

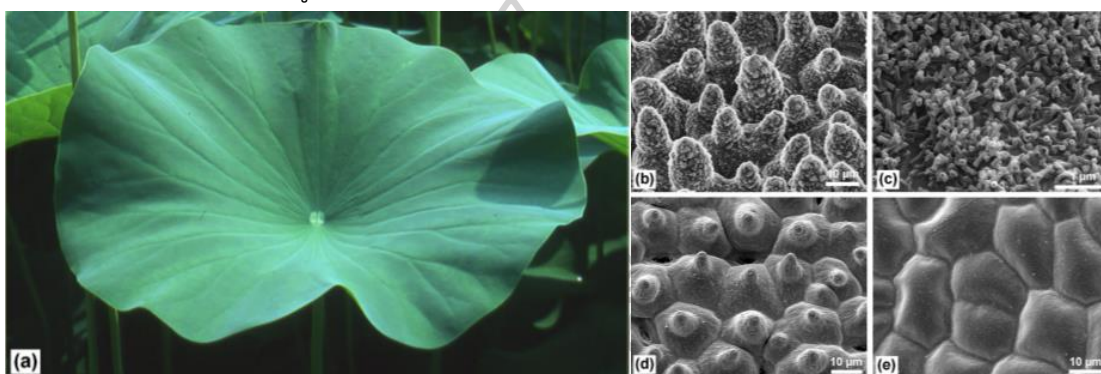
#### 1.1 ที่มา และความสำคัญ

ในปัจจุบันวัสดุเซรามิกได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก เซรามิกสามารถนำมาประยุกต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ได้มากมาย ยกตัวอย่างกลุ่มผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร ได้แก่ ถ้วยกาแฟ จานชาม เขยือก รวมไปถึงพวกสุขภัณฑ์ เช่น อ่างล้างหน้า กระเบื้องปูพื้น รวมไปถึงกระเบื้องโมเสก กระเบื้องหลังคาเซรามิก กระถาง และของตกแต่งส่วนใหญ่แล้วล้วนเป็นวัสดุเซรามิก [1]

ประเทศไทยได้มีการนำวัสดุเซรามิกที่เป็นกระเบื้องมาใช้ในการตกแต่งโบราณสถาน หรือศาสนสถานต่างๆ เพื่อให้เกิดความสวยงามและความคงทน เช่น พระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ประดิษฐานอยู่บนที่สูงที่สุดในราชอาณาจักรไทย ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ ตำบลบ้านหลวง อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ ที่สร้างขึ้นโดยกองทัพอากาศร่วมกับพลกนิกรชาวไทย โดยพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลได้สร้างถวาย “พระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร (รัชกาลที่ 9)” เนื่องในวโรกาสทรงเจริญพระชนมพรรษาครบ 5 รอบเมื่อปี พ.ศ. 2530 และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริได้สร้างถวาย “สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง (ในรัชกาลที่ 9)” เนื่องในวโรกาสทรงเจริญพระชนมพรรษาครบ 5 รอบเมื่อปี พ.ศ. 2535 [2] เป็นเวลากว่า 20 ปีแล้ว ที่พระมหาสถูปเจดีย์อันยิ่งใหญ่สององค์นี้ได้ประดิษฐานอย่างสง่างาม และเป็นที่เคารพสักการะของปวงชนชาวไทย ด้วยความสูงของสถานที่ประดิษฐานอันเป็นยอดเขาที่สูงที่สุดในประเทศไทย ซึ่งสูงเกือบ 8,000 ฟุตจากระดับน้ำทะเลจึงทำให้มีความหนาวเย็นตลอดทั้งปี รวมถึงสภาพอากาศชื้น ทำให้เกิดคราบและมีตะไคร่น้ำเกาะที่พื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ ทำให้พระมหาธาตุเจดีย์อันทรงคุณค่ามีความหมองหม่นไปอันเนื่องมาจากตะไคร่น้ำ รา รวมไปถึงคราบหินปูนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ ทำให้มีการจัดสรรงบประมาณในการทำความสะอาดเกิดขึ้น และการทำความสะอาดที่บ่อยครั้งทำให้สิ้นเปลืองทั้งทางด้านงบประมาณและทรัพยากรบุคคล ปัจจุบันได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้พื้นผิวต่างๆ มีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) โดยไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดโดยการขัดถู สามารถใช้ได้ในระยะยาวด้วยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การสร้างพื้นผิวที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้โดยการเคลือบ เป็นต้น [3]

สำหรับความรู้ด้านนาโนศาสตร์ และการพัฒนาด้านเทคโนโลยีด้านสารเคลือบผิว ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในยุคนี้นี้ ทำให้มนุษย์สามารถเข้าใจสมบัติต่างๆ ที่น่าทึ่งของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติได้อย่างง่ายดาย ตัวอย่างที่สามารถเห็นได้ชัดเจนในเรื่องการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำ ได้แก่

ความเข้าใจโครงสร้างผิวใบบัวและปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect) จากผลการศึกษาผิวใบบัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทำให้ทราบว่าโครงสร้างของใบบัวมีลักษณะโครงสร้างลำดับชั้น โดยมีหนามขนาดเล็กจำนวนมากเรียงตัวกระจายอยู่อย่างเป็นระเบียบในระดับไมโครเมตร และหนามเหล่านั้นยังมีปุ่มเล็กๆ ที่มีขนาดในช่วงระดับนาโนเมตรซึ่งเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นไขหรือขี้ผึ้งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงทำให้น้ำที่ตกลงบนใบบัวมีพื้นที่สัมผัสน้อยมาก และไม่สามารถซึมผ่านหรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้างบนใบบัวได้ ดังนั้นน้ำจึงต้องม้วนตัวเป็นหยดน้ำขนาดเล็กที่มีลักษณะกลมมนและกลิ้งไปมาบนใบบัว พื้นผิวใบบัวจึงมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงพื้นผิวของใบบัวที่มีหนามในระดับไมโครเมตร และปุ่มเล็กๆ ในระดับนาโนเมตร [4]

จากปรากฏการณ์ความชอบและไม่ชอบน้ำของพื้นผิว มีความเกี่ยวข้องกับมุมสัมผัสกับพื้นผิว ซึ่งเป็นมุมที่เกิดขึ้นในเขตสามสภาวะ (ของแข็ง/ของเหลว/ไอ) อธิบายด้วยมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของของเหลวที่พื้นผิวของของแข็ง โดยทั่วไปถ้ามุมสัมผัสน้อยกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) และถ้ามุมสัมผัสมากกว่า  $150^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเป็นพิเศษ (Superhydrophobic หรือ Ultra hydrophobic surface) [5]

เมื่อไม่นานมานี้การเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเป็นที่นิยมมากในกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์รวมไปถึงวงการอุตสาหกรรม และความต้องการที่จะเตรียมพื้นผิวให้มีค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle, CA) มากกว่า  $150^\circ$  และมุมสไลด์ของน้ำ (Sliding angle, SA) ให้มีค่าน้อยกว่า  $5^\circ$ - $10^\circ$  เป็นที่ต้องการอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติทั้งสองประการนี้จำเป็นต่อการเกิดปรากฏการณ์พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ [6] ที่จะสามารถทำให้พื้นผิวทนต่อการกัดกร่อน [7] รวมไปถึงการทำความสะอาดตัวเองได้ [8] และจากปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวนั้นทำให้นักวิจัยได้รู้ว่าพื้นผิวที่ขรุขระ (Surface roughness) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความไม่ชอบน้ำในระดับนาโนมีผลต่อค่ามุมสัมผัสของน้ำทำให้เกิดปรากฏการณ์พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ จากความรู้เหล่านี้ทำให้นักวิจัยสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ สร้างนวัตกรรมใหม่ และแก้ไขปัญหาต่างๆ จากการเลียนแบบธรรมชาติ [9]

สำหรับการเตรียมพื้นผิวให้มีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำนั้นสามารถใช้ออนุภาคนาโนเตรียมได้ เช่น การเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสำหรับวัสดุหลากหลายชนิดโดยใช้ Silica ormosil ทำการคอมโพสิตกับ โพลีเอทิลีนโพลิเมอร์ (Siloxane polymer) พบว่าได้พื้นผิวไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวดที่มีมุมสัมผัสของน้ำ มีค่ามากกว่า  $150^{\circ}$  มีสมบัติทำความสะอาดพื้นผิวตนเองได้ [10] นอกจากนี้สามารถเตรียมพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำโดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์นาโนพาทิเคิล ( $\text{SiO}_2$ ) ทำการคอมโพสิตกับโพลีเมอร์พอลิไวนิลิดีน ฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) พบว่าได้พื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำที่มีมุมสัมผัสของน้ำ  $154^{\circ}$  และมีมุมสไลด์ของน้ำน้อยกว่า  $2^{\circ}$  [11] ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) นาโนพาทิเคิลได้ถูกนำมา เป็นสารเคลือบกระจกเพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำของกระจก โดยทำการคอมโพสิตกับ RTV silicone rubber พบว่าใช้ 10 %wt ของ  $\text{TiO}_2$  ก็ได้พื้นผิวที่มีความใสและมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งมีมุมสัมผัส ของน้ำมากกว่า  $150^{\circ}$  และมีสมบัติทำความสะอาดพื้นผิวตนเองได้ [12]

การเตรียมสารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifier) ให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำพร้อมทั้งมีสมบัติ ติดทนนานจะอาศัยสารยึดเกาะ (Binding agent) และสารยึดเกาะนั้นต้องมีสมบัติที่ให้ความใสเมื่อ เคลือบไปบนพื้นผิวเซรามิกหรือพื้นผิวอื่นๆ จะไม่เกิดการบดบังสีหรือคุณสมบัติเดิมของพื้นผิว รวมไปถึง การนำไปใช้ในระดัพบรรยากาศที่มีราคาที่ไม่แพงเป็นที่ต้องการอย่างมาก และสามารถทำได้ค่อนข้าง ง่าย [13] อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) เป็นโพลีเมอร์ที่ใช้อย่างกว้างขวางในทางวิศวกรรมและ อุตสาหกรรมพลาสติกซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงโพลี เมอร์ (Thermosetting Polymer) ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห ในทางอุตสาหกรรมได้นำมาประยุกต์ใช้ งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมยานอวกาศ ใช้เป็นสารเคลือบผิวและสารยึดติด [14] เนื่อง ด้วยอีพ็อกซีเรซินเป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) 2 ชนิดคือ Bisphenol A หรือ Bisphenol F กับ Epichlorohydrin ซึ่งออกซิเจนที่อยู่ในโซ่คาร์บอนและกลุ่มอี พอกไซด์ที่อยู่ปลายโซ่คาร์บอนทำให้เรซินอีพ็อกซีมีสมบัติที่เป็นประโยชน์หลายอย่าง เช่น ความ เหนียว การทนต่อการสึกกร่อนมาก และไม่หดตัวระหว่างที่แห้งตัว

พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็นอีกหนึ่งโพลีเมอร์ที่ถูกนำไปใช้ได้หลากหลายด้าน เนื่องจากพอลิยูรีเทนมีหลายชนิด เช่น กลุ่มเทอร์โมเซตติงพอลิยูรีเทนถูกนำไปใช้ในการขึ้นรูปอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ กลุ่มพอลิยูรีเทนแบบยืดหยุ่นยังถูกนำไปใช้ในงานเฟอร์นิเจอร์อีกด้วย [15] และเทอร์ โมพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งมีโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบร่างแห ทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถทนความ ร้อนได้ดี เสถียรภาพสูง ทำให้ถูกนำมาใช้ในการเคลือบพื้นผิวในงานด้านต่างๆ เช่น ด้านการบิน, ยาน ยนต์, ด้านการก่อสร้าง และด้านการแพทย์ [16] อีกคุณสมบัติหนึ่งของพอลิยูรีเทน คือ ความติดทนนาน กับวัสดุที่มีพื้นผิวหลากหลายได้อีกทั้งมีความใส หากนำไปคอมโพสิตกับสารกลุ่มไฮโดรโฟบิกแล้วจะ ทำให้ได้สารปรับปรุงพื้นผิวที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำไปปรับ ใช้ในระดัพบรรยากาศได้

สำหรับงานวิจัยนี้จะได้ทำการสำรวจการหาสาเหตุการหมองหม่นของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ โดยจะวิเคราะห์จากกระเบื้องตัวอย่างที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างพระมหาธาตุทั้งสององค์ และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการหาสารเคลือบผิวที่เหมาะสมโดยวิธีพ่นเคลือบ เพื่อที่จะนำไปปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุที่ประกอบองค์พระมหาธาตุฯ ให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำโดยทำการคอมโพสิตอนุภาคนาโนกับเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ เช่น อีพ็อกซีเรซิน พอลิยูรีเทน โดยสามารถยึดเกาะบนผิววัสดุที่หลากหลายและสามารถนำไปใช้ในระดัพบมหาภาคได้ รวมไปถึงการทดสอบการทำความสะอาดตัวเอง และการป้องกันการเกิดตะไคร่น้ำของพื้นผิวที่ปรับปรุงแล้ว สำหรับการทดลองและทดสอบในแต่ละขั้นตอนจะใช้เครื่องมือขั้นสูงในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาสาเหตุการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ รวมไปถึงการสำรวจวัสดุกระเบื้องที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์
2. เพื่อหาสารยึดเกาะที่เหมาะสมกับวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นผิว
3. เพื่อหาอนุภาคนาโนที่เหมาะสมกับสารยึดเกาะและวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นผิว
4. เพื่อหาสภาวะในการเตรียมที่เหมาะสมของสารยึดเกาะที่คอมโพสิตกับอนุภาคนาโนให้ได้คุณสมบัติเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ
5. เพื่อศึกษาสมบัติการทนต่อ กรด เบส ความร้อน และทดสอบการทนต่ออากาศสภาวะแรงของพื้นผิวที่ทำการเคลือบด้วยสารเคลือบ

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. การหาสาเหตุการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริรวมไปถึงการสำรวจวัสดุกระเบื้องที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ
2. การหาสารยึดเกาะและอนุภาคนาโนที่ให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำ สามารถเคลือบผิวกระเบื้องเซรามิกแล้วให้คุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ และสามารถแก้ปัญหาคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์ได้
3. สารเคลือบผิวที่ทำการคอมโพสิตกับอนุภาคนาโนที่ได้จากการทดลองสามารถทนต่อสภาวะกรด เบส ความร้อน ที่สภาวะแรงได้

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. การหาสาเหตุของคราบไม่พึงประสงค์จะวิเคราะห์จากน้ำฝน คราบหินปูน รวมไปถึงตัวอย่างวัสดุเซรามิกจะมาจากวัสดุที่ใช้จริงของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ ต.บ้านหลวง อ.จอมทอง จ.เชียงใหม่
2. การทดสอบคุณสมบัติการทนต่อสภาวะเร่ง เช่น การทนต่อกรด การทนต่อเบส การทนต่อความร้อน จะทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อจำลองให้เหมือนกับสภาวะจริง



## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุเซรามิก

เซรามิก (Ceramic) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คือ เครามอส (Keramos) ซึ่งมีความหมายคำว่า “สิ่งที่ถูกเผา” ในอดีตวัสดุเซรามิกดั้งเดิมได้มีการใช้งานเป็นจำนวนมากที่สุด ซึ่งวัสดุหลักที่นำมาขึ้นรูปคือดินเหนียว โดยช่วงแรกจะเรียกผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ว่า ไชน่าแวร์ เพื่อให้เกียรติกับชาวจีนผู้บุกเบิกการผลิตเครื่องปั้นดินเผา [17]

จากอดีตจนถึงปัจจุบันวิวัฒนาการของเซรามิกเปลี่ยนไปตามยุคสมัยของโลก จากเซรามิกดั้งเดิมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการปั้นด้วยมือในปัจจุบันเครื่องจักรก็เข้ามามีบทบาทมากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกถูกออกแบบและมีการศึกษาในทางทฤษฎี ศาสตร์วิชาทางเซรามิกได้มีการเผยแพร่จากนักวิทยาศาสตร์ ว่าด้วยการศึกษารายละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ นักวิทยาศาสตร์พบว่าในเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกประกอบด้วยแร่ซิลิเกตที่อยู่ในโครงสร้างของอนุภาคดิน สามารถสรุปเป็นหลักวิชาการว่าด้วยศาสตร์ของเซรามิก ซึ่งก็คือศาสตร์ของแร่ซิลิเกตนั่นเอง นักเซรามิกจึงสามารถสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ออกมามากมายตามความต้องการที่จะใช้เซรามิกในชีวิตประจำวัน

ผลิตภัณฑ์เซรามิกสามารถจำแนกตามอุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทยได้ทั้งหมด 8 กลุ่มผลิตภัณฑ์ดังนี้ [18]

1. กลุ่มเซรามิกกระเบื้อง เซรามิกประเภทกระเบื้องที่ใช้ในงานก่อสร้างมีคุณสมบัติเป็นสินค้ากึ่งแปรรูปที่มีวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งปูพื้น บุนนัง และตกแต่งที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงานต่างๆ
2. กลุ่มเซรามิกเครื่องสุขภัณฑ์ เป็นเซรามิกที่เป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งในอาคารบ้านเรือนทุกประเภท ได้แก่ อ่างล้างหน้า อ่างล้างชาม ที่ปัสสาวะ ชักโครก และอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ที่ใส่สบู่ ที่ใส่กระดาษชำระ ที่วางของ เป็นต้น
3. กลุ่มเซรามิกเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เซรามิกเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ **เอิร์ทเทนแวร์** หรือเรียกทั่วไปว่าเครื่องปั้นดินเผา ทำจากวัตถุดิบคือดินเหนียวที่หาได้ตามท้องถิ่นส่วนใหญ่จะมีปริมาณธาตุเหล็กสูง ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900°C - 1,100°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลแดง เนื้อหยาบ รูพรุนมาก ไม่สามารถป้องกันการดูดซึมของน้ำได้ **สโตนแวร์** เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากเนื้อดินขาวผสมกับหินฟันม้าและทราย ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีสีขาวออกเทา นำมาขึ้นรูปโดยการปั้นแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1,100°C - 1,300°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้เนื้อหยาบ ผิวขรุขระ มีรูพรุนน้อย **พอซแลนด์** ใช้ดินขาว ดินเหนียว หรือบอลเคลย์ หินไชน่าสโตน แร่ฟันม้า แร่ควอตซ์ ในการขึ้นรูปที่



อุณหภูมิ 1,260°C - 1,400°C เป็นเซรามิกเนื้อสีขาว เคลือบผิวมัน โปรงแสง มีความแข็งแรงเหมือนแก้ว

4. กลุ่มเซรามิกของชำร่วยและเครื่องประดับ เป็นเซรามิกที่เน้นการใช้ความสามารถในการออกแบบให้มีลักษณะเฉพาะ รวมไปถึงลวดลาย สี สัน เช่น สร้อย ต่างหู แหวน ของตกแต่งเล็กๆ เป็นต้น
5. กลุ่มเซรามิกลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นเซรามิกที่ใช้เทคโนโลยีอย่างเข้มข้นในการผลิต เนื่องจากลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนช่วยป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเสาไฟฟ้าสู่พื้นดินและจับยึดสายไฟฟ้า
6. กลุ่มเซรามิกสำหรับงานโครงสร้างเป็นกลุ่มเซรามิกใช้ในงานที่ต้องการสมบัติทางกลที่ดีที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อนได้ดี ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี เป็นฉนวนความร้อน ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ พลอกนัาวาล์ว ลูกปืน สลักลูกสูบ เป็นต้น
7. กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์เซรามิก เป็นกลุ่มเซรามิกที่มีมากมายหลายชนิด และครอบคลุมคุณสมบัติด้านต่างๆ ได้แก่ ไฟฟ้า แม่เหล็ก แสง และความร้อน เป็นต้น ยกตัวอย่างเซรามิกกลุ่มนี้ เช่น แบเรียมไททาเนต ( $BaTiO_3$ ) สำหรับใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า
8. กลุ่มเซรามิกสำหรับงานด้านการแพทย์ เป็นเซรามิกที่มีคุณสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการสึกหรอได้ดี ที่สำคัญต้องมีความเฉื่อยทางชีวภาพ ได้แก่ พวงกระดูกเทียม ฟันปลอม ข้อต่อเทียม เป็นต้น

## 2.2 การเกิดคราบสกปรก

แคลเซียมคาร์บอเนต หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า คราบขาว เกิดจากน้ำทำปฏิกิริยากับซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และเกิดการคายตัวออกมามีลักษณะเป็นผลึกสีขาวขุ่นละลายอยู่ในน้ำ พื้นหรือผนังที่จะปูกระเบื้อง กาวซีเมนต์ที่ใช้ปูกระเบื้อง ยาแนวร่องกระเบื้อง และกระเบื้องหรือหินที่ใช้ปู ส่วนต่างๆ เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดคราบขาวได้ทั้งหมด แต่ส่วนที่จะทำให้เกิดคราบขาวได้มากที่สุดคือ พื้นหรือผนังที่จะปูกระเบื้อง และกาวซีเมนต์ที่ใช้ปูกระเบื้อง เพราะมีปริมาณมาก ง่ายต่อการเกิดคราบขาว พื้นที่จะปูกระเบื้องเป็นพื้นและผนังภายนอกอาคาร พื้นที่ลักษณะนี้คราบขาวจะเกิดจากน้ำฝนไหลซึมผ่านร่องยาแนวเข้าไปทำปฏิกิริยากับกาวซีเมนต์เกิดเป็นคราบขาวไหลออกมาจากร่องกระเบื้องดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงคราบหินปูนหรือคราบขาวที่เกิดขึ้นบนพระมหาธาตุ

เนื่องจากพระมหาธาตุเจดีย์ประดิษฐาน ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ซึ่งสูงเกือบ 8,000 ฟุตจากระดับน้ำทะเล จึงทำให้มีความหนาวเย็นตลอดทั้งปีรวมไปถึงสภาพอากาศที่ชื้นตลอดเวลา ด้วยสภาพอากาศที่ได้กล่าวข้างต้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การเกิดคราบไม่พึงประสงค์เกาะที่พื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์

จากการเกิดคราบหินปูนหรือคราบขาวดังกล่าวสามารถอธิบายเชิงเคมีได้คือ เมื่อเกิดฝนตกลงมา น้ำ ( $H_2O$ ) จะละลายแก๊สต่างๆ ที่อยู่ในอากาศตามธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ), แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) หรือ แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $NO_2$ ) เมื่อน้ำละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ จะทำให้น้ำฝนมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) ดังสมการ



เมื่อน้ำฝนที่มีสภาพเป็นกรดไหลแนวพื้นผิวของโมเสก ฝนกรดก็จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) ที่เป็นองค์ประกอบในปูนยาแนว และได้สารละลายแคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $Ca(HCO_3)_2$ ) ออกมาดังสมการ

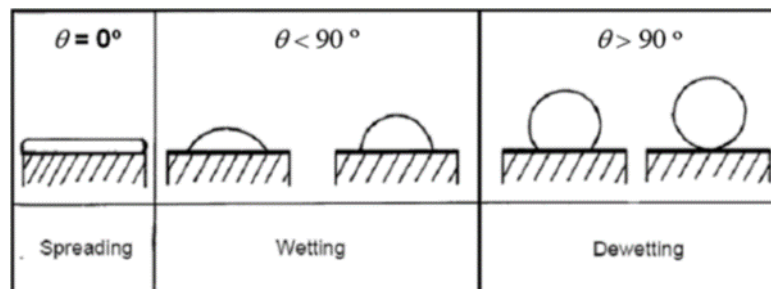


เมื่อสารละลายแคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตไหลไปตามพื้นวัสดุต่างๆ น้ำจะระเหยไปเหลือแต่หินปูนเกาะจนกลายเป็นคราบ [19]

### 2.3 มุมสัมผัสของน้ำ

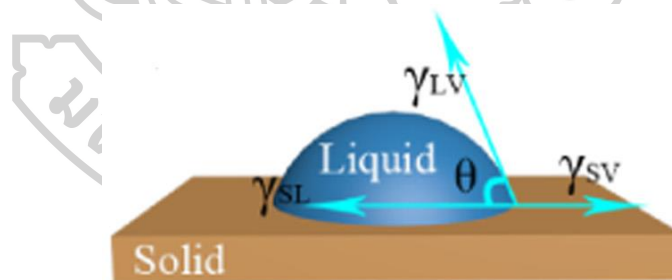
เมื่อหยดน้ำอยู่บนพื้นผิวของของแข็งและไม่เกิดการแพร่ของหยดน้ำจะยังคงรูปและทำมุมองศา ( $\theta$ ) กับพื้นผิวของของแข็งซึ่งเรียกว่ามุมสัมผัส (Contact angle) เป็นลักษณะของแรงตึงผิวระหว่างผิวของเหลวกับผิวของของแข็ง ดังนั้นมุมสัมผัสที่สมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของของแข็งโดยของเหลว หรือเรียกว่าปรากฏการณ์การโค้งงอของผิวของเหลว จากปรากฏการณ์นี้จะเห็นว่าผิวของเหลวกับผิวของของแข็ง ณ จุดสัมผัส เรียกว่ามุมสัมผัสซึ่งมีค่าตั้งแต่  $0^\circ - 180^\circ$  เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิวของของแข็งนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยดไม่ทำให้พื้นผิวเปียกหรือแผ่กระจาย โดย

พิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง  $0^\circ - 90^\circ$  ของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้น มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง  $90^\circ - 180^\circ$  ของเหลวจะเป็นก้อนและไม่เปียกพื้นดังแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงลักษณะของเหลวที่หยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็งที่ทำให้มุมสัมผัสแตกต่างกัน [20]

แรงตึงผิว คือการวัดแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของของแข็งโมเลกุลของของแข็งดึงดูดกับโมเลกุลของเหลว แรงของโมเลกุลที่อยู่ในของแข็ง พิจารณาจากแรงกระทำของโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบในขณะที่โมเลกุลที่อยู่บนพื้นผิวเกิดการไม่สมดุลผลจากปรากฏการณ์ คือการเกิดพลังงานอิสระที่ผิวของของไหล พลังงานที่มากพอนี้เรียกว่าพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface free energy) แสดงปริมาณในรูปของพลังงานกับระยะทาง พลังงานนี้เกิดขึ้นระหว่างผิวของของไหลสองชนิด ถ้าหากของไหลชนิดหนึ่งอยู่ในสถานะของเหลวพลังงานที่วัดได้จากผิวของของแข็งเรียกว่าแรงตึงผิว สามารถคำนวณได้เฉพาะวัสดุที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลว แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว โดยแสดงในรูปเวกเตอร์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงแนวทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวที่แสดงในรูปเวกเตอร์ [21]

แรงของเวกเตอร์ทั้ง 3 ทิศทาง จะได้สมการของยัง (Young's Equation)

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos \theta$$

เขียนรูปสมการใหม่จะได้

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SV}}{\gamma_{LV}}$$

เมื่อ	$\gamma$	คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว ณ สภาวะสมดุล
	$\gamma_{SV}$	คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับไอ น้ำ ณ สภาวะสมดุล
	$\gamma_{LV}$	คือ แรงตึงผิวของของเหลว ณ สภาวะสมดุล
	$\theta$	คือ มุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของของเหลวบนของแข็ง

ดังนั้น ในการวัดแรงตึงผิวโดยวิธีนี้สามารถปรับปรุงให้มีความถูกต้องแม่นยำขึ้นโดยการคำนวณค่ามุมสัมผัสที่แท้จริงจะได้

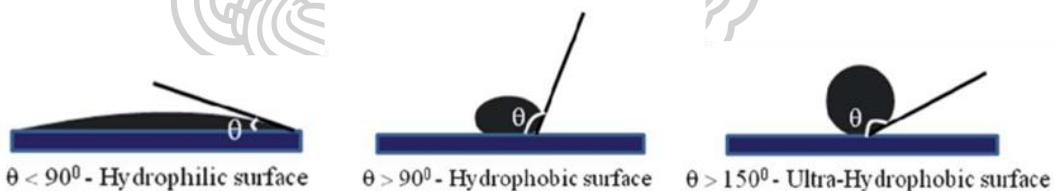
$$\gamma = \frac{r h g \rho}{2 \cos \theta}$$

จากปรากฏการณ์ความชอบและไม่ชอบน้ำของพื้นผิว มีความเกี่ยวข้องกับมุมสัมผัสกับพื้นผิว ซึ่งเป็นมุมที่เกิดขึ้นในเขตสามสภาวะ(ของแข็ง/ของเหลว/ไอ) อธิบายด้วยมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของของเหลวที่พื้นผิวของของแข็ง โดยทั่วไป

ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface)

ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface)

ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า  $150^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเป็นพิเศษ (Superhydrophilic or Ultra hydrophilic surface) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำบนพื้นผิว [22]

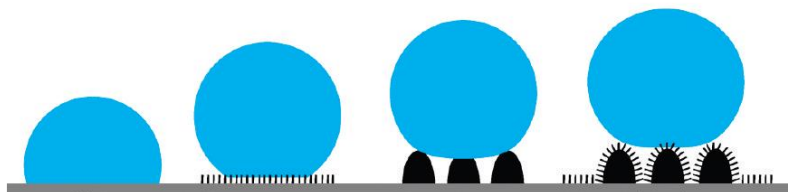
## 2.4 การเตรียมพื้นผิวให้มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ

ประกอบด้วยปัจจัยสำคัญ 2 ประการคือ

1. การทำให้พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น (Roughness surface)

จากผลการศึกษาผิวไบบิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ทำให้ทราบว่าโครงสร้างของไบบิวมีลักษณะโครงสร้างลำดับชั้นโดยมีหนามขนาดเล็กจำนวนมากเรียงตัวกระจายอยู่อย่างเป็นระเบียบในระดับไมโครเมตร และหนามเหล่านั้นยังมีปุ่มเล็กๆ ที่มีขนาดในช่วงระดับนาโนเมตรซึ่งเคลือบด้วยสารที่มีลักษณะเป็นไขหรือขี้ผึ้งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงทำให้น้ำที่ตกลงบนไบบิวมีพื้นที่สัมผัสน้อยมาก และไม่สามารถซึมผ่านหรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้างบนไบบิวได้ ดังนั้นน้ำ

จึงต้องม้วนตัวเป็นหยดน้ำขนาดเล็กที่มีลักษณะกลมมนและกลิ้งไปมาบนใบบัว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พื้นผิวของใบบัวมีความขรุขระดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงความขรุขระของพื้นผิว [23]

## 2. การทำให้พื้นผิวมีพลังงานต่ำ (Low surface energy)

โดยปกติแล้วของไหลทุกชนิดจะมีคุณสมบัติของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล 2 ชนิด[24]คือ

- แรงเชื่อมแน่น (Cohesive Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน กล่าวคือเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของเหลวกับของเหลวด้วยกัน
- แรงยึดติด (Adhesive Force) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน กล่าวคือเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของเหลวกับของแข็ง

ถ้าแรงยึดติดระหว่างของเหลวกับของแข็ง (น้ำกับพื้นผิว) สูงกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่างของเหลวกับของเหลว (น้ำกับน้ำ) จะทำให้แรงระหว่างพื้นผิวที่มีต่อน้ำนั้นสูง ซึ่งจะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของเหลวกับของเหลวด้วยกัน จึงเกิดพื้นผิวชนิดที่มีความชอบน้ำขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงเชื่อมแน่นระหว่างของเหลวกับของเหลวสูงกว่า แรงยึดติดระหว่างของเหลวกับของแข็ง นั่นก็หมายความว่าของเหลวกับของเหลวด้วยกันมันมีแรงยึดเหนี่ยวมากกว่าจึงพยายามที่รวมตัวกันเป็นหยดน้ำ และไม่สามารถซึมผ่านหรือกระจายตัวแผ่ขยายออกในแนวกว้างบนพื้นผิวได้ น้ำจึงต้องม้วนตัวเป็นหยดน้ำขนาดเล็กที่มีลักษณะกลมมนและกลิ้งไปมาบนพื้นผิว

## 2.5 วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบ

### 1. พอลิยูรีเทน [25]

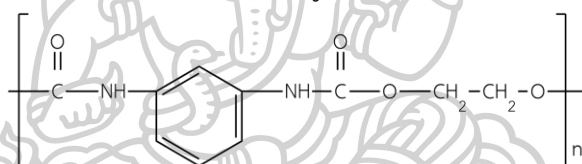
พอลิยูรีเทนมีทั้งชนิดที่เป็นเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทนเป็นพลาสติกที่มีการใช้กันแพร่หลายมากที่สุดชนิดหนึ่งเนื่องจากผลิตภัณฑ์มีตั้งแต่อ่อนนุ่มยืดหยุ่นจนถึงเป็นโฟมชนิดแข็ง พอลิยูรีเทนแบ่งออกตามการใช้งานได้เป็น 3 กลุ่มคือ

- พอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น (Flexible polyurethane foam) ใช้ทำเบาะเฟอร์นิเจอร์ และรองพื้น

- พอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (Rigid polyurethane foam) มีคุณสมบัติเด่นๆ คือ เป็นฉนวนที่ดี นิยมใช้ทำปีกเครื่องบิน ท้องเรือ ภาชนะเก็บของร้อนและเย็น เพื่อให้เกิดความแข็งแรง และเป็นฉนวนความร้อน
- พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Semirigid polyurethane foam polyurethane elastomers) สามารถทนต่อแรงเสียดทานได้ดีมาก มีความยืดหยุ่นดี ใช้ทำยางรถยนต์ พื้นรองเท้า นอกจากนี้ Elastomer ยังสามารถนำไปผลิตเป็น Elastic fiber ซึ่งใช้อุตสาหกรรมสิ่งทอ ไหมเย็บแผล และชุดว่ายน้ำ

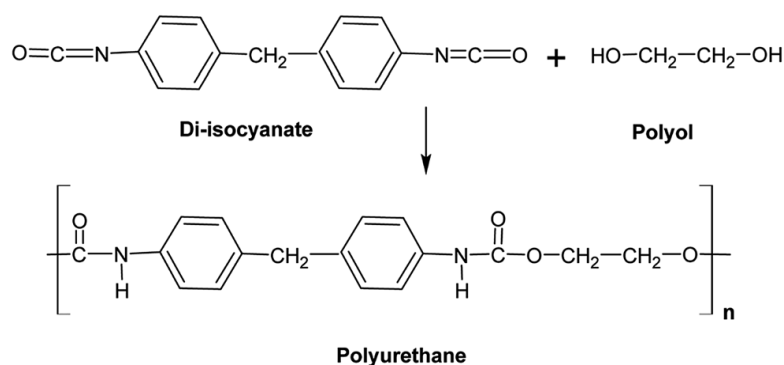
จากบทความข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าพอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ชนิดเดียวที่สามารถเตรียมให้มีตั้งแต่ลักษณะแข็งเหนียวจนกระทั่งนุ่มฟูแบบฟองน้ำ สามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลายหลากลักษณะตั้งแต่เป็นเส้นใยเป็นยางเทียม จนกระทั่งกาวหรือสารเคลือบผิว

โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 7 ประกอบด้วยพันธะยูรีเทนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่  $-NCO$  ของไอโซไซยานาตกับหมู่  $-OH$  ของพอลิโออล



รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน [26]

พอลิยูรีเทนสามารถสังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น ระหว่างสารตั้งต้นพื้นฐานชนิดไดไอโซไซยานาต และไดออลดังสมการในรูปที่ 8 จากลักษณะปฏิกิริยาการสังเคราะห์ หากใช้เฉพาะไดไอโซไซยานาตทำปฏิกิริยากับไดออลจะได้พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก สำหรับเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทนจะสามารถเกิดขึ้นได้โดยการเติมสารที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 8 แสดงปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมเซต [15]

## 2. อีพ็อกซีเรซิน [27]

อีพ็อกซี หรือ Polyepoxide เป็น Thermosetting polymer เกิดจากปฏิกิริยาของเรซินกับ Hardener อีพ็อกซีมีหลากหลายคุณสมบัติประโยชน์ใช้สอยในการทำงานทั่วไป อีพ็อกซี (Epoxy) เป็นโพลีเมอร์ที่จะเกิดจากสารเคมีที่แตกต่างกันสองสิ่งเหล่านี้เรียกว่าเรซิน และ Hardener เรซินประกอบด้วยโมโนเมอร์หรือพอลิเมอร์อีพ็อกไซด์ ส่วนใหญ่แล้วเรซินอีพ็อกซีทั่วไปจะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin และ Bisphenol - A แต่อาจถูกแทนที่ด้วยสารเคมีที่คล้าย Hardener ประกอบด้วยโมโนเมอร์พอลิเอ เช่น Triethylenetetramine (TETA) เมื่อสารเหล่านี้ผสมกัน กลุ่มละลายทำปฏิกิริยากับกลุ่มอีพ็อกไซด์ในรูปแบบโควาเลนต์แต่ละกลุ่ม NH สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มอีพ็อกไซด์เพื่อให้โพลีเมอร์ออกผลเป็นอย่างมากกระบวนการพอลิเมอร์เรียกว่า “บ่ม” และสามารถควบคุมโดยอุณหภูมิและทางเลือกของเรซินและสาร Hardener

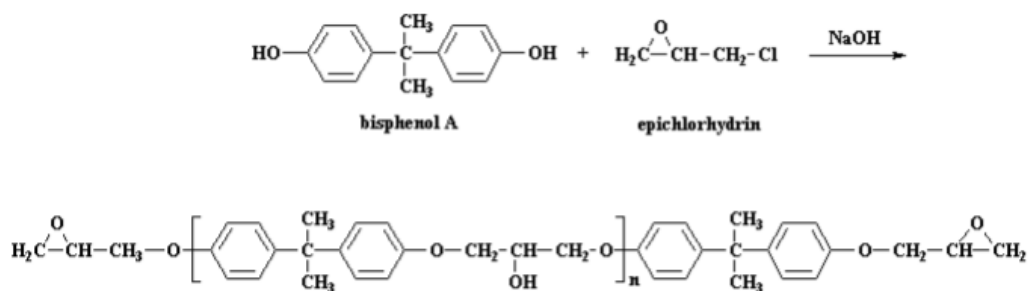
### ▪ การสังเคราะห์อีพ็อกซีเรซิน

โดยทฤษฎีแล้วอีพ็อกซีเรซินจะได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี 2 หมู่ (Di-hydroxy compound) กับสารประกอบที่มีหมู่อีพ็อกซี 2 หมู่ (Di-epoxide) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าจะนิยมใช้สารประเภท Epichlorohydrin ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในลักษณะเดียวกันกับ Di-epoxide โดยในการทำปฏิกิริยาจะมีการใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นเบสเติมลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งจะแตกตัวให้หมู่ OH<sup>-</sup> มาทำปฏิกิริยากับสารประกอบ Di-hydroxy compound (เช่น Bisphenol A) เกิดเป็นอัลคอกไซด์ไอออน (Alkoxide ion)

จากนั้นอัลคอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับ Epichlorohydrin ตรงบริเวณตำแหน่งของอะตอมคาร์บอนที่มีความเคะกะน้อยที่สุด ตามด้วยการปฏิกิริยาการปิดวงแหวนอีพ็อกซีอีกครั้งหนึ่ง โดยมีการไล่อะตอมของคลอรีนออกจากโมเลกุลในรูปของไอออนลบของคลอไรด์

ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของโมเลกุลสามารถเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ในลักษณะเดียวกันซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหมู่อีพ็อกซีอยู่ที่ปลายโมเลกุลซึ่ง มีโครงสร้างคล้าย Epichlorohydrin ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อกับอัลคอกไซด์ไอออน และเนื่องจากในการทำปฏิกิริยาจะมีน้ำปนอยู่ด้วยประจุลบขึ้นในโมเลกุล พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีจึงเกิดปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซีตรงกลางโมเลกุล

ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพ็อกไซด์ที่ปลายโมเลกุลของสารข้างต้นกับหมู่ไฮดรอกซีของสารประกอบ Dihydroxy compound ในลักษณะคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยา ควบแน่นทำให้ได้โมเลกุลที่ยาวขึ้นจนกระทั่งสารตัวใดตัวหนึ่งถูกใช้หมดไป ปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จึงยุติชั่วคราว ดังนั้นปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีสามารถเขียนอย่างย่อได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงปฏิกิริยาโดยรวมของการสังเคราะห์พรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซี [27]

โดยเมื่อ n มีค่าประมาณ 20-30 พรีพอลิเมอร์ที่ได้จะเริ่มมีลักษณะเป็นของแข็ง

นอกจากนี้ประเด็นสำคัญของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้คือการควบคุมไม่ให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยน้ำของสาร Epichlorohydrin หรือปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่ตรงกลางของสายโซ่ของพอลิเมอร์ และปฏิกิริยาระหว่าง Epichlorohydrin กับสารปนเปื้อน ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีผลทำให้โครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของพรีพอลิเมอร์ของอีพ็อกซีเปลี่ยนไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการควบคุมปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้จะทำโดยการใช้อุณหภูมิในช่วงประมาณ 50°C - 95°C

## 2.6 อนุภาคนาโน

กระบวนการเคลือบชั้นผิวของวัสดุ เพื่อให้มีการเกิดปรากฏการณ์ Superhydrophobic ซึ่งการเคลือบวัสดุให้เป็น Superhydrophobic สามารถทำได้โดยใช้สารเคมีได้หลายชนิด เช่น Manganese (IV) oxide polystyrene (MnO<sub>2</sub>/PS), Zinc oxide polystyrene (ZnO/PS), Precipitated Calcium carbonate, Carbon nano-tube structures (ท่อนาโนคาร์บอน) และ Silica nano-coating (การเคลือบด้วยซิลิกา)

โดยการเคลือบที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การเคลือบด้วยซิลิกาซึ่งเป็นเจลที่สามารถนำมาใช้ได้โดยการจุ่มวัตถุหรือผ่านการสเปรย์ละออง แต่การใช้ Oxide polystyrene จะมีความคงทนมากกว่าการเคลือบด้วยซิลิกาเจล แต่มีการบวนการที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูงรวมถึงการใช้ท่อนาโนคาร์บอนยังมีราคาแพงและผลิตได้ยาก ดังนั้นซิลิกาเจลยังคงเป็นตัวเลือกที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากที่สุดในปัจจุบัน [28]

ในอุตสาหกรรมการเคลือบพื้นผิววัสดุให้ Superhydrophobic ทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่ไม่สามารถสังเกตได้บนพื้นผิวของวัสดุ ในธรรมชาติเกิด Superhydrophobic พบได้ในใบพืช เช่น ใบบัว และปีกแมลงบางชนิด Superhydrophobic สามารถช่วยลดการกัดกร่อนบนพื้นผิววัสดุ ช่วยลดการจับตัวเป็นน้ำแข็ง และป้องกันพื้นผิววัสดุให้ไม่เกิดคราบสกปรก



- เมทิลกรุป (Methyl group)

Methyl groups ( $\text{CH}_3$ ) เป็นพันธะเคมีกับซิลิคอนจะมีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการไม่ชอบน้ำ เนื่องจากมีการสัมผัสกันได้น้อย (Extremely little interaction) ระหว่าง Methyl group กับโมเลกุลของน้ำ การวัดคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำของวัสดุที่แสดงแนวโน้มของการเปียก เช่น วัดความสามารถของน้ำที่ทำให้เกิดขอบเขตบนของแข็ง สามารถวัดได้จากมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและพื้นผิวของแข็ง ยังมีมุมสัมผัสที่สูงกว่าจะแสดงถึงการสัมพันธ์กันน้อยระหว่างของแข็งกับน้ำ ทำให้น้ำมีสภาพเป็นหยดบนของแข็ง

Methyl group จะเกิดพันธะทางเคมีกับโครงร่างตาข่ายซิลิกา (Silica framework) ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างไฮบริดของรูพรุน (Hybrid mesoporous) วัสดุที่ได้จะเป็นโครงสร้างของรูพรุนที่มีพื้นผิวและปริมาตรของรูพรุนที่สูงและมีการกระจายของขนาดของรูพรุนที่แคบ ซึ่งวัสดุที่มีรูพรุนนี้จะทำให้เกิดคุณสมบัติของ Superhydrophobic ซึ่งวัสดุของแข็งนี้จะมีศักยภาพสูงที่จะสามารถทำความสะอาดตัวเองได้จากน้ำมัน สารเคมีอินทรีย์ และสารมลพิษต่างๆ

Methyl group ที่เกิดขึ้นจาก Silanes จะช่วยลดแรงดึงผิวให้กับวัสดุและป้องกันการยุบตัวของรูพรุน นอกจากนั้นการฟอร์มตัวของ Methyl group จะทำให้มีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้สูง (Higher thermal stability) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้ฐานของ Sodium silicate ในการเกิดเป็น Superhydrophobic

- ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) หรือ ซิลิกา (Silica)

ซิลิกา หรือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสี หรือผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว  $1170^\circ\text{C}$  ขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกาไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยและไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาและซิลิเกตจะมีการเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซิลิกามีโครงสร้างเป็นโครงผลิกร่างตาข่ายเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซิลิกามักพบได้ทั่วไปในธรรมชาติอาจอยู่ในรูปของทราย หรือ ควอตซ์ อะตอมซิลิคอนจัดเรียงตัวเหมือนคาร์บอนในผลึกเพชรแต่มีออกซิเจนคั่นอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอนแต่ละคู่ซิลิกาใช้เป็นวัสดุเบื้องต้นในการผลิตกระจก แก้วน้ำและขวดน้ำ สายใยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคมก็เป็นผลิตผลจากซิลิกาเช่นเดียวกันและยังใช้เป็นวัสดุดิบแรกเริ่มในผลิตภัณฑ์จำพวกเซรามิก เช่น เครื่องปั้นดินเผา เครื่องลายครามและการผลิตพาร์แลนดซ์ซีเมนต์

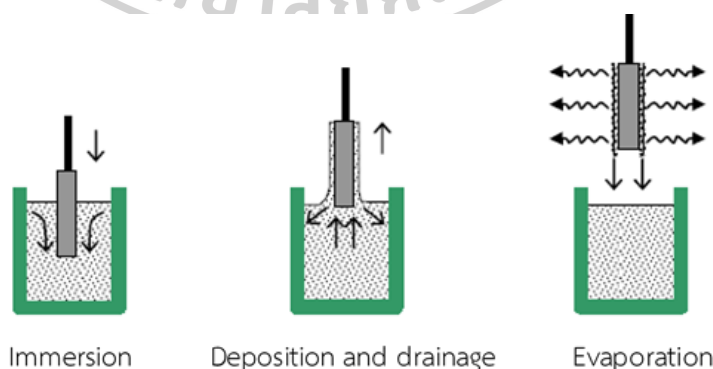
## 2.7 เทคนิคการเคลือบ

### 1. การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating)

เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการนำสารละลายที่เตรียมได้จากกระบวนการอื่นๆ มาทำการจุ่มเคลือบกับตัวกลางที่ต้องการ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิวของตัวกลางที่ต้องการ จึงเกิดเป็นฟิล์มบางขนาดนาโนขึ้น จากนั้นนำฟิล์มบางนาโนที่ได้ไปให้ความร้อนเพื่อให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของตัวกลางได้ดี

ในการเคลือบด้วยวิธีจุ่มเคลือบนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนในการเคลือบได้ 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 10 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เตรียมวัสดุตัวกลางเพื่อพร้อมสำหรับเคลือบผิว ล้างทำความสะอาดเพื่อพร้อมแก่การเคลือบให้สามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น
- ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (Immersion) โดยจุ่มตัวกลางลงในสารละลายที่เป็นสารเคลือบผิว 2 ชนิด ได้แก่ อนุภาคนาโนกับสารยึดเกาะ
- ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (Deposition and drainage) ในขั้นตอนนี้สารเคลือบจะทำหน้าที่ยึดเกาะกับวัสดุตัวกลาง
- ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (Evaporation) สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น อะซิโตน ในขั้นตอนการระเหยมักจะเกิดพร้อมกับขั้นที่สอง และถ้าหากอุณหภูมิสูงการระเหยก็จะเกิดได้ดีขึ้น
- การอบหรือการเผาวัสดุตัวกลาง เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจากพื้นผิวของวัสดุตัวกลางเรียบร้อยแล้ว การให้ความร้อนโดยการอบหรือการเผาตัวกลางตามอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งจะทำให้ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นของแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างตามต้องการของสารเคลือบ



รูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยสารเคลือบผิว [29]

## 2. การเคลือบผิวด้วยวิธีพ่นเคลือบ (Spray coating)

วิธีนี้สามารถตอบสนองความต้องการการผลิตแบบที่มีปริมาณมากหรือน้อยได้ เป็นวิธีที่นิยมสำหรับพื้นผิวที่ต้องการความเรียบและสม่ำเสมอสูง ข้อควรระวัง คือ การฟุ้งกระจายของตัวทำละลายในสารเคลือบที่เป็นพิษต่อร่างกาย และลุกติดไฟได้ง่าย การพ่นเคลือบแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้

- วิธี Conventional air spray เป็นการทำให้สารเคลือบถูกพ่นออกมาเป็นเม็ดเล็กๆ ด้วยแรงอัดของอากาศดังแสดงในรูปที่ 11 วิธีนี้จะสิ้นเปลืองสารเคลือบเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการฟุ้งกระจายไปในบริเวณที่ไม่ต้องการเคลือบ แต่ก็เป็นวิธีที่ง่ายกว่าวิธีการพ่นเคลือบวิธีอื่น และประสิทธิภาพของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของวัตถุที่นำมาเคลือบและความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน



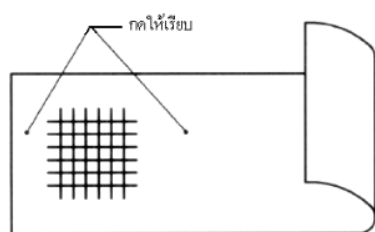
รูปที่ 11 แสดงวิธีพ่นเคลือบแบบ Conventional Air Spray [30]

- วิธี Hot spray เป็นการทำงานร่วมกับ Conventional air spray และ Heat exchanger เพื่อให้ความร้อนกับสารที่ใช้เคลือบ วิธี Hot spray สามารถเคลือบผิวให้มีความหนาได้เร็วกว่าวิธี Conventional air spray และลดการฟุ้งกระจายลง ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการติดตั้ง Heat exchanger
- วิธี Hydraulic airless spray เป็นวิธีที่ใช้ระบบไฮดรอลิกเป็นระบบอัดสารเคลือบแทนแรงอัดอากาศ สามารถใช้คู่กับ Heat exchanger ได้ ข้อดีคือลดปริมาณสารเคลือบเกินความจำเป็นโดยสามารถควบคุมปริมาณสารเคลือบเหลวในแต่ละรอบของการพ่นให้คงที่ ข้อเสียคือต้องใช้แรงดันที่มากกว่าอากาศเนื่องจากสารเคลือบมีความหนืดสูงขณะเคลือบ

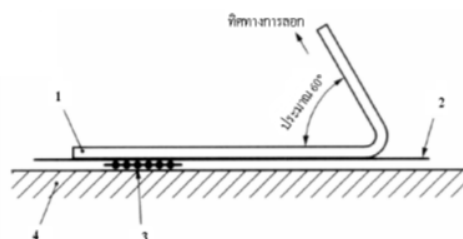
## 2.8 การทดสอบการยึดเกาะ

การทดสอบการทนต่อการยึดติดจะทดสอบโดยใช้เทคนิคการกรีดเป็นตาราง ตามมาตรฐาน มอก.285 เล่ม 47-2559 หน้า 5 [31] โดยการทดสอบการติดแน่นของแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวเป็นการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของฟิล์มบนพื้นผิววัสดุโดยจะอาศัยแรงดึงเทปใสซึ่งมีขั้นตอนของการทดสอบดังต่อไปนี้

- ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบให้ตรวจสอบความคมของใบมีด ถ้าขอบตัดของใบมีดสึกหรอให้นำไปลับใหม่หรือเปลี่ยนใบมีดใหม่
- ทำการกรีดเส้นบนผิวเคลือบด้วยแรงกดและอัตราเร็วในการกรีดที่สม่ำเสมอ เป็นจำนวน 6 เส้นโดยทุกเส้นที่กรีดจะต้องกรีดให้ทะลุผิวเคลือบจนถึงผิวแผ่นทดสอบ และระยะห่างระหว่างเส้นของการกรีดคือ 1 mm จากนั้นทำการกรีดอีก 6 เส้นอีกครั้งโดยทำมุม  $90^\circ$  กับชุดแรกจนเป็นตาราง
- ใช้แปรงขนอ่อนปัดเบาๆ ไปมาตามแนวเส้นทแยงมุมแต่ละแนวหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดผิวเคลือบที่หลุดล่อนออกจากบริเวณที่กรีด
- ตัดเทปกาวให้มีความยาว 75 mm แล้วนำไปติดลงบนตารางโดยให้ตรงกลางเทปกาวติดทับตาราง และเทปกาวขนานกับทิศทางที่กรีดเส้นด้านใดด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 12ก ใช้นิ้วมือกดเทปกาวให้เรียบเป็นความยาวอย่างน้อย 20 mm แล้วใช้นิ้วมือลูบซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้แน่ใจว่าเทปกาวติดแนบสนิท ถ้าเทปกาวติดแนบสนิทจะไม่มีฟองอากาศให้เห็น
- ให้ลอกแถบกาวภายในระยะเวลา 5 นาที หลังจากที่ติดเทปกาวเรียบร้อยแล้ว ให้ลอกเทปกาวโดยจับปลายเทปกาวด้านที่ไม่ได้ติดบนผิวเคลือบ แล้วดึงออกจังหวะเดียวภายในระยะเวลา 0.5-1 วินาที โดยทำมุมใกล้เคียงกับมุม  $60^\circ$  ให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12ข



ก



ข

รูปที่ 12 แสดงวิธีการทดสอบการยึดเกาะ [31]

(ก) แสดงตำแหน่งของเทปกาวและตำแหน่งเทปกาวที่จะลอก

(ข) แสดงตำแหน่งที่ปิดเทปกาวบนตาราง และการดึงเทปกาว

สำหรับการประเมินและการแสดงผล ให้ตรวจพินิจบริเวณที่กริดเป็นตารางในที่มีแสงสว่างเพียงพอด้วยตาหรือใช้แว่นขยาย ขณะตรวจพินิจให้หมุนแผ่นทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดการมองแสงสว่างถูกจำกัดอยู่ในทิศทางเดียว จากนั้นให้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับภาพที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะจำแนกเป็น 6 ระดับดังนี้

**ตารางที่ 1** แสดงระดับของผลการทดสอบการยึดติด

ผลการทดลอง	ลักษณะพื้นผิวเคลือบที่หลุดลอก บริเวณตาราง (ตัวอย่างกรณีกริด 6 เส้น)
ขอบเส้นเรียบสม่ำเสมอไม่มีตารางใดหลุดลอก	
ผิวเคลือบหลุดลอกเล็กน้อยที่ตำแหน่งรอยกริด ตัดกันการหลุดลอกไม่เกิน 5 % ของพื้นที่ตาราง	
ผิวเคลือบหลุดลอกตามแนวรอยกริด และ/หรือ ตำแหน่งที่ตัดกัน การหลุดลอกเกิน 5 % แต่ไม่เกิน 15 % ของพื้นที่ตาราง	
ผิวเคลือบหลุดลอกเป็นสะเก็ดขึ้นใหญ่ ตามขอบรอยกริดบางส่วนหรือหมดทุกส่วน และ/หรือ ช่องตารางต่างๆ หลุดลอกเกิน 15 % แต่ไม่เกิน 35 % ของพื้นที่ตาราง	
ผิวเคลือบหลุดลอกเป็นสะเก็ดขึ้นใหญ่ ตามขอบรอยกริด และ/หรือบางส่วนหรือทั้งช่องของตาราง การหลุดลอกเกิน 35% แต่ไม่เกิน 65 % ของพื้นที่ตาราง	
ผิวเคลือบหลุดลอกในระดับที่ไม่สามารถประเมินโดยระดับ 4 ได้	-

## 2.9 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

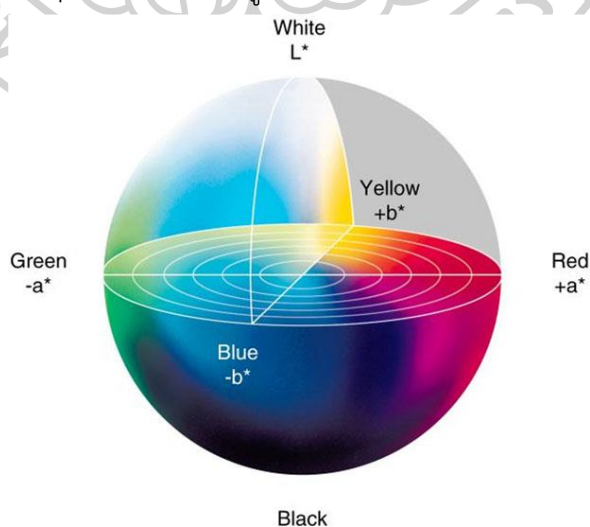
### 2.9.1 เครื่องมือที่ใช้วัดสี

การมองเห็นของมนุษย์ต่อวัตถุที่มีสีจะเป็นการมองเห็นที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในปัจจุบันมีการผลิตวัตถุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีสีขึ้นมาใหม่มากมาย หากจะระบุสีควรจะอ้างอิงจากการวัดสีที่เป็นมาตรฐานสากล ดังนั้นการวัดสีจะบอกลักษณะของสีให้เป็นที่เข้าใจในระดับสากลนั้นมีหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่นิยมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือระบบ Munsell และระบบ CIE ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงระบบ CIE ซึ่งจะใช้ในการเทียบสีของวัตถุตัวอย่าง

ระบบ CIE หรือ Commission international de l'Eclairage (CIE) เป็นระบบที่ได้พัฒนาระบบของการวัดสีที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล ระบบ CIE เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลขผ่านเครื่องมือที่ใช้คือ เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็นโค้งของการสะท้อน (Reflectance curve) โดยวัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี Reflectance curve ที่แตกต่างกันด้วย วัตถุที่มีสีแตกต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมา ก็จะมี ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันโดยที่

สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่	430 – 460 nm
สีเขียว มีความยาวคลื่นที่	500 – 580 nm
สีแดง มีความยาวคลื่นที่	620 – 780 nm

ระบบที่ใช้วัดสีบนเครื่อง UV-Vis spectrophotometer คือระบบ CIE  $L^* a^* b^*$  ซึ่งเป็นการวัดสีในลักษณะของ Color space ซึ่งแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดง Color space ของสีในระบบ CIELAB [32]

โดยกำหนดให้  $L^*$  เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100

$L^* = 0$  สีจะเป็นไปในทิศทางมืดเป็นสีดำ

$L^* = 100$  สีจะเป็นไปในทิศทางสว่างเป็นสีขาว

แกน  $a^*$  ใช้กำหนดความเป็นสีแดงหรือสีเขียว

$a^*$  เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

$a^*$  เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน  $b^*$  ใช้กำหนดความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

$b^*$  เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

$b^*$  เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน [33]

สำหรับการวัดความแตกต่างของสีตัวอย่างด้วยระบบ CIE สามารถหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่าง ค่าความสว่าง, ความเป็นสีแดง-เขียว และความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน โดยการวัดค่าสีจาก Color space ในจุดที่ 1 วัดค่าสีได้  $L1^*$   $a1^*$   $b1^*$  และจุดที่ 2 วัดค่าสีได้  $L2^*$   $a2^*$   $b2^*$  สามารถหาความแตกต่างของสีได้ดังนี้

ค่าความสว่าง  $\Delta L^* = L2^* - L1^*$

ความเป็นสีแดง-เขียว  $\Delta a^* = a2^* - a1^*$

ความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน  $\Delta b^* = b2^* - b1^*$

โดยผลของค่าความแตกต่างสามารถแปลผลได้คือ

ถ้า  $\Delta L^*$  มีค่าเป็น + แสดงว่า สีมีความสว่างเพิ่มขึ้น

$\Delta L^*$  มีค่าเป็น - แสดงว่า สีมีความมืดเพิ่มขึ้น

$\Delta a^*$  มีค่าเป็น + แสดงว่า มีความเข้มของสีแดงเพิ่มขึ้น

$\Delta a^*$  มีค่าเป็น - แสดงว่า มีความเข้มของสีเขียวเพิ่มขึ้น

$\Delta b^*$  มีค่าเป็น + แสดงว่า มีความเข้มของสีเหลืองเพิ่มขึ้น

$\Delta b^*$  มีค่าเป็น - แสดงว่า มีความเข้มของสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น

นอกจากระบบ CIE จะสามารถบอกความแตกต่างของ ค่าความสว่าง, ความเป็นสีแดง-เขียว และความเป็นสีเหลือง-สีน้ำเงิน ด้วยค่า  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  แล้ว ยังจะสามารถบอกความแตกต่างของสีโดยรวมระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ตามสมการ Total color difference ( $\Delta E$ ) [34] คือ

$$\Delta E = \sqrt{(L2^*-L1^*)^2+(a2^*-a1^*)^2+(b2^*-b1^*)^2}$$

โดยค่า  $\Delta E$  จะมีช่วงตั้งแต่ 0-100 และสามารถแปลความหมายได้ตามตารางที่ 2 [35]

ตารางที่ 2 แสดงการแปลความหมายจากค่า  $\Delta E$

Delta E ( $\Delta E$ )	Perception
$\leq 1.0$	Not perceptible by human eyes.
1 - 2	Perceptible through close observation.
2 - 10	Perceptible at a glance.
11 - 49	Colors are more similar than opposite

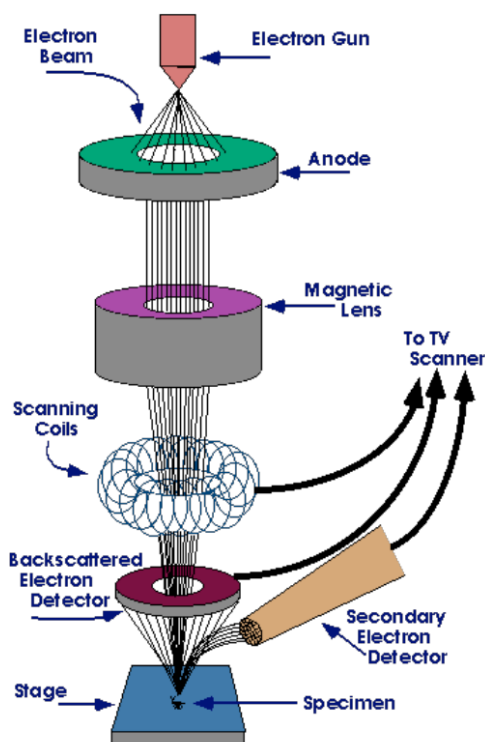




## 2.9.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และเทคนิคเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy; EDX) [36] [37]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่าจนถึง 500,000 เท่า ภาพที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ซึ่งการสร้างภาพนั้นทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของพื้นผิว เช่น ลักษณะผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วย แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) สแกนลงบนตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในห้องสุญญากาศ โดยลำอิเล็กตรอนนี้เกิดขึ้นจากการกระทำให้ขั้วแคโทดทั้งสแตนร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูงและถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่เล็ก โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุด ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้แสดงดังรูปที่ 14

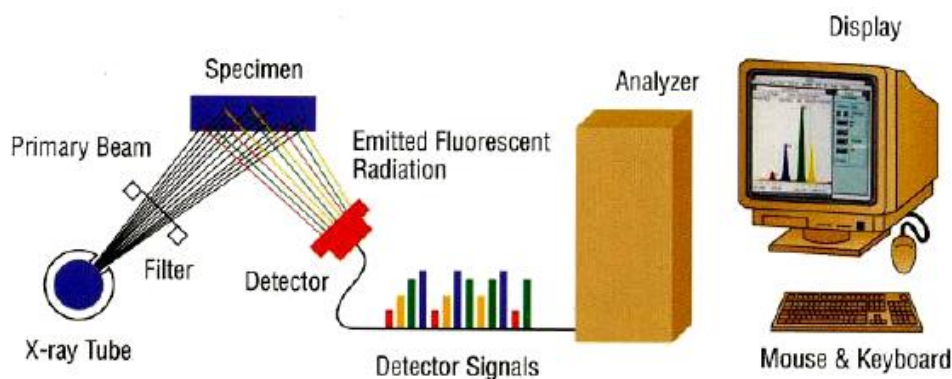


รูปที่ 14 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [38]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่าเลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกที่พื้นผิวตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปยังบนผิวของตัวอย่างซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้จะเรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะไปตกกระทบบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง โดยทำให้อิเล็กตรอนของสารตัวอย่างหลุดออกจากวงโคจรและจะเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้ว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) โดยสามารถศึกษาลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างได้จากหัววัดสัญญาณ (Detector) รับอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้และนำไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพ ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นได้แก่

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่นำมาสร้างเป็นภาพได้มากที่สุด
- อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Backscattered electron) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และจะให้ข้อมูลลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว

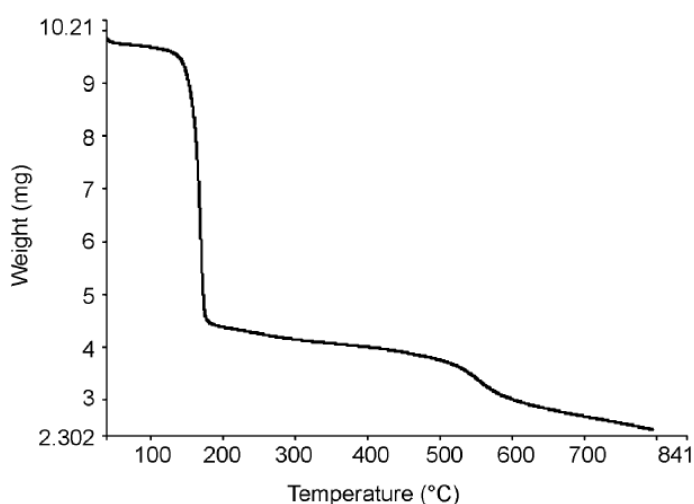
การใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุจากพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารที่กำลังศึกษา ซึ่งหลักการทำงานของ EDX เมื่อให้ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตกกระทบกับอะตอมพื้นผิวของสารตัวอย่างจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นในหลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกจะมาแทนที่คายพลังงานที่มีความถี่สูงออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเป็นแสงสีเดียว (คลื่นความถี่เดียว) โดยพลังงานที่คายออกมาจะมีค่าเฉพาะเจาะจงกับชนิดของอะตอม หรือลักษณะเฉพาะของธาตุองค์ประกอบของตัวอย่าง ดังนั้นเครื่องสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงานสามารถใช้หาส่วนประกอบทางเคมีของผิวหน้าได้ สำหรับการแสดงผลการวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพโดยโปรแกรมสำเร็จรูปดังแสดงรูปที่ 15



รูปที่ 15 องค์ประกอบของเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy; EDX [39]

### 2.9.3 การวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) [40]

เทอร์โมกราวิเมตรี (Thermogravimetry) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบมวลของสารตัวอย่างเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ โดยการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิให้แก่สารตัวอย่างนั้นในบรรยากาศเฉพาะตัว ส่วนใหญ่เรียกว่าการวิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) ใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือเครื่องชั่งสารเชิงความร้อน (Thermobalance) หรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โดยวิธีชั่งน้ำหนักเชิงความร้อน (Thermogravimetric analyzer) ถ้าต้องการระบุขั้นตอนของเส้นเคิร์ฟ TG ก็ใช้วิธีลากเส้นแบบอนุพันธ์ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัดและให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้มักจะเรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอร์โมกราวิเมทริก อะนาลิซิส” (Derivative thermogravimetric analysis; DGT) ซึ่งหมายถึงการพล็อตอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา ( $dm/dt$ ) ดังแสดงในรูปที่ 16



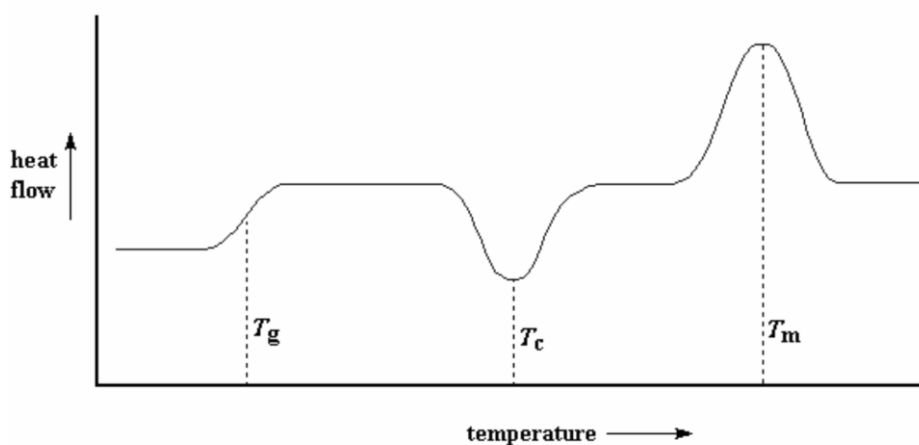
รูปที่ 16 แสดงลักษณะของกราฟ TGA [41]

#### 2.9.4 ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry; DSC) [40]

ดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry; DSC) เป็นเทคนิคที่ใช้วัดค่าความแตกต่างของการไหลความร้อน (Heat flow;  $\Delta P$ ) เข้าสู่สารตัวอย่างและสารอ้างอิงรวมทั้งภาชนะที่ใช้บรรจุสารเหล่านั้นด้วยเทียบกับเวลา หรืออุณหภูมิ ขณะที่ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิให้กับสารตัวอย่างไว้ในบรรยากาศใดๆ ที่จำเพาะเจาะจงเช่นเดียวกัน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่บรรจุอยู่ในภาชนะนั้นๆ เหมือนกัน และ DSC สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

- Power-compensated DSC หรือเป็นเครื่องมือที่มีระบบทดพลังงาน โดยให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างและสารอ้างอิงแยกกัน ใช้แหล่งให้ความร้อนคนละตัวแล้วควบคุมให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์ ขณะที่วัดความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ใช้รักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันไว้
- Heat flux DSC เป็นเครื่องมือที่มีระบบให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างและสารอ้างอิงจากแหล่งเดียวกัน แล้ววัดอุณหภูมิความแตกต่าง  $\Delta T$  จากนั้นจึงเปลี่ยนสัญญาณที่ได้ไปเป็นความแตกต่างของกำลังไฟฟ้า  $\Delta P$  โดยใช้ระบบแปลงสัญญาณทางแคลอริเมทรี

สำหรับตัวอย่างกราฟ DSC ที่พล็อตระหว่าง Heat flow กับอุณหภูมิได้แสดงดังรูปที่ 17

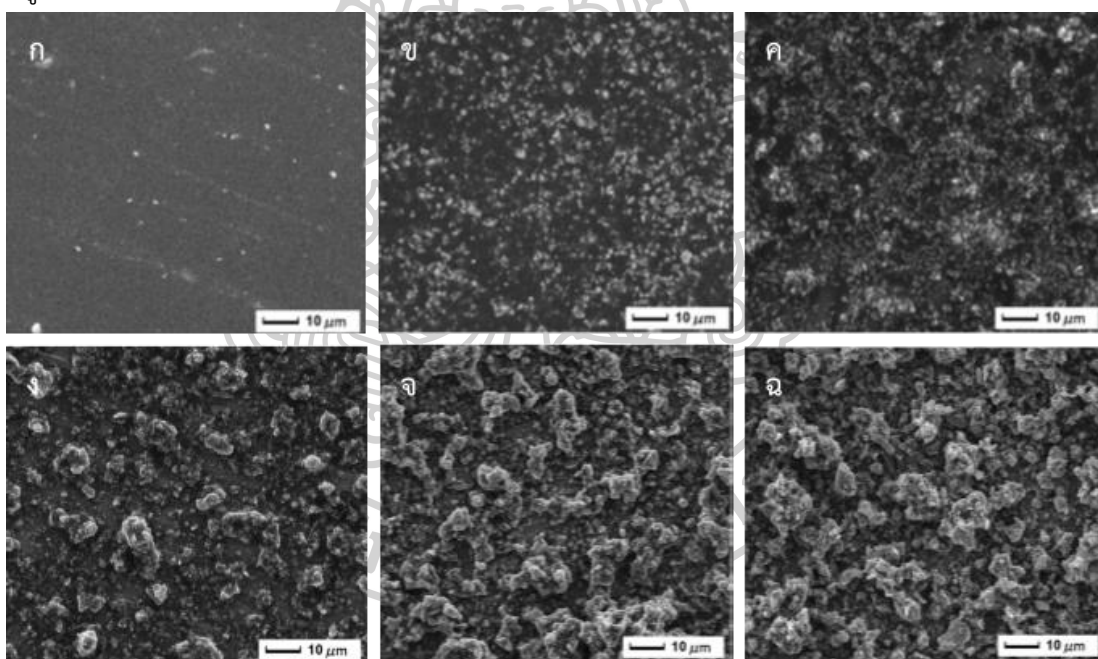


รูปที่ 17 แสดงตัวอย่างกราฟ DSC ที่พล็อตระหว่าง Heat flow กับอุณหภูมิ [42]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

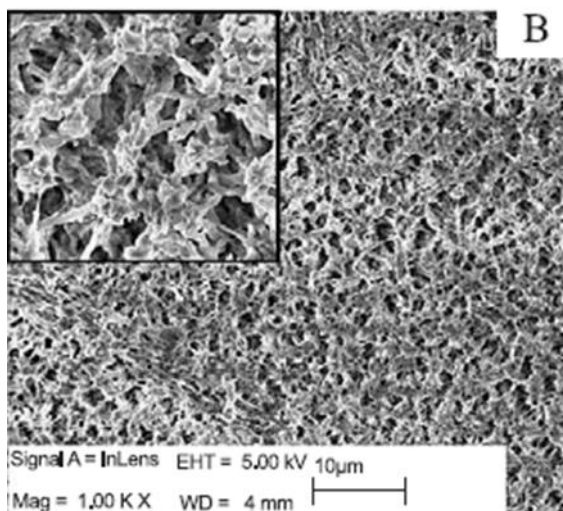
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นจะเป็นงานวิจัยทางด้านพื้นผิว เพื่อเตรียมพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นโดยมีการวิจัยก่อนหน้า ดังนี้

Yongcai Tang และคณะ [43] ได้เตรียมพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำโดยใช้วิธีฉีดพ่นลงบนพื้นผิวต่างๆ ซึ่งเตรียมจากพอลิยูเทนที่เป็นสารยึดติด และ Molybdenum disulfide ( $\text{MoS}_2$ ) ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $\text{MoS}_2$  ให้เพิ่มขึ้นความขรุขระของพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถตรวจสอบโดยใช้ SEM ดังรูปที่ 18 และการเพิ่มอัตราส่วนของ  $\text{MoS}_2$  ที่มากขึ้นยังทำให้มุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย สำหรับอัตราส่วนที่ใช้สูงสุดในงานวิจัยนี้คือ 55.6%  $\text{MoS}_2$  ผลการทดลองพบว่าได้พื้นผิวที่ขรุขระที่ให้ความไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวด ซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำมากถึง  $157^\circ$  สำหรับการทดสอบการขีดข่วนของพื้นผิวแล้วยังพบว่าพื้นผิวที่เคลือบ PU/ $\text{MoS}_2$  นั้นยังคงแสดงความไม่ชอบน้ำอยู่ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 18 ภาพ SEM แสดงความขรุขระของพื้นผิวของ PU ที่มีการเพิ่มอัตราส่วนของ  $\text{MoS}_2$  [43]

ต่อมาได้มีการเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำโดยใช้แม่แบบ Porous anodic alumina (PAA) ร่วมกับพอลิยูรีเทนโดย Xingke Zhao และคณะ [44] फिल्मที่ได้จากแม่แบบจะถูกตรวจสอบลักษณะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการศึกษาพื้นผิว และพบว่าพื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 19 โดยได้ค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยอยู่ที่  $152^\circ$

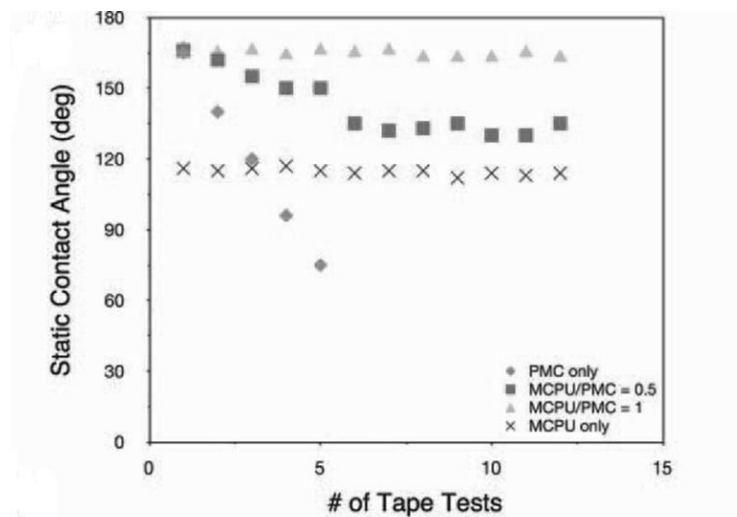


รูปที่ 19 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PU ที่ใช้แม่แบบ PAA [44]

Zhaofeng Wu และคณะ [45] ได้เตรียม Hydroxyl-silicone-oil modified microscale tourmaline particles (HTP) ร่วมกับซิลิกานาโนพาทิเคิล ( $\text{SiO}_2\text{-NPs}$ ) โดย  $\text{SiO}_2\text{-NPs/HTP/PU}$  และ HTP/PU ได้ถูกพ่นเปรียบเทียบกับฟิล์ม Waterborne polyurethane (WPU) ด้วยวิธีพ่นเคลือบ และปล่อยให้เซตตัวในอุณหภูมิห้องจากนั้นนำไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่ามีความ  $165^\circ$  และ  $157^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้ทำให้ได้พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวด วิธีการทดลองที่ง่าย ราคาถูก สามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำขนาดใหญ่ได้ สำหรับการศึกษการเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวดที่มีราคาถูกลำบากสำหรับงานที่ต้องการพื้นผิวแบบไม่ชอบน้ำขนาดใหญ่ได้ William S. Y. Wong และคณะ [46] ได้เตรียมพอลิยูรีเทนร่วมกับ Poly(methyl methacrylate) คอมโพสิตกับ Fluoro-functionalized nanostructured silica ( $\text{F-SiO}_2$ ) ผ่านการพ่นเคลือบลงบนพื้นผิว ทำให้เกิดพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวดที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงถึง  $160^\circ$  และให้ค่ามุมสไลด์ของน้ำที่น้อยกว่า  $10^\circ$  อีกด้วย และยังได้ทดสอบการดูดซับพบว่าพื้นผิวที่ปรับปรุงสามารถทนการดูดซับได้ถึง 200 รอบ นอกจากนี้ยังผ่านการทดสอบผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตโดยการให้ความเข้มแสงยูวีซี (UVC) ที่ 254 nm เป็นเวลา 50 ชั่วโมง และการทนการกัดกร่อนของกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พื้นผิวยังคงให้สมบัติไม่ชอบน้ำ

สำหรับการเตรียมพื้นผิวไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวดให้มีความมุมสัมผัสของน้ำมากถึง  $160^\circ$  ของ Adam Steel และคณะ [47] ได้ทำการคอมโพสิตระหว่างพอลิยูรีเทนกับ Waterborne perfluoroalkyl methacrylic โคพอลิเมอร์ และมอนต์โมลิโลไนท์ (Montmorillonite) ทำการเคลือบผิวโลหะอะลูมิเนียมด้วยวิธีพ่นเคลือบ ทำให้พื้นผิวใหม่ที่ได้มีคุณสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของน้ำและการทำความสะอาดตัวเอง สำหรับผลการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบทางกลุ่มผู้วิจัยได้เลือกทดสอบด้วยเทปกาว (Tape testing method) ด้วยแรง 1750 N/m เป็นจำนวน 12 ครั้ง

พบว่า การเคลือบยังคงยึดติดกับพื้นผิวได้ดียังให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่มากกว่า  $150^{\circ}$  เมื่อใช้ Moisture-cured polyurethanes (MCPUs) ร่วมกับ Waterborne perfluoroalkyl methacrylic copolymer (PMC) ที่อัตราส่วน MCPU/PMC = 1 ดังรูปที่ 20 นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม MCPU/PMC ที่ Adam Steel และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นสามารถทนต่อการขัดถูได้มากถึง  $3850 \text{ N/m}$  จากเทปกาว



รูปที่ 20 แสดงการทดสอบการยึดติดของฟิล์ม MCPU/PMC [47]

นอกจากนี้ Guang Yang และคณะ [48] เตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำแบบยิ่งยวด โดยเตรียมพอลิยูรีเทนคอมโพสิตกับซิลิกานาโนพาทิเคิลเคลือบโดยใช้เทคนิคแม่แบบใช้กระดาษทรายเป็นแม่แบบ และได้ทำการเปรียบเทียบพื้นผิวระหว่างพอลิยูรีเทนที่ใช้แม่แบบเป็นกระดาษทราย กับพอลิยูรีเทนที่มีอนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้เพียง 4%wt พบว่าได้มุมสัมผัสของน้ำสูงถึง  $102^{\circ}$  และ  $150^{\circ}$  ตามลำดับ

### บทที่ 3

#### เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- กล้องจุลทรรศน์ USB (USB Microscope) (ยี่ห้อ SHODENSHA รุ่น TG500PC2, ญี่ปุ่น)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) (ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3, สาธารณรัฐเช็ก)
- กล้องถ่ายภาพดิจิทัล (Digital camera) (ยี่ห้อ Canon รุ่น 80D, ญี่ปุ่น)
- เกจวัดความหนาแบบดิจิทัล (Thickness gauge) (ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น M-547-400S, ญี่ปุ่น)
- เครื่องเคลือบตัวอย่าง (Sputter coater) (ยี่ห้อ Balzers รุ่น SCD040, ลิกเตนสไตน์)
- เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ Analytical 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AB 204, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ Top loading 2 ตำแหน่ง (Top loading balance) (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PB 1502, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Pyris Diamond, สหรัฐอเมริกา)
- เครื่องวัด Tensile (ยี่ห้อ Narin Testing)
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) (ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary 60, สหรัฐอเมริกา)
- เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Pyris 1, สหรัฐอเมริกา)
- เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น PinAAcle 900F, สหรัฐอเมริกา)
- เครื่องโฮโมจีไนซ์ (Homogenizer) (ยี่ห้อ IKA® รุ่น RW 20 digital)
- ตู้อบ (Oven) (ยี่ห้อ รุ่น UM-500, เยอรมันนี)
- ปัมลมแบบลูกสูบชนิดโรตารี (Piston compressor) (ยี่ห้อ Zinsano รุ่น ACP13050)
- อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Infrared spectrometer) (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum 100, สหรัฐอเมริกา)



### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- กรวยกรอง (Glass funnel)
- กระบอกฉีดน้ำกัลัน (Wash bottle)
- กระบอกตวง (Measuring cylinder)
- กระเบื้องโมเสก (Mosaic tile)
- กากพ่นสี (Spray gun)
- แก้วกระดาษ (Paper cup)
- ขวดเก็บสารเคมี (Reagent flask)
- ขวดแก้วเล็ก (Vial)
- ขวดปริมาตร (Volumetric flask)
- คีมคีบ (Forceps)
- จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- ตู้ควบคุมความชื้น (Humidity control cabinet)
- ถ้วยครุฑูชีเบิล (Gooch crucible)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- แท่งคนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- ปีกเกอร์ (Beaker)
- เบ้าหล่อพอลิเมอร์แบบกระดุก (Tensile specimen mould)
- ปิเปตทิป (Pipette tips)
- ปิเปตแบบตวง (Measuring pipette)
- ไมโครปิเปต (Micropipette)
- ลูกยางดูดปิเปต (Pipette bulb)
- หลอดหยด (Pasteur pipette)

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- Boric acid powder ( $H_3BO_3$ ) (MAY & BAKER Ltd)
- Calcium chloride dihydrate ( $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ) (Riedel-de Haën)
- Cobalt (II) nitrate ( $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) (UNIVAR)
- Copper (II) sulfate ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) (Riedel-de Haën)
- Dipotassium phosphate ( $K_2HPO_4$ ) (Fluka)
- Epoxyresin part A (BRP'CARBON)
- Epoxyresin part B (BRP'CARBON)
- Ethanol 95 % (v/v) ( $C_2H_5OH$ ) (โรงงานสุรา กรมสรรพสามิต)
- Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) (Fluka)
- Hydrophobic Fumed Silica (AEROSIL® R 972) (Universal Selector)
- Iron (II) sulfate heptahydrate ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) (Carlo Erba Reagent)
- Magnesium sulfate heptahydrate ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) (Fluka)
- Manganese(II) chloride ( $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ ) (Carlo Erba Reagent)
- Molybdenum trioxide ( $MoO_3$ )
- Polydimethylsiloxane (PDMS)
- Polyurethane part A (TOA)
- Polyurethane part B (TOA)
- Potassium dihydrogen phosphate ( $KH_2PO_4$ ) (Fluka)
- Potassium hydroxide (KOH) (Ajex Finechem)
- Sodium chloride (NaCl) (SIGMA-ALDRICH)
- Sodium hydroxide (NaOH) (CARLO ERBA)
- Sodium nitrate ( $NaNO_3$ )
- Stearic acid (Fluka)
- Sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) (Ajax Finechem Pty Ltd.)
- Thinner 43N (TOA)

Butyl acetate	45-50%
Ethelene glycol monoethyl-ether	10-20%
Toluene	10-15%
Xylene	10-15%

- Titaniumdioxide nanoparticles (TiO<sub>2</sub>)
- Zinc oxide (ZnO) (Cernic international CO., LTD.)
- Zinc sulfat (ZnSO<sub>4</sub> • 7H<sub>2</sub>O)



### 3.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### ตารางที่ 3 แสดงภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

หัวข้อการดำเนินงานวิจัย	รายละเอียดการดำเนินงานวิจัย
1. การหาสาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโมเสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์</li> <li>• การทดสอบความทนต่อสารเคมีของแผ่นโมเสก</li> <li>• การวิเคราะห์หมุ่สัมผัสน้ำของแผ่นโมเสก</li> <li>• การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโมเสกด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์</li> <li>• การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโมเสก</li> <li>• การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโมเสก</li> <li>• การวิเคราะห์หาสาเหตุจากตัวอย่างคราบหินปูนและตัวอย่างน้ำฝน</li> </ul>
2. การหาสารเคลือบผิว อนุภาคนาโน และสูตรเคลือบผิว	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การหาพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว</li> <li>• การหาอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ</li> <li>• การหาวิธีเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคนาโน</li> <li>• การหาสภาวะของการพ่นเคลือบ</li> </ul>
3. การศึกษาสมบัติการทนต่อสภาวะต่างๆ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การทดสอบความโปร่งใสของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิว</li> <li>• การทดสอบความทนน้ำของสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบความทนต่อกรดของสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบความทนต่อเบสของสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบความทนต่อความร้อนของสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบความทนต่อแสง UV ของสารเคลือบ</li> <li>• การทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ</li> </ul>

### 3.4.1 การหาสาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์

#### 3.4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโมเสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์

วัสดุโมเสกที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้จากการสำรวจพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ แผ่นโมเสกมาจากบริเวณพื้นผิวที่ประกอบขององค์พระมหาธาตุเจดีย์ โดยตัวอย่างโมเสกที่ใช้ประกอบองค์พระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์เป็นแผ่นโมเสกมีลักษณะของสีที่แตกต่างกัน 5 ชนิด สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของสีที่แตกต่างกันของโมเสกทั้ง 5 ชนิดได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลชนิด DSLR ยี่ห้อ CANON รุ่น 80D ทำการถ่ายภาพทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นโมเสก

สำหรับวิเคราะห์ลักษณะของสีของแผ่นโมเสกจะอาศัยการหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Diffused Reflectance Ultraviolet-visible Spectrometer (DRS) ทำการตรวจวัดในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 360 nm ถึง 830 nm โดยใช้การรายงานค่าระบบสีเป็น CIE D65 จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่า  $L^*$  (เป็นค่าความสว่าง), ค่า  $a^*$  และค่า  $b^*$  ของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด

#### 3.4.1.2 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของแผ่นโมเสก

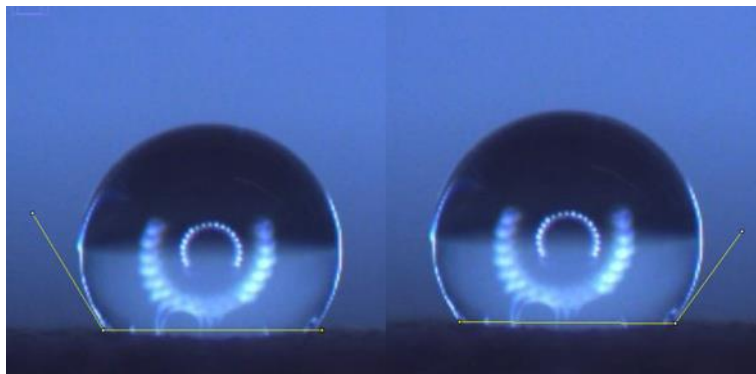
สารเคมีเบื้องต้นที่ใช้ทดสอบความทนต่อสารเคมี และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นต่อน้ำยาทำความสะอาดพื้นผิวชนิดต่างๆ ของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ ได้แก่ 10%  $H_2O_2$ , 5%  $H_2O_2$ , Acetone, 95% Ethanol, น้ำยาล้างห้องน้ำ (HCl), สารฟอกขาว (NaOCl) และน้ำยาฆ่าเชื้อ (Dettol) แผ่นโมเสกจะถูกทดสอบโดยการนำก้อนสำลีชุบไปที่สารละลายดังกล่าวแล้วทำการป้ายลงบนแผ่นโมเสกจากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแผ่นโมเสก

สำหรับสารละลายอีกสองชนิดที่จะทำการทดสอบความทนต่อสารเคมี คือ คลอโรฟอร์ม (Chloroform;  $CHCl_3$ ) และไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane;  $CH_2Cl_2$ ) ทำการทดลองโดยทำการตวงสารละลายทั้งสองชนิดปริมาตร 40 ml ใส่ภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดอย่างละขวด จากนั้นนำแผ่นโมเสกตัวอย่างลงไปแช่ในสารละลายเป็นเวลา 7 วัน และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแผ่นโมเสก

#### 3.4.1.3 การวิเคราะห์มุมสัมผัสน้ำของแผ่นโมเสก

การวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle, CA) ใช้ไมโครปิเปตหยดน้ำกลั่นปริมาตร 2.00  $\mu$ L ลงบนแผ่นโมเสกตัวอย่าง จากนั้นทำการเก็บภาพถ่ายโดยใช้ USB Microscope โดยให้กล้องทำมุม  $90^\circ$  กับหยดน้ำที่อยู่บนพื้นผิวโมเสก เมื่อได้รูปหยดน้ำแล้วให้ทำการวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ การวัดมุมสัมผัสของน้ำจะวัดโดยใช้เครื่องมือ Angle tool วัดมุมด้านซ้ายและมุม

ด้านขวาแสดงดังรูปที่ 21 จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของมุม ทำการวัดมุมสัมผัสของน้ำทั้งหมดจำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 21 แสดงการวัดมุมสัมผัสของน้ำ

#### 3.4.1.4 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโม่เสกด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โม่เสกสีทอง, โม่เสกสีน้ำตาล, โม่เสกสีเทาเข้ม, โม่เสกสีเทาอ่อน และโม่เสกสีม่วง จะถูกตรวจสอบด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared spectrometer) โดยใช้โหมด ATR แผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิดจะถูกนำไปวางบนแท่นวางสารตัวอย่าง จากนั้นจะทำการตรวจวัดที่เลขคลื่นช่วง  $3500\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $650\text{ cm}^{-1}$  และเลือกแสดงผลข้อมูลแบบ %T ทำการพล็อตกราฟและเปรียบเทียบเลขคลื่นของแผ่นโม่เสก

#### 3.4.1.5 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโม่เสก

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โม่เสกสีทอง, โม่เสกสีน้ำตาล, โม่เสกสีเทาเข้ม, โม่เสกสีเทาอ่อน และโม่เสกสีม่วง แผ่นโม่เสกทั้ง 5 จะถูกทุบให้มีขนาดเล็กกว่า  $1 \times 1\text{ cm}$  เลือกชิ้นส่วนของแผ่นโม่เสกชนิดละ 1 ชิ้น นำไปเคลือบด้วยทอง จากนั้นแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิดจะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น MIRA3 โดยศึกษาบริเวณ Surface และ Cross section

เมื่อทำการศึกษาด้วย SEM เสร็จสิ้นแล้วแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิดจะถูกวิเคราะห์ธาตุที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปของแผ่นโม่เสกด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy หรือ EDX โดยจะสุ่มเลือกจุดบนภาพที่ได้จาก SEM เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของธาตุ

### 3.4.1.6 การวิเคราะห์สมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโม่เสก

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โม่เสกสีทอง, โม่เสกสีน้ำตาล, โม่เสกสีเทาเข้ม, โม่เสกสีเทาอ่อน และโม่เสกสีม่วง จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยเริ่มจากการชั่งตัวอย่างโม่เสกแต่ละชนิดให้เป็นผงประมาณ 3-5 mg จากนั้นนำผงโม่เสกที่ชั่งได้ไปบรรจุใน DSC sample pan ทำการอัดบรรจุให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์บนเครื่อง DSC จะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 45°C - 250°C ด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10°C/นาที

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด จะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) แผ่นโม่เสกแต่ละชนิดจะถูกชั่งให้เป็นผงปริมาณ 7-9 mg จากนั้นนำผงโม่เสกที่ชั่งออกมาได้ไปบรรจุใน TGA sample pan จากนั้นทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ในช่วงอุณหภูมิ 50°C - 800°C ด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20°C/นาที

### 3.4.1.7 การวิเคราะห์หาสาเหตุจากตัวอย่างคราบหินปูน และตัวอย่างน้ำฝน

การวิเคราะห์คราบหินปูนตัวอย่างพร้อมทั้งปูนยาแนวที่ถูกเก็บมาจากบริเวณทางขึ้นของพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์ โดยคราบหินปูนและปูนยาแนวที่เก็บได้จะถูกนำไปเคลือบด้วยทอง และจะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยศึกษาบริเวณ Surface และ Cross section เมื่อทำการศึกษาดูด้วย SEM เสร็จสิ้นแล้วคราบหินปูนตัวอย่างและปูนยาแนวจะถูกวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectroscopy หรือ EDX โดยจะสุ่มเลือกจุดบนภาพที่ได้จาก SEM เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของธาตุ

การวิเคราะห์น้ำฝนตัวอย่างที่ถูกเก็บมาจากบริเวณพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์ จะถูกนำมาวัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อย่างง่ายด้วย Universal pH paper เพื่อเปรียบเทียบความเป็นกรดต่างของน้ำฝนตัวอย่าง และน้ำฝนตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) โดยอาศัยวิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0, 3, 4, 6, 8, 10 และ 13 ppm น้ำฝนตัวอย่างปริมาตร 3.00 ml จะถูกเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 25.00 ml แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืน โดยมีค่าระดับการเจือจาง (Dilution factor) เท่ากับ 8.33

### 3.4.2 การหาสารเคลือบผิว อนุภาคนาโน และสูตรเคลือบผิว

#### 3.4.2.1 การหาพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว

ความใสของสารยึดเกาะเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยสารยึดเกาะนั้นต้องมีสมบัติที่ให้ความใสเมื่อเคลือบไปบนพื้นผิว และต้องไม่เกิดการบดบังสีหรือคุณสมบัติเดิมของพื้นผิว พอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) และพอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) พอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห ทนต่อสารเคมี และสภาพแวดล้อมภายนอก โดยทำการหล่อลงเข้าหล่อและเปรียบเทียบความใสของพอลิเมอร์ทั้งสอง



รูปที่ 22 แสดงสารยึดเกาะที่ใช้ในงานวิจัย (ซ้าย) อีพ็อกซีเรซิน (ขวา) พอลิยูรีเทน

ทำการหล่ออีพ็อกซีเรซิน และพอลิยูรีเทน ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม (ระบุมาช้างขวดสารเคมี) เทลงบนแม่พิมพ์ (Dog-bone mold) เตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบความใส ผสมโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างเรซิน (Part A) กับตัวทำให้แข็ง (Part B) ดังตารางที่ 4 โดยเทลงบนแม่พิมพ์แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อหาอัตราส่วนของการผสมที่ดีที่สุดของสารยึดเกาะ

ตารางที่ 4 อัตราส่วนการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซิน และพอลิยูรีเทน (Part A : Part B)

สูตรที่	อีพ็อกซีเรซิน		พอลิยูรีเทน	
	Part A (g)	Part B (g)	Part A (g)	Part B (g)
1	5	0.50	8	0.5
2	5	0.75	8	1.0
3	5	1.00	8	1.5
4	5	1.25	8	2.0
5	5	1.50	8	2.5
6	5	1.75	8	3.0
7	5	2.00	8	3.5
8	5	2.25	8	4.0
9	5	2.50	8	4.5
10	5	2.75	8	5.0



### 3.4.2.2 การหาอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ

อนุภาคนาโนจำนวน 3 ชนิดได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  (Hydrophobic fumed silica) ไปเผาที่  $800^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากสารเย็นตัวลงประมาณ 24 ชั่วโมง เก็บที่อุณหภูมิห้องไว้ในกล่องที่มีการควบคุมความชื้นที่ 30%RH ด้วยสารดูดความชื้น

อนุภาคนาโนทั้ง 3 ชนิดจะถูกทดสอบกับทินเนอร์ซึ่งเป็นตัวทำละลายของพอลิยูรีเทน โดยเริ่มจากการเตรียม 10 phr  $\text{ZnO}$  ในตัวทำละลายทินเนอร์, 10 phr  $\text{TiO}_2$  ในตัวทำละลายทินเนอร์ และ 10 phr  $\text{SiO}_2$  ในตัวทำละลายทินเนอร์ ลงในขวดแก้วเล็ก (Vial) ศึกษาการกระจายตัวในตัวทำละลายเป็นเวลา 15 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพ

### 3.4.2.3 การหาวิธีเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคนาโน

#### วิธีการจุ่มเคลือบ

วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเคลือบผิววิธีหนึ่ง ซึ่งการทดลองนี้ได้ดัดแปลงมาจากการทดลองของ Zhang Xin และคณะ [49] สำหรับการทดลองนี้จะใช้พอลิยูรีเทนเป็นตัวยึดเกาะในการทดสอบ และใช้อนุภาคนาโนที่เป็น  $\text{ZnO}$  ออกไซด์มาปรับปรุงในการทำให้พื้นผิวไม่ชอบน้ำ โดยนำพอลิยูรีเทนเรซิน (Part A) ผสมกับตัวเพิ่มความแข็ง (Part B) และ  $\text{ZnO}$  ลงไปในตัวทำละลายอะซิโตน กวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำโมเสกมาจุ่มเคลือบ จากนั้นนำไปอบให้แห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมงที่  $85^\circ\text{C}$  นำตัวอย่างหลังจากการอบแห้งแช่ลงใน 5%wt Stearic acid/ethanol เพื่อเป็นการปรับพื้นผิวให้มีความขรุขระมากขึ้น โดยสูตรสารเคลือบจะเตรียมโดยมีอัตราส่วนดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงสูตรสารเคลือบที่ทดสอบโดยวิธีการจุ่มเคลือบ

สารเคมี	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
PU resin	6 g	6 g
Hardener	2 g	2 g
ZnO	-	6 g
Solvent (acetone)	22 ml	22 ml

### วิธีการทา

เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) : Thinner (Part C) เป็น 8 : 2 : 2 กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที พร้อมกับเติมสารที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มเข้าไปดังนี้

สูตรที่ 1 ไม่มีการเติมสารไม่ชอบน้ำเพิ่ม

สูตรที่ 2 เติม  $\text{TiO}_2$  nanoparticle ปริมาณ 0.1 phr

สูตรที่ 3 เติม Hydrophobic fumed silica ปริมาณ 0.1 phr

สูตรที่ 4 เติม Polydimethylsiloxane (PDMS) ปริมาณ 2 phr

สูตรที่ 5 เติม  $\text{TiO}_2$  NPs ปริมาณ 0.1 phr และ PDMS ปริมาณ 2 phr

จากนั้นนำไปเคลือบบนแผ่นโมเสกโดยการทา และทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ  $85^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที รอให้โมเสกเย็นตัวแล้วนำไปวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำ

### วิธีการพ่นเคลือบ

การเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีการพ่นเคลือบจะทำการเตรียม 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้

- ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 4 phr, 10 phr, 14 phr และ 20 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด
- ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที

จากนั้นนำ 4 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2 g ผสมกับ ส่วนที่ 2 ปริมาณ 2 g ในแก้วกระดาษใช้ไม้กวนกวนสารให้เข้ากัน แล้วนำไปบรรจุในกาพ่นสีที่ต่อกับปั๊มลมที่มีตัวดักอากาศอยู่ จากนั้นทำการพ่นไปที่โมเสกในตู้ดูดควัน ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำ ทำการพ่น 10 phr, 14 phr และ 20 phr เช่นเดียวกับการพ่น 4 phr



รูปที่ 23 อุปกรณ์ที่ใช้พ่นเคลือบและลักษณะการพ่นเคลือบ

#### 3.4.2.4 การหาสภาวะของการพ่นเคลือบ

##### การหาปริมาณ HFS ที่สามารถพ่นเคลือบได้

ทำการเตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 4 phr, 6 phr, 8 phr, 10 phr, 12 phr, 14 phr, 16 phr, 18 phr และ 20 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮมจิเนสท์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที นำ HFS ที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นไปบรรจุในกาพ่นสีที่ต่อกับปั๊มลมที่มีตัวดักอากาศอยู่ จากนั้นทำการทดสอบการพ่นในตู้ดูดควัน

นำ HFS ที่เหลือในแต่ละความเข้มข้นมาใส่ขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial) สังเกตการกระจายตัว และสังเกตความใสของ HFS ใน Thinner

##### การหาเทคนิคการพ่นเคลือบ

###### 1. เทคนิคการพ่นเคลือบแบบธรรมดา

เตรียมสารเป็น 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้

- ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 10 phr, 12 phr และ 14 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮมจิเนสท์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด
- ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที

จากนั้นนำ 10 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2 g ผสมกับ ส่วนที่ 2 ปริมาณ 2 g ในแก้วกระดาษใช้ไม้กวนกวนสารให้เข้ากัน แล้วนำไปบรรจุในกาพ่นสีที่ต่อกับปั๊มลมที่มีตัวดักอากาศอยู่ จากนั้นทำการพ่นไปที่โมเสกในตู้ดูดควัน ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดค่าความสัมผัสน้ำ ทำการพ่น 12 phr และ 14 phr เช่นเดียวกับการพ่น 10 phr

###### 2. การพ่นเคลือบแบบ Base – top coat

เตรียมสารเป็น 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้

- ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 10 phr, 12 phr และ 14 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮมจิเนสท์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด
- ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที

จากนั้นนำพอลิยูรีเทนในส่วนที่ 2 ประมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกให้ทั่ว และในขณะที่พอลิยูรีเทนกำลังเซ็ดตัวให้รับนำ 10 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2

g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบอยู่ (ทำการพ่นไปที่โมเสกในตู้ดูดควัน) ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำ ทำการพ่น 12 phr และ 14 phr เช่นเดียวกับการพ่น 10 phr

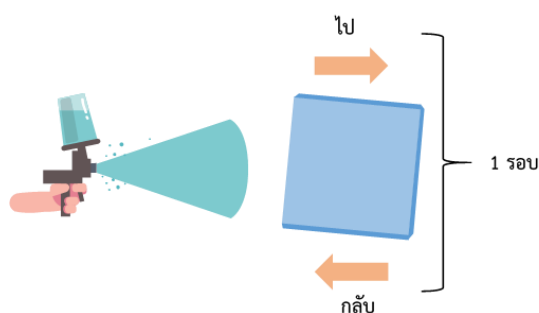
หลังจากการวัดมุมสัมผัสของโมเสกที่ทำการเคลือบแล้ว แผ่นโมเสกจะถูกทำการเคลือบนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยที่จะนำแผ่นโมเสกที่ถูกเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ของการเคลือบด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบแบบธรรมดา และการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat จะถูกเลือกชิ้นส่วนของแผ่นโมเสกชนิดละ 1 ชิ้น นำไปเคลือบด้วยทอง แผ่นโมเสกจะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยศึกษาบริเวณ Surface

#### การหาจำนวนรอบของการพ่นเคลือบ

เตรียมสารเป็น 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้

- ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 10 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮโมจีไนซ์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด
- ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที

จากนั้นนำพอลิยูรีเทนในส่วนที่ 2 ประมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกให้ทั่ว และในขณะที่พอลิยูรีเทนกำลังเซ็ดตัวให้รับน้ำ 10 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบอยู่ ทำการพ่นซ้ำไปขวา (ไปและกลับ) นับเป็นการพ่น 1 รอบโดยภาพจำลองการนับรอบของการพ่นเคลือบได้แสดงดังรูปที่ 24 (ทำการพ่นไปที่โมเสกในตู้ดูดควัน) ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำ สำหรับการพ่น 2, 3, 4 และ 5 รอบให้ทำเช่นเดียวกับการพ่น 1 รอบโดยทำการพ่นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 24 แสดงภาพจำลองการนับรอบของการพ่นเคลือบ

### การพ่นเคลือบในสถานะที่มีความชื้น

การเตรียมตู้ควบคุมความชื้นจะถูกเตรียม 2 ระบบ คือ

- ระบบที่ 1 จะเตรียมโดยการนำบีกเกอร์ที่มีน้ำปริมาตร 500 ml ไปแช่ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน ทำการวัดความชื้นในหน่วย %RH ก่อนทำการพ่น
- ระบบที่ 2 จะเตรียมโดยการฉีดละอองน้ำปริมาตร 10 ml ด้วยกระบอกฉีดน้ำ ฉีดไปในตู้ควบคุมความชื้น ทำการวัดความชื้นในหน่วย %RH ก่อนทำการพ่น

การเตรียมสารเคลือบและการพ่นเคลือบ จะเตรียมสารเป็น 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้

- ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 10 phr, 12 phr และ 14 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮมจิไนซ์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด
- ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที

จากนั้นนำพอลิยูรีเทนในส่วนที่ 2 ประมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกให้ทั่วในตู้ควบคุมความชื้นระบบที่ 1 และในขณะที่พอลิยูรีเทนกำลังเช็ดตัวให้รับน้ำ 10 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบอยู่ ทำการพ่นจำนวน 5 รอบ (ในตู้ควบคุมความชื้นระบบที่ 1) ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดหาค่ามัมสัมพัทธ์ของน้ำ ทำการพ่น 12 phr และ 14 phr เช่นเดียวกับการพ่น 10 phr ในตู้ควบคุมความชื้นระบบที่ 1 ให้เรียบร้อย จากนั้นทำการพ่นเคลือบในตู้ควบคุมความชื้นระบบที่ 2 อีกครั้ง

### 3.4.3 การศึกษาสมบัติการทนต่อสภาวะต่างๆ

#### 3.4.3.1 การทดสอบความโปร่งใสของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ

การทดสอบความโปร่งใส จะทดสอบโดยการเปรียบเทียบค่าสี (Color parameter) ก่อนและหลังการพ่นเคลือบด้วยวิธี Base – top coat โดยใช้เครื่อง Diffused Reflectance Ultraviolet-visible Spectrometer (DRS) และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 โดยสูตรเคลือบที่มีปริมาณ HFS คือ 10 phr, 12 phr และ 14 phr โดยชั้นของ HFS จะทำการพ่นเคลือบจำนวน 5 รอบ สำหรับวิธีการทดลองมีดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 9 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 3 แผ่น (10 phr HFS#1, 10 phr HFS#2 และ 10 phr HFS#3 เป็นต้น)
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสีเป็น CIE D65
- เตรียมสารเป็น 2 ส่วนแยกกัน โดยแต่ละส่วนจะทำการเตรียมดังนี้ ส่วนที่ 1 เตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 10 phr, 12 phr และ 14 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g ทำการกวนด้วยเครื่องโฮมจีไนซ์ที่ 1,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที ทิ้งไว้ในบีกเกอร์ที่มีอะลูมิเนียมฟอยล์ปิด ส่วนที่ 2 เตรียม Polyurethane ที่มีอัตราส่วน PU resin (Part A) : Hardener (Part B) เป็น 8 g : 2 g กวนผสมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยไม้กวนเป็นเวลา 2 – 3 นาที จากนั้นนำพอลิยูรีเทนในส่วนที่ 2 ประมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกให้ทั่ว และในขณะที่พอลิยูรีเทนกำลังเซ็ตตัวให้รับน้ำ 10 phr HFS ในส่วนที่ 1 ปริมาณ 2 g นำไปบรรจุในกาพ่นสีแล้วทำการพ่นไปที่แผ่นโมเสกที่มีพอลิยูรีเทนเคลือบอยู่ (ทำการพ่นไปที่โมเสกในตู้ดูดควัน) ทิ้งโมเสกที่ทำการพ่นแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปวัดหาค่ามัมสัมผัสของน้ำ ทำการพ่น 12 phr HFS และ 14 phr HFS เช่นเดียวกับการพ่น 10 phr HFS
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสีเป็น CIE D65
- ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนและหลังการพ่นเคลือบโดยระบบที่ใช้การวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer คือ ระบบ CIE  $L^*a^*b^*$  ซึ่งเป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ Color space และเปรียบเทียบ  $\Delta E$  ของสีที่วัดได้

### 3.4.3.2 การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิว

การทดสอบการทนต่อการยึดติดจะทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก.285 เล่ม 47-2540 หน้า 5 โดยการทดสอบการติดแน่นของแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวเป็นการทดสอบความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของฟิล์มบนพื้นผิววัสดุ โดยจะอาศัยแรงดึงเทปกาว ซึ่งมีขั้นตอนของการทดสอบดังต่อไปนี้

- ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบให้ตรวจสอบความคมของใบมีด ถ้าขอบตัดของใบมีดสึกหรอให้นำไปลับใหม่หรือเปลี่ยนใบมีดใหม่
- ทำการกรีดเส้นบนผิวเคลือบด้วยแรงกดและอัตราเร็วในการกรีดที่สม่ำเสมอ เป็นจำนวน 6 เส้นโดยทุกเส้นที่กรีดจะต้องกรีดให้ทะลุผิวเคลือบจนถึงผิวแผ่นทดสอบ และระยะห่างระหว่างเส้นของการกรีดคือ 1 mm จากนั้นทำการกรีดอีก 6 เส้นอีกครั้งโดยทำมุม 90° กับชุดแรก จนเป็นตาราง
- ใช้แปรงขนอ่อนปัดเบาๆ ไปมาตามแนวเส้นทแยงมุมแต่ละแนวหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดผิวเคลือบที่หลุดล่อนออกจากบริเวณที่กรีด
- ตัดเทปกาวให้มีความยาว 75 mm แล้วนำไปติดลงบนตารางโดยให้ตรงกลางเทปกาวติดทับตาราง และเทปกาวขนานกับทิศทางที่กรีดเส้นด้านใดด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 12ก ใช้นิ้วมือกดเทปกาวให้เรียบเป็นความยาวอย่างน้อย 20 mm แล้วใช้นิ้วมือลูบซ้ำอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้แน่ใจว่าเทปกาวติดแนบสนิท ถ้าเทปกาวติดแนบสนิทจะไม่มีฟองอากาศให้เห็น
- ปล่อยให้ลอกเทปกาวภายในระยะเวลา 5 นาที หลังจากที่ได้ติดเทปกาวเรียบร้อยแล้ว ให้ลอกเทปกาวโดยจับปลายเทปกาวด้านที่ไม่ได้ติดบนผิวเคลือบ แล้วดึงออกจังหวะเดียวภายในระยะเวลา 0.5-1 วินาที โดยทำมุมใกล้เคียงกับมุม 60° ให้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12ข

สำหรับการประเมินและการแสดงผล ให้ตรวจพินิจบริเวณที่กรีดเป็นตารางในที่มีแสงสว่างเพียงพอด้วยตาหรือใช้แว่นขยาย ขณะตรวจพินิจให้หมุนแผ่นทดสอบเพื่อไม่ให้เกิดการมองแสงสว่างถูกจำกัดอยู่ในทิศทางเดียว จากนั้นให้เปรียบเทียบผลการทดสอบกับภาพที่แสดงในตารางที่ 1

### 3.4.3.3 การทดสอบความทนน้ำของสารเคลือบ

การทดสอบการทนน้ำของสารเคลือบจะทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก. 2151-2547 โดยจะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่น้ำเป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 21 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วย Polyurethane และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 7 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 7 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดที่มีน้ำ 40 ml แล้วเขียนกำกับเป็น Day 1 ทำการทดลองให้ครบทั้ง 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนการพ่นเคลือบและหลังการทดสอบ
- ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำหลังการทดสอบ ทำการทดสอบการยึดติด และทำการทดสอบการขีดถู ของการทดสอบทั้ง 7 วัน



รูปที่ 25 แสดงการทดสอบการทนน้ำเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว



### 3.4.3.4 การทดสอบความทนต่อการกรดของสารเคลือบ

การทดสอบการทนกรดของสารเคลือบจะทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก. 2151-2547 โดยจะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่ในกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 21 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วย Polyurethane และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 7 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 7 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดที่มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักปริมาตร 40 ml แล้วเขียนกำกับเป็น Day 1 ทำการทดลองให้ครบทั้ง 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนการพ่นเคลือบและหลังการทดสอบ
- ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำหลังการทดสอบ ทำการทดสอบการยึดติด และทำการทดสอบการขัดถู ของการทดสอบทั้ง 7 วัน



รูปที่ 26 แสดงการทดสอบการทนกรดเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว

### 3.4.3.5 การทดสอบความทนต่อเบสของสารเคลือบ

การทดสอบการทนเบสของสารเคลือบจะทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก. 2151-2547 โดยจะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่ใน NaOH ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 21 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วย Polyurethane และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 7 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 7 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในขวดแก้วที่มีฝาปิดที่มี NaOH เข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 40 ml แล้วเขียนกำกับเป็น Day 1 ทำการทดลองให้ครบทั้ง 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนการพ่นเคลือบและหลังการทดสอบ
- ทำการวัดค่ามัมส์มีสของน้ำหลังการทดสอบ ทำการทดสอบการยึดติด และทำการทดสอบการขัดถู ของการทดสอบทั้ง 7 วัน



รูปที่ 27 แสดงการทดสอบการทนเบสเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว

### 3.4.3.6 การทดสอบความทนต่อความร้อนของสารเคลือบ

การทดสอบการทนความร้อนจะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่ในตู้อบ (Oven) ที่ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 21 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วย Polyurethane และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 7 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 7 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในตู้อบที่ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C แล้วเขียนกำกับเป็น Day 1 ทำการทดลองให้ครบทั้ง 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนการพ่นเคลือบและหลังการทดสอบ
- ทำการวัดค่ามัมส์มีสของน้ำหลังการทดสอบ ทำการทดสอบการยึดติด และทำการทดสอบการขีดถู ของการทดสอบทั้ง 7 วัน

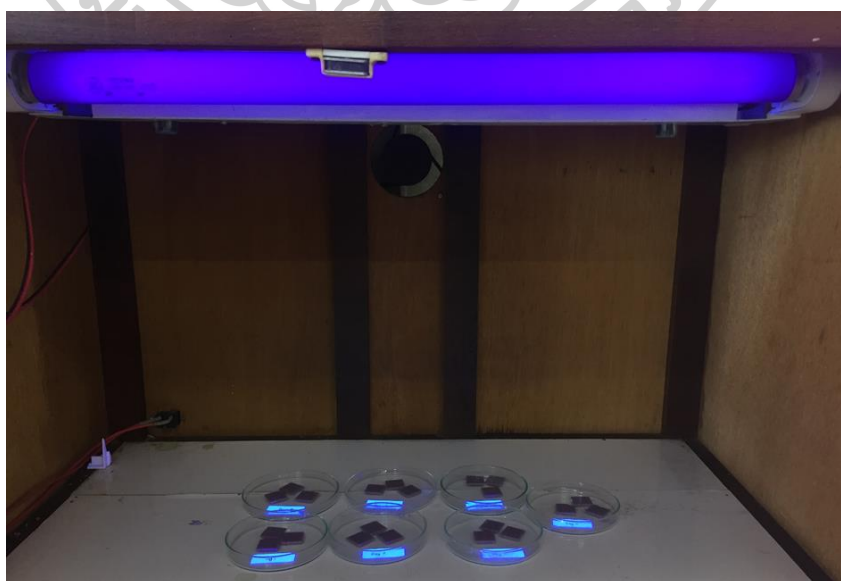


รูปที่ 28 แสดงการทดสอบการทนความร้อนเป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว

### 3.4.3.7 การทดสอบความทนต่อแสง UV ของสารเคลือบ

การทดสอบการทนต่อแสง UV จะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่ในตู้ที่มีหลอด UV เป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 21 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกแต่ละแผ่นที่เขียนกำกับไว้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วย Polyurethane และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 7 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 7 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 7 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในตู้ที่มีหลอด UV แล้วเขียนกำกับเป็น Day 1 ทำการทดลองให้ครบทั้ง 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS และใช้การรายงานค่าระบบสี เป็น CIE D65 ทำการเปรียบเทียบค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนการพ่นเคลือบและหลังการทดสอบ
- ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำหลังการทดสอบ ทำการทดสอบการยึดติด และทำการทดสอบการขีดถู ของการทดสอบทั้ง 7 วัน



รูปที่ 29 แสดงการทดสอบการทนแสง UV เป็นเวลา 7 วันของโมเสกที่เคลือบแล้ว

### 3.4.3.8 การทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ

การทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ ซึ่งการทดลองนี้ได้ดัดแปลงมาจากการทดลองของ Er-Chieh Cho และคณะ [10] จะทำการทดสอบโดยการนำโมเสกที่เคลือบแล้วไปแช่ในขวดเลี้ยงตะไคร่น้ำ เป็นเวลา 7 วัน มีวิธีการทดสอบดังนี้

- เตรียมแผ่นโมเสกตัวอย่างจำนวน 8 แผ่น โดยทำการเขียนกำกับไว้สำหรับการพ่น PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 2 แผ่น
- ทำการพ่นเคลือบแผ่นโมเสกด้วยพอลิยูรีเทนเป็นจำนวน 2 แผ่น เคลือบแผ่นโมเสกด้วยพอลิยูรีเทน และ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 2 แผ่น เคลือบด้วย 12 phr HFS จำนวน 2 แผ่น และ 14 phr HFS จำนวน 2 แผ่น
- นำแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ไปแช่ในสารละลาย BBM medium ประกอบด้วย  $\text{NaNO}_3$  (0.25 g),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.075 g),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.075 g),  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.025 g),  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (0.175 g),  $\text{NaCl}$  (0.025 g),  $\text{EDTA}$  (0.05 g),  $\text{KOH}$  (0.031 g),  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (4.98 mg),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (11.4 mg),  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (8.82 mg),  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (1.44 mg),  $\text{MoO}_3$  (0.71 mg),  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (1.57 mg),  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (0.49 mg) ในน้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 7 วัน
- ทำการทดลองเปรียบเทียบกับแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อย่างละ 1 แผ่น ซึ่งมีรอยกากบาท ทำการแช่ในสารละลาย BBM medium เป็นเวลา 7 วัน
- นำแผ่นโมเสกที่ทำผ่านการแช่สารละลาย BBM medium เป็นเวลา 7 วัน ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง DRS ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 350 nm ถึง 800 nm ทำการเปรียบเทียบค่า Absorbance ของตะไคร่น้ำกับแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบแต่ละชนิด

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการหาสาเหตุของการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ของพระมหาธาตุเจดีย์

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโมเสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์

วัสดุที่ใช้สำหรับพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ เป็นโมเสกที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งแผ่นโมเสกมีลักษณะของสีที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ โมเสกสีทอง (ตัวอย่างที่ 1) โมเสกสีน้ำตาล (ตัวอย่างที่ 2) โมเสกสีเทาเข้ม (ตัวอย่างที่ 3) โมเสกสีเทาอ่อน (ตัวอย่างที่ 4) และโมเสกสีม่วง (ตัวอย่างที่ 5) ดังรูปที่ 30 ขนาดของชิ้นงานมีขนาดเฉลี่ย 2.0 x 2.0 เซนติเมตร ผิวด้านหน้ามีลักษณะเรียบ และด้านหลังลักษณะเป็นรอยหยักเพื่อช่วยในการยึดติด ยกเว้นโมเสกชนิดสีทองที่ปรากฏผิวหน้าและหลังเรียบทั้งสองด้าน

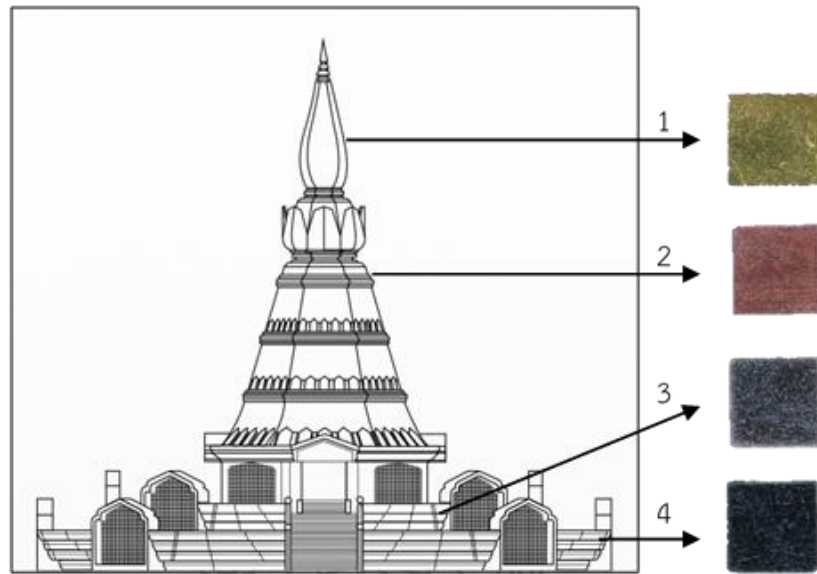


รูปที่ 30 แสดงโมเสกตัวอย่างที่ใช้เป็นพื้นผิวของมหาธาตุเจดีย์ทั้งสององค์

- (ก) โมเสกตัวอย่างที่ 1 สีทอง      (ข) โมเสกตัวอย่างที่ 2 สีน้ำตาล  
 (ค) โมเสกตัวอย่างที่ 3 สีเทาเข้ม      (ง) โมเสกตัวอย่างที่ 4 สีเทาอ่อน  
 (จ) โมเสกตัวอย่างที่ 5 สีม่วง

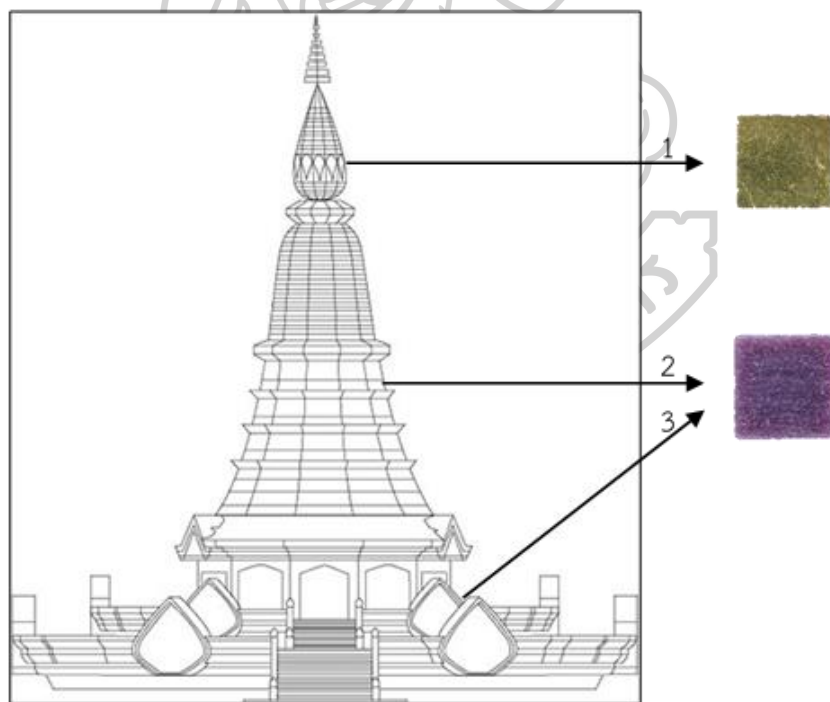
พระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริจะใช้แผ่นโมเสกที่ต่างชนิดกันเป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ ซึ่งโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลจะใช้โมเสกทั้งหมด 4 แบบด้วยกัน คือ สีทอง (โมเสกตัวอย่างที่ 1), สีน้ำตาล (โมเสกตัวอย่างที่ 2), สีเทาเข้ม (โมเสกตัวอย่างที่ 3) และสีเทาอ่อน (โมเสกตัวอย่างที่ 4) ซึ่งโมเสกทั้ง 4 ชนิดได้ถูกใช้เป็นส่วนผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลในตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 31

สำหรับพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริจะใช้โมเสกทั้งหมด 2 แบบด้วยกัน คือ สีทอง (โมเสกตัวอย่างที่ 1) และสีม่วง (โมเสกตัวอย่างที่ 5) เท่านั้น ซึ่งโมเสกทั้ง 2 ชนิดได้ถูกใช้เป็นส่วนผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริในตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 32



รูปที่ 31 แสดงลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาเจดีย์ธาตุนภเมทนีดลในตำแหน่งต่างๆ [50]

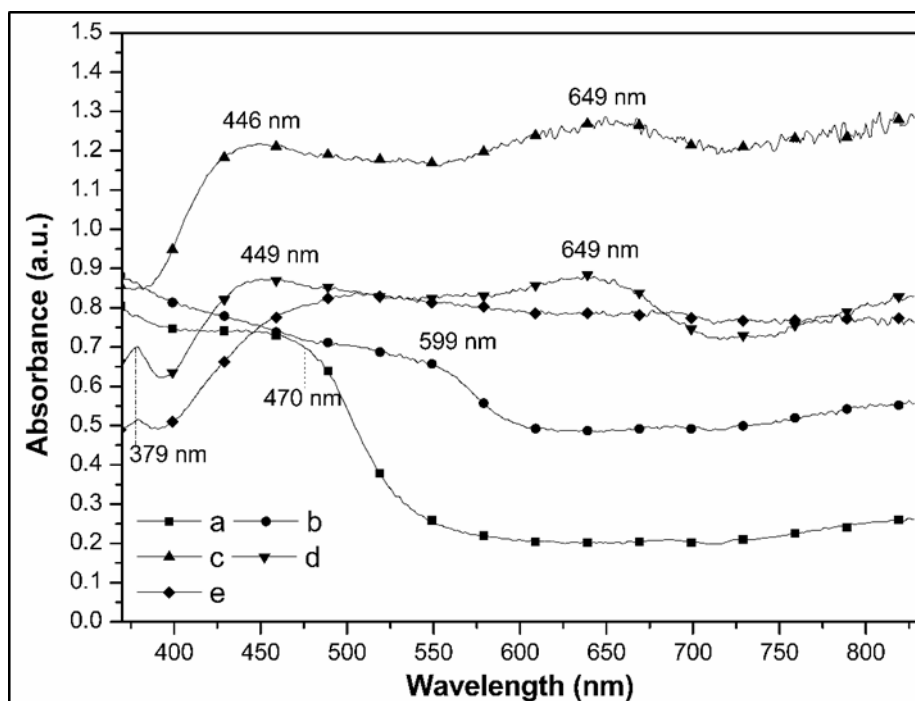
1. ยอดเจดีย์
2. ตัวองค์เจดีย์
3. ฐานด้านข้างด้านล่างชั้นที่สองของเจดีย์
4. ฐานด้านข้างด้านล่าง



รูปที่ 32 แสดงลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริในตำแหน่งต่างๆ [51]

1. ยอดเจดีย์
2. ตัวองค์เจดีย์
3. ชุ่มและฐานด้านข้างด้านล่าง รวมถึงฐานด้านข้างด้านล่างชั้นที่สองของเจดีย์

จากการนำแผ่นโมเสกตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของโมเสกแต่ละชนิดได้ผลแสดงดังรูปที่ 33 พร้อมทั้งหาค่าสีโดยใช้ระบบสี CIE D65 ได้ผลตามตารางที่ 6 โดยระบบที่ใช้การวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer คือ ระบบ CIE L\* a\* b\* ซึ่งเป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ Color space



รูปที่ 33 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด

(a) สีทอง (b) สีน้ำตาล (c) สีเทาเข้ม (d) สีเทาอ่อน (e) สีม่วง

ตารางที่ 6 แสดงค่าสีในระบบสี CIE D65 ( $L^*$   $a^*$   $b^*$ ) ของโมเสก 5 ชนิด

โมเสกตัวอย่าง	ค่าสี		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$
สีทอง	77.4463	0.2937	44.5548
สีน้ำตาล	56.7576	8.8328	12.5742
สีเทาเข้ม	30.4811	-2.9891	0.1430
สีเทาอ่อน	45.0418	-1.7729	0.9988
สีม่วง	46.3560	5.3265	-5.4804



จากการวิเคราะห์ค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ที่ได้ โดยกำหนดให้

$L^*$  เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100

แกน  $a^*$  ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

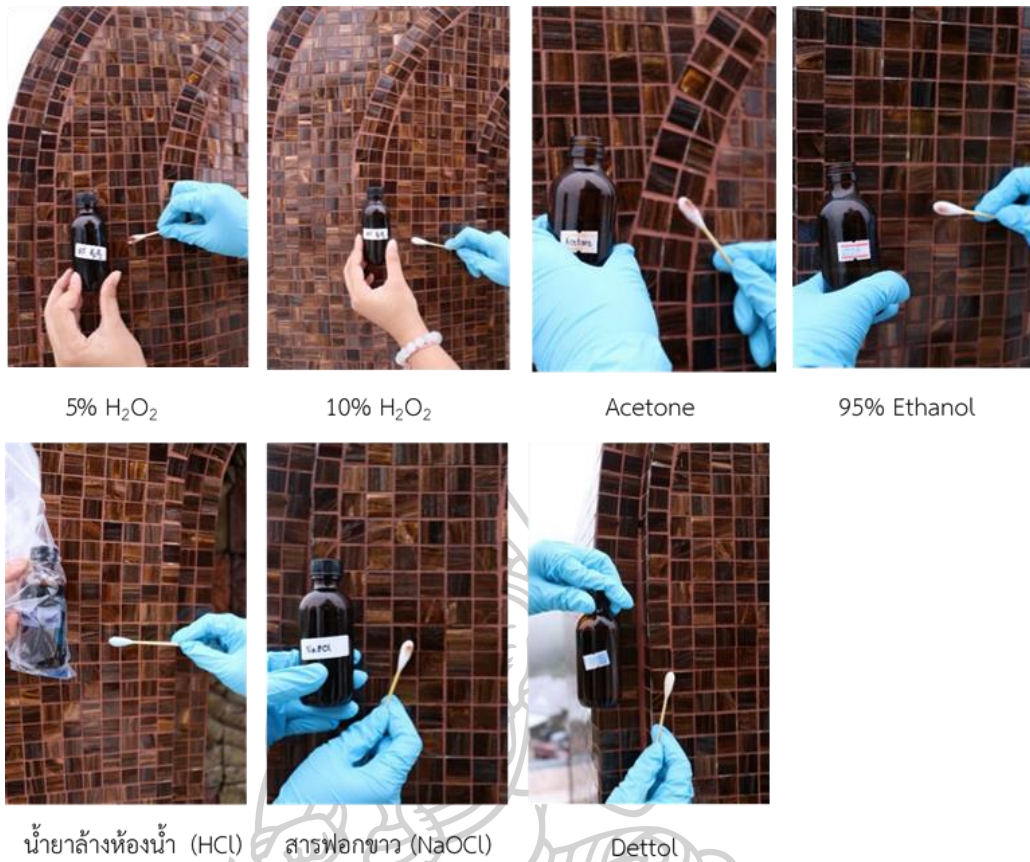
แกน  $b^*$  ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

การวัดการดูดกลืนแสงของ **โมเสกสีทอง** พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 450 nm เป็นช่วงคลื่นสีน้ำเงินซึ่งสีที่มองเห็นจะมีสีเหลือง จากค่าสีในตารางที่ 6 บ่งบอกถึงโมเสกสีทองมีลักษณะเป็นสีเหลือง โดยแสดงค่า  $b^*$  ที่เป็นบวกซึ่งหมายถึงสีแสดงทิศทางสีเหลือง **โมเสกสีน้ำตาล** พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 550 nm เป็นช่วงของสีเขียว จะทำให้โมเสกชนิดนี้แสดงค่าเป็นสีน้ำตาลจากค่าสีในตารางที่ 6 บ่งบอกถึงโมเสกสีน้ำตาลมีลักษณะเป็นสีเหลือง โดยแสดงค่า  $b^*$  ที่เป็นบวกซึ่งหมายถึงสีแสดงทิศทางสีเหลืองเล็กน้อย **โมเสกสีเทาเข้ม** พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 430 และ 650 nm เป็นสีม่วงและสีส้มตามลำดับ จะแสดงลักษณะสีเทา **โมเสกสีเทาอ่อน** พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 430 และ 650 nm เป็นสีม่วงและสีส้มตามลำดับ จะแสดงลักษณะสีเทาเช่นเดียวกับโมเสกสีเทาเข้ม นอกจากนี้มีค่าความสว่าง  $L^*$  ที่เพิ่มขึ้นจากโมเสกสีเทาเข้มที่แสดงในตาราง 6 สำหรับ **โมเสกสีม่วง** พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 500 nm เป็นสีเขียวแกมเหลือง จะแสดงลักษณะสีคราม-ม่วง จากค่าสีในตารางที่ 6 บ่งบอกถึงโมเสกสีม่วงนี้มีค่าความสว่าง  $L^*$  เล็กน้อยและมีค่าโทนสีน้ำเงินโดยแสดงค่า  $b^*$  ไปในทางลบ

#### 4.1.2 การทดสอบความทนต่อสารเคมีของแผ่นโมเสก

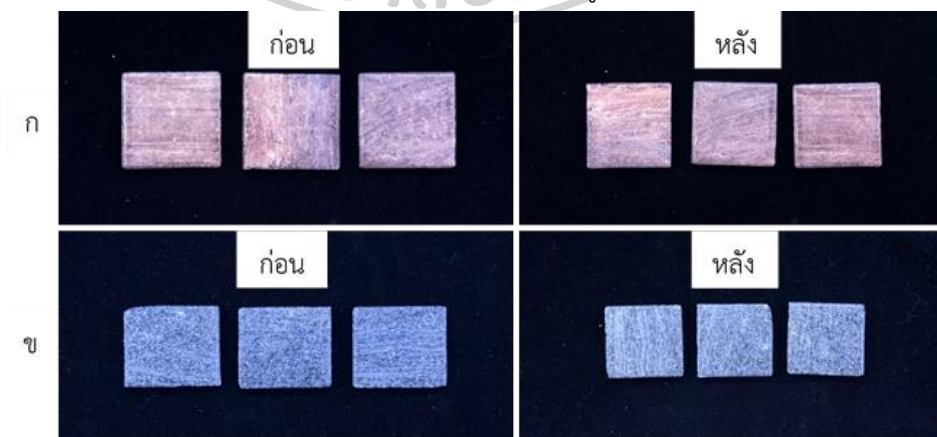
สารเคมีเบื้องต้นที่ใช้ทดสอบความทนต่อสารเคมี และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นต่อน้ำยาทำความสะอาดพื้นผิวชนิดต่างๆ ของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุฯ ได้แก่ 10%  $H_2O_2$ , 5%  $H_2O_2$ , Acetone, 95% Ethanol, น้ำยาล้างห้องน้ำ (HCl), สารฟอกขาว (NaOCl) และน้ำยาฆ่าเชื้อ (Dettol)

จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะของโมเสกไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่สัมผัสสารเคมีชนิดต่างๆ ด้วยการใช้การดู แต่มีปัญหาน้ำที่หลุดออกขณะทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 34



รูปที่ 34 การทดสอบความทนต่อสารเคมี และการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเบื้องต้นของโมเสก

สำหรับแผ่นโมเสกที่ทำการทดสอบโดยการแช่ในคลอโรฟอร์ม (Chloroform;  $\text{CHCl}_3$ ) และไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane;  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) ในปริมาตร 40 ml ในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด ทำการทดลองแช่ในสารละลายเป็นเวลา 7 วัน ผลการทดลองพบว่าแผ่นโมเสกมีความทนต่อสารละลายทั้งสองโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพอย่างใดดังรูปที่ 35



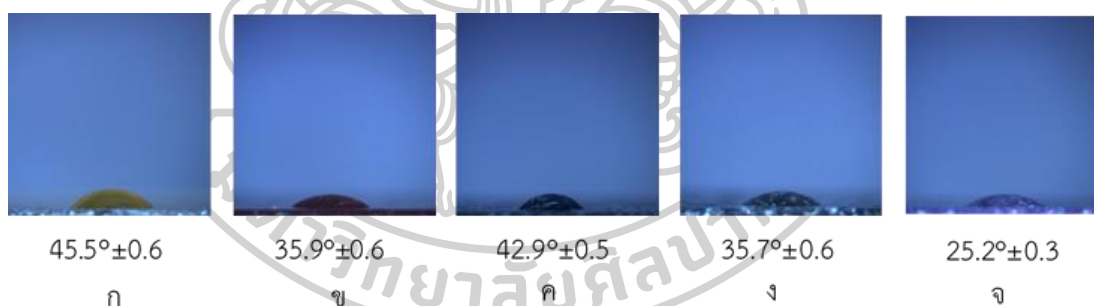
รูปที่ 35 แสดงผลการแช่ในตัวทำละลายของแผ่นโมเสกเป็นเวลา 7 วัน

(ก) ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (ข) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์มุมสัมผัสน้ำของแผ่นโม่เสก

จากปรากฏการณ์ความชอบและไม่ชอบน้ำของพื้นผิว มีความเกี่ยวข้องกับมุมสัมผัสกับพื้นผิว ซึ่งเป็นมุมที่เกิดขึ้นในเขตสามสถานะ (ของแข็ง, ของเหลว, ไอ) อธิบายด้วยมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของของเหลวที่พื้นผิวของของแข็ง โดยทั่วไปถ้ามุมสัมผัสน้อยกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า  $90^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า  $150^\circ$  จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเป็นพิเศษ (Superhydrophilic or Ultra hydrophilic surface)

จากค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวโม่เสกตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ สีทอง, สีน้ำตาล, สีเทาเข้ม, สีเทาอ่อน และสีม่วง มีค่า  $45.5^\circ \pm 0.6$ ,  $35.9^\circ \pm 0.6$ ,  $42.9^\circ \pm 0.5$ ,  $35.7^\circ \pm 0.6$  และ  $25.2^\circ \pm 0.3$  ตามลำดับดังรูปที่ 36 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  นั้นแสดงว่าโม่เสกตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) และเนื่องจากโม่เสกดังกล่าวมีพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) ประกอบกับสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ที่มีสภาพอากาศที่มีฝนตกชุกและมีความชื้นสูงตลอดทั้งปี ทำให้พระมหาธาตุฯ ทั้งสององค์มีหยดน้ำเกาะอยู่ตลอด ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับตะไคร่น้ำ เช่น มอส นอกจากนี้ยังทำให้เกิดคราบหินปูนได้อีกด้วย ซึ่งมาจากการที่น้ำสะสมบนพื้นผิวบริเวณปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อของโม่เสกโดยเกิดการชะและหลุดในเวลาต่อมา

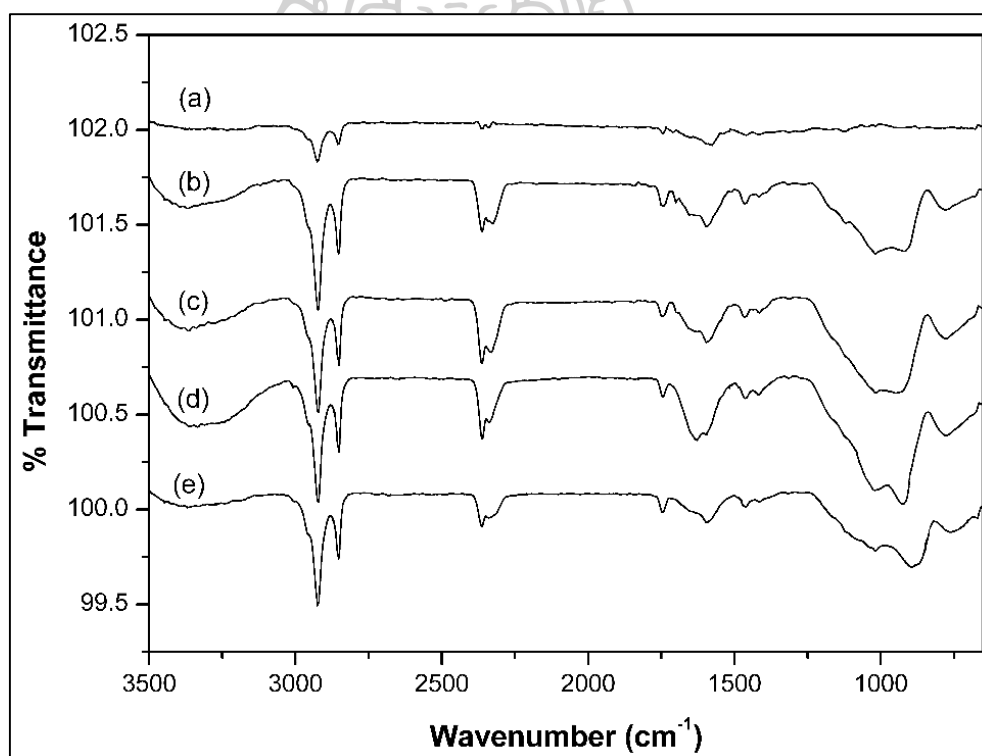


รูปที่ 36 แสดงมุมสัมผัสของน้ำของแผ่นโม่เสก

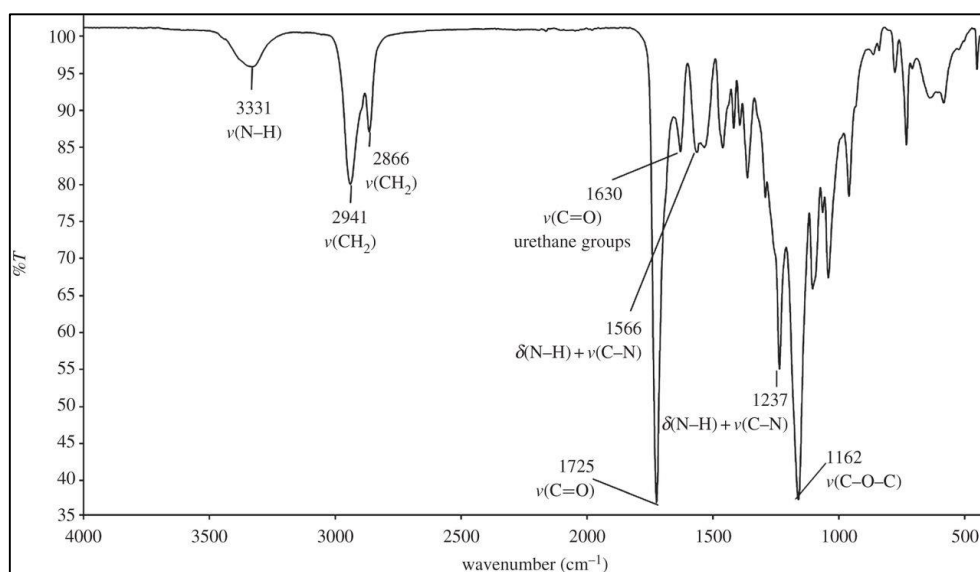
- |                     |                    |                     |
|---------------------|--------------------|---------------------|
| (ก) โม่เสกสีทอง     | (ข) โม่เสกสีน้ำตาล | (ค) โม่เสกสีเทาเข้ม |
| (ง) โม่เสกสีเทาอ่อน | (จ) โม่เสกสีม่วง   |                     |

#### 4.1.4 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโม่เสกด้วยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวหน้าแผ่นโม่เสกได้ถูกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) และค่าร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance, %T) ดังรูปที่ 37 พบว่าโม่เสกทั้ง 5 ชนิด ปรากฏพีกที่เลขคลื่น  $3365\text{-}3329\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงการสั่นแบบ N-H Stretching และ  $1651\text{-}1593\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Scissoring ของหมู่  $\text{-NH}_2\text{-}$  การสั่นที่ประมาณ  $1280\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ C-N stretch และ  $777\text{-}761\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ  $\text{-NH}_2$  wagging นอกจากนี้ที่เลขคลื่น  $2900\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$  แสดงหมู่  $\text{-CH}_2$  Stretching เลขคลื่นที่  $1700\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  นั่นคือพีกของหมู่คาร์บอนิล (C=O) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานจะพบว่าเป็นสเปกตรัมของพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valeria Chiono และคณะ ดังรูปที่ 38 โดยสามารถยืนยันได้ว่าโม่เสกทั้ง 5 ชนิดได้ถูกเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่พื้นผิว



รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) และค่า %T ของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด



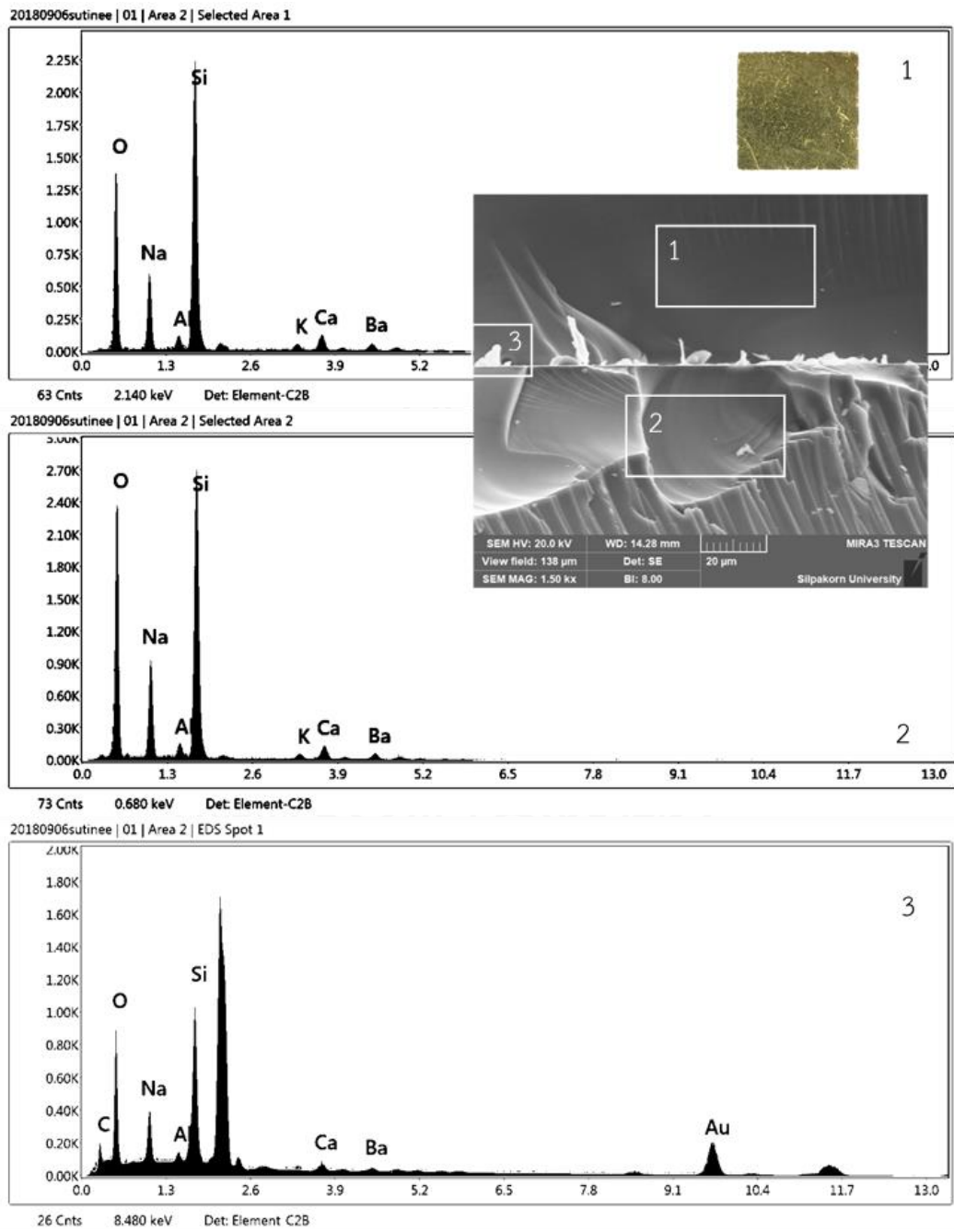
รูปที่ 38 แสดง ATR-FTIR spectrum ของ Polyurethane [52]

#### 4.1.5 ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นโม่เสก

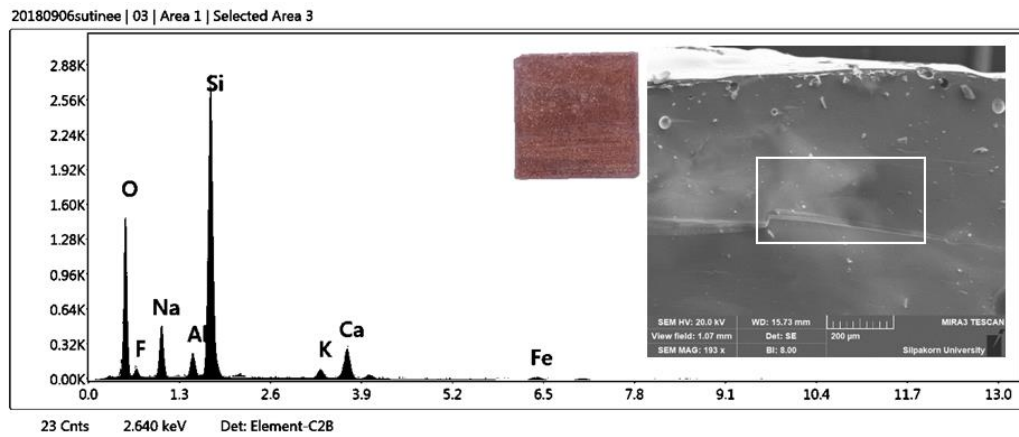
ผลการวิเคราะห์พื้นผิวและภาคตัดขวาง (Fractural surface) ของแผ่นโม่เสกพบว่า โม่เสกสีทองมีองค์ประกอบ 3 ชั้นดังรูปที่ 39 ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิค EDX พบว่าชั้นด้านบนสุดพบธาตุ Si, O, Al และ Na เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่เช่นเดียวกับชั้นด้านล่าง และต่างจากชั้นตรงกลาง จะมีองค์ประกอบของธาตุ Au เพิ่มขึ้นมาแสดงว่าโม่เสกนี้ถูกขึ้นรูปจากแก้วชนิดที่มีซิลิกาที่มีการเติมธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบ โดยสีทองมาจาก Au

สำหรับโม่เสกสีน้ำตาลพื้นผิวเป็นเนื้อเดียวกันดังรูปที่ 40 เมื่อนำไปวิเคราะห์พบธาตุ Si, O, Al และ Na เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ แสดงว่าโม่เสกสีน้ำตาลขึ้นรูปจากแก้วชนิดที่มีซิลิกาที่เติมธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับโม่เสกสีทอง โดยจากผล EDX พบว่าสีของโม่เสกได้จากสารประกอบที่มีองค์ประกอบของธาตุ Fe เช่นเดียวกับกับ โม่เสกสีเทาเข้มและโม่เสกสีเทาอ่อน ดังรูปที่ 41 และรูปที่ 42 แสดงว่าโม่เสกสีเทาเข้มและโม่เสกสีเทาอ่อนทำมาจากแก้วซิลิกาที่บริสุทธิ์ สำหรับโม่เสกสีม่วงไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดดังรูป 43 ผล EDX แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่พบธาตุ Si, O, Al และ Na เป็นองค์ประกอบเช่นกัน และมีพื้นที่เป็น มีเพียง Si และ O เป็นองค์ประกอบ และมีสารประกอบให้สีม่วงที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุ Mn

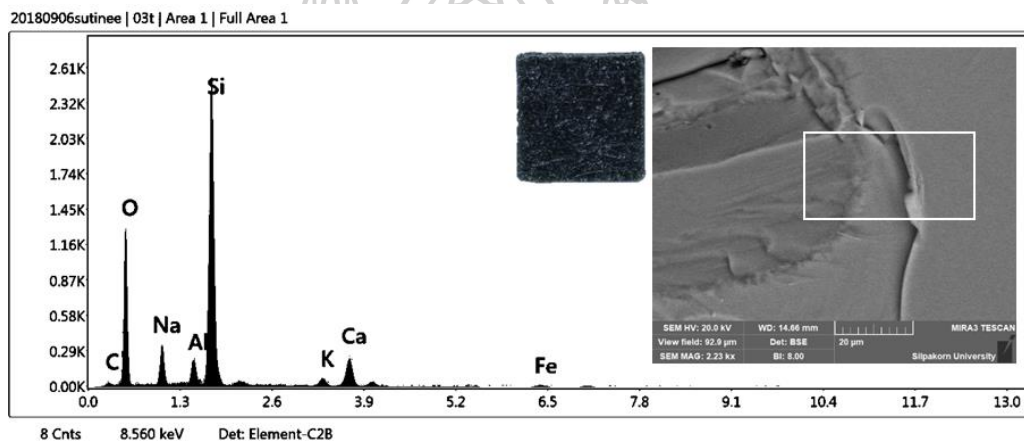
จากข้อมูลพื้นผิวภาคตัดขวางที่ได้จากเทคนิค SEM นี้ชี้ให้เห็นได้ว่าโม่เสกทั้ง 5 ชนิดเป็นโม่เสกที่ผลิตมาจากแก้วซิลิกา และจากผลการทดสอบ FTIR ดังแสดงก่อนหน้าที่มีการส่องลงบนพื้นผิวตัวอย่างพบหมู่ฟังก์ชันของพอลิยูรีเทน แสดงว่าโม่เสกทั้ง 5 ชนิดนี้มีการมีการเคลือบพอลิยูรีเทนบนผิวหน้า



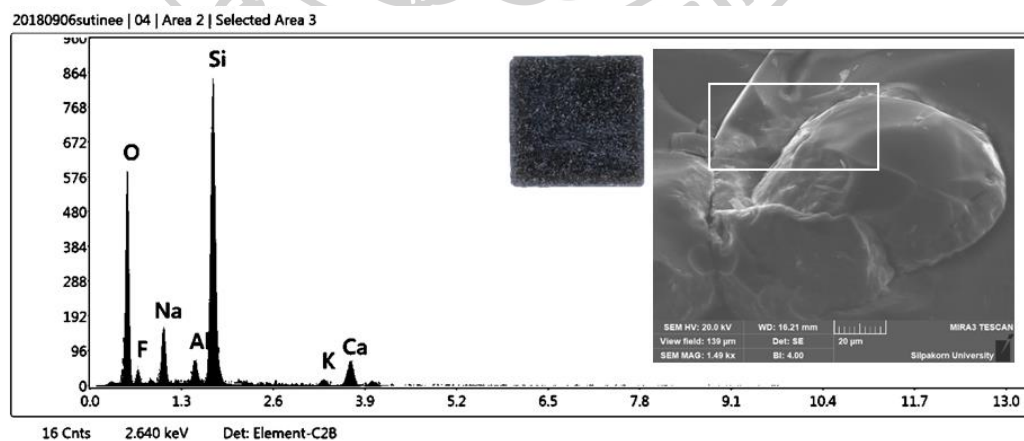
รูปที่ 39 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโม่เสกสีทองที่กำลังขยาย 1500 เท่า



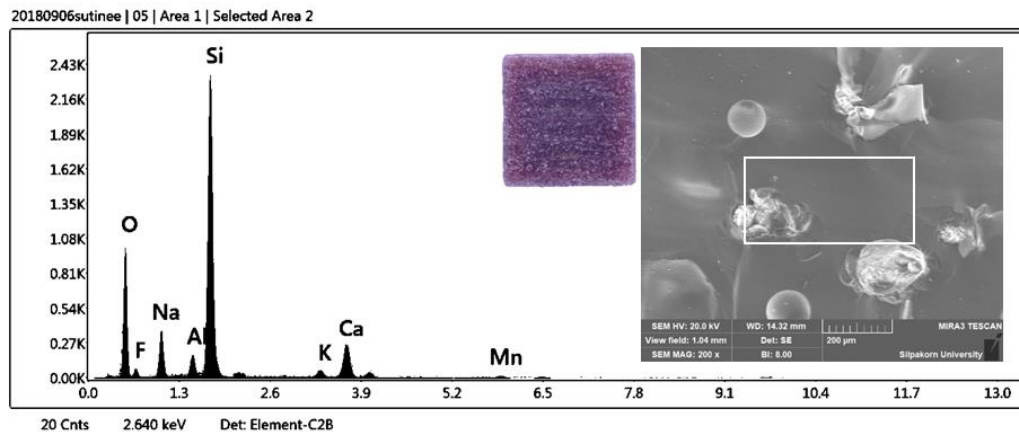
รูปที่ 40 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโมเสกสีน้ำตาลที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 41 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโมเสกสีเทาเข้มที่กำลังขยาย 200 เท่า



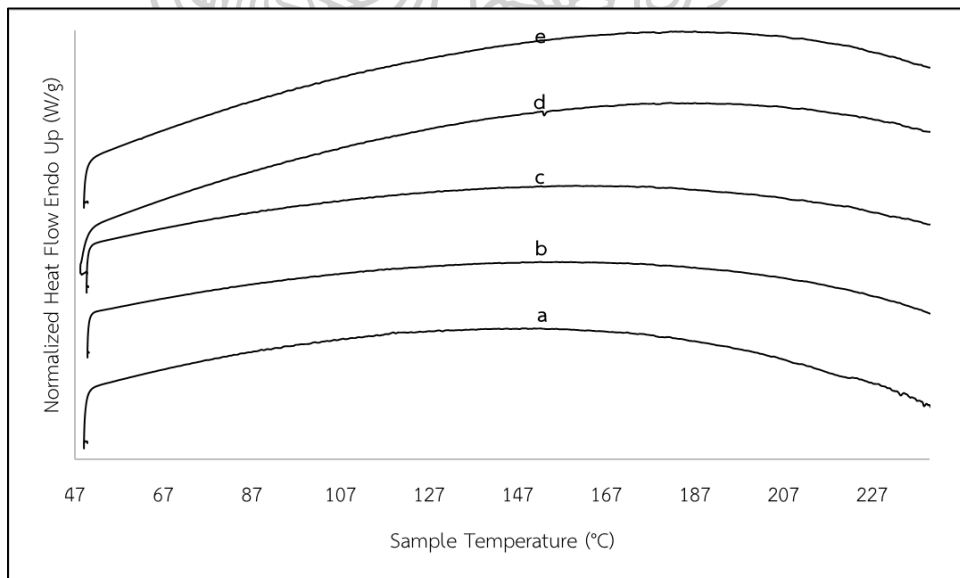
รูปที่ 42 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโมเสกสีเทาอ่อนที่กำลังขยาย 200 เท่า



รูปที่ 43 ภาพ SEM+EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของแผ่นโม่เสกสีม่วงที่กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.1.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโม่เสก

เมื่อนำแผ่นโม่เสกตัวอย่างไปวัดด้วยเทคนิค DSC พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบตั้งแต่ 45°C - 230°C ดังรูปที่ 44 เช่นเดียวกับผลของ M. Amrollahi และคณะ [53] เนื่องจากพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) และมีลักษณะเป็นร่างแห (Crosslink) ไม่สามารถหลอมด้วยความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิการศึกษา นอกจากนี้โม่เสกยังมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่หลอมที่อุณหภูมิมากกว่าช่วงอุณหภูมิที่วิเคราะห์ (ประมาณ 1,000°C) จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดขึ้น

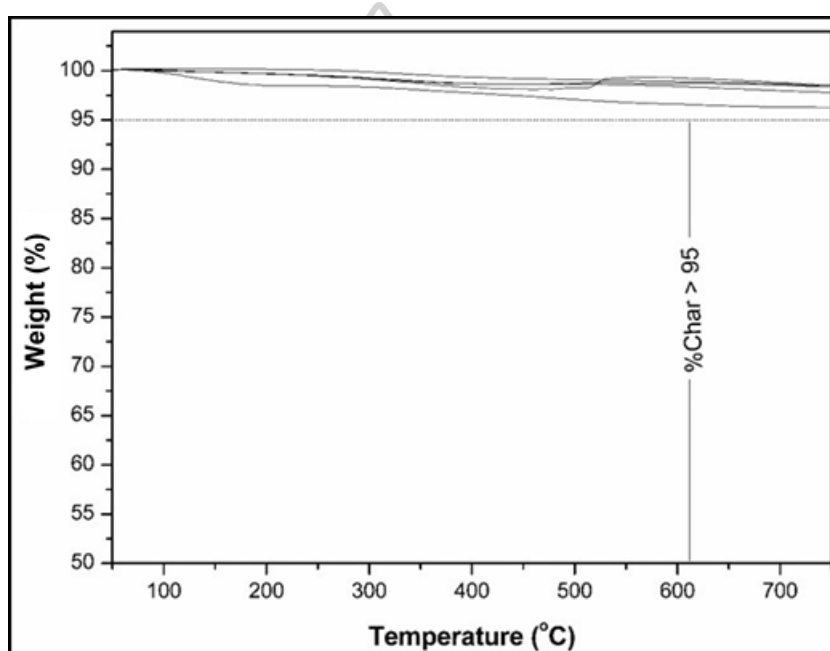


รูปที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า Normalized Heat Flow Endo Up (W/g) ของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิด

- a) โม่เสกสีทอง      b) โม่เสกสีน้ำตาล      c) โม่เสกสีเทาเข้ม  
d) โม่เสกสีเทาอ่อน      e) โม่เสกสีม่วง



สำหรับผลการทดสอบ TGA ดังรูปที่ 45 เป็นการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ พบว่าวัสดุสามารถทนความร้อนได้ดีโดยการสลายตัวหรือน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ลดลง 3-4% ที่อุณหภูมิ 785°C โดยมี %char ที่มีค่าน้อยกว่า 95% จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผล DSC เนื่องจากมีองค์ประกอบของแก้วซิลิกาที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ (อุณหภูมิห้องจนถึง 800°C) เช่นเดียวกับการทดลองของ Zhang และคณะ [54] และสำหรับองค์ประกอบที่เป็นพอลิยูรีเทนไม่สามารถหลอมด้วยความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป

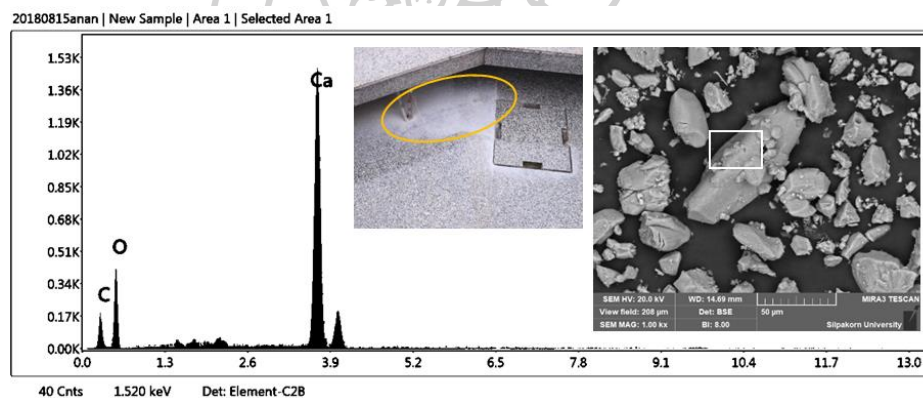


รูปที่ 45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight ของโมเสก

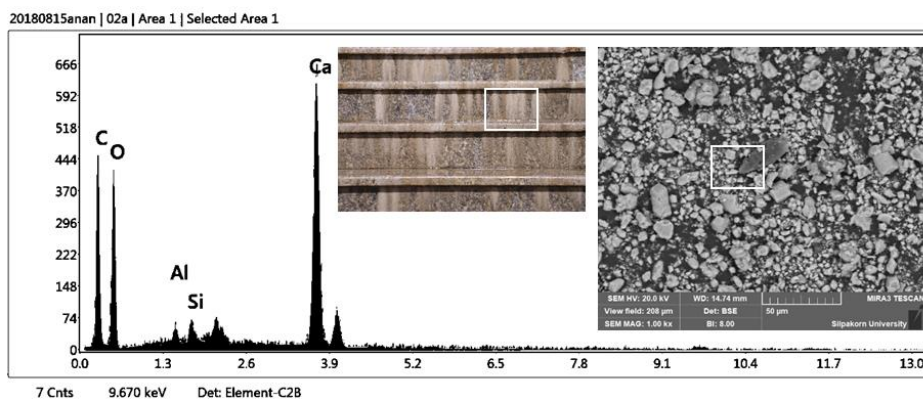
#### 4.1.7 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุจากตัวอย่างคราบหินปูน และตัวอย่างน้ำฝน

คราบไม่พึงประสงค์ตัวอย่างที่บริเวณพระมหาธาตุเจดีย์ฯ ถูกเก็บมาวิเคราะห์และตรวจสอบทางเคมี ซึ่งจากการสำรวจจะพบตัวอย่างที่เคลือบหรือเกาะติดที่พื้นผิว คือ ตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายหินปูน จะถูกวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิค SEM-EDX เพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของธาตุ นอกจากนี้ น้ำฝนตัวอย่างที่ตกบริเวณพระมหาธาตุเจดีย์ฯ ถูกเก็บมาตรวจวิเคราะห์เช่นกัน โดยวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเบส (pH) และหาองค์ประกอบธาตุแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบหลักคราบหินปูนด้วยการอาศัยเทคนิค AAS

สำหรับคราบตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายหินปูนถูกเก็บมาจากแหล่งต่างๆ จากการสำรวจพบว่าคราบดังกล่าวพบมากที่สุดคือ พื้นทางเดินของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ (รูปที่ 46) และคราบหินปูนบนบันไดทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุฯ (รูปที่ 47) ซึ่งพบว่าจากสองแหล่งนี้มีองค์ประกอบธาตุหลักเป็นแคลเซียม (Ca) ซึ่งองค์ประกอบหลักของหินปูน ซึ่งบริเวณบันไดทางขึ้นจะมีองค์ประกอบของธาตุ Al และ Si ด้วย เนื่องจากบริเวณที่เก็บตัวอย่างเป็นบริเวณทางเดินจึงมีการปนเปื้อนของดิน โดยพบว่ามี Al และ Si เป็นองค์ประกอบหลักรวมด้วย

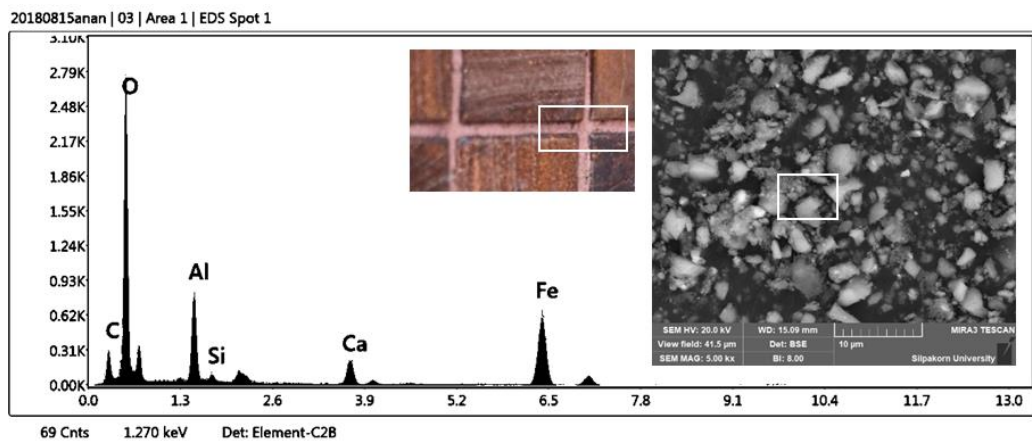


รูปที่ 46 ภาพ SEM+EDX คราบหินปูนพื้นทางเดินของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ

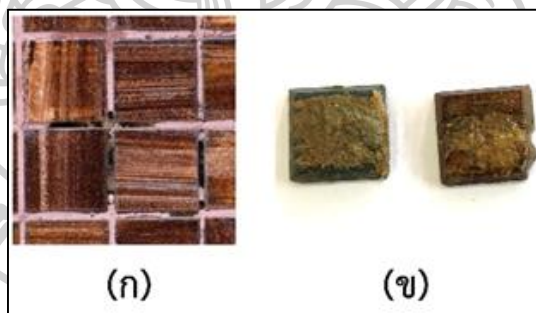


รูปที่ 47 ภาพ SEM+EDX หินปูนของพระธาตุคราบหินปูนบนบันไดทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุ

นอกจากนี้ตัวอย่างของปูนยาแนวได้ถูกเก็บเพื่อมาวิเคราะห์ซึ่งสาเหตุที่มาของการเกิดคราบหินปูนที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม (รูปที่ 48) จากผลพบว่าปูนยาแนวมีองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม และจากการสำรวจพบว่าลักษณะปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อระหว่างแผ่นโมเสกนั้นถูกหลุดล่อนออกซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โมเสกหลุดออกจากตัวองค์พระธาตุฯ ทั้งสองดังรูปที่ 49 โดยสามารถเกิดจากการที่มีน้ำฝนชะเป็นเวลานานและสม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนที่พบ



รูปที่ 48 ภาพ SEM-EDX ปูนยาแนวของซุ้มรอบองค์พระธาตุฯ บริเวณรอยต่อของแผ่นโมเสก

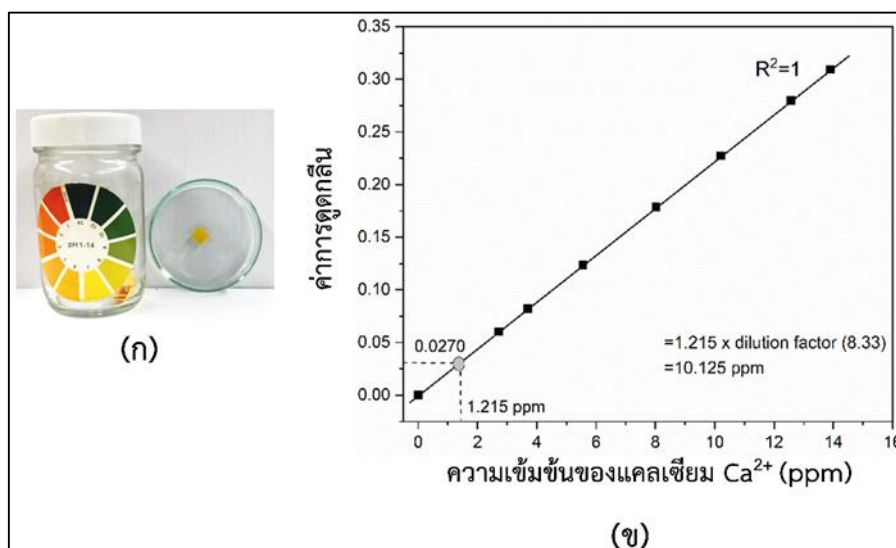


รูปที่ 49 แสดงโมเสกหลุดออกจากองค์พระธาตุ

(ก) การหลุดล่อนของปูนยาแนว

(ข) โมเสกที่หลุดออกจากตัวองค์พระธาตุ

สำหรับน้ำฝนนอย่างถูกวิเคราะห์โดยการตรวจสอบค่าความเป็นกรดเบส (pH) และองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมที่เป็นธาตุที่สำคัญที่เป็นองค์ประกอบในหินปูนด้วยเทคนิค AAS แสดงดังรูปที่ 50



รูปที่ 50 แสดงการวิเคราะห์น้ำฝนตัวอย่างด้วยเทคนิคต่างๆ

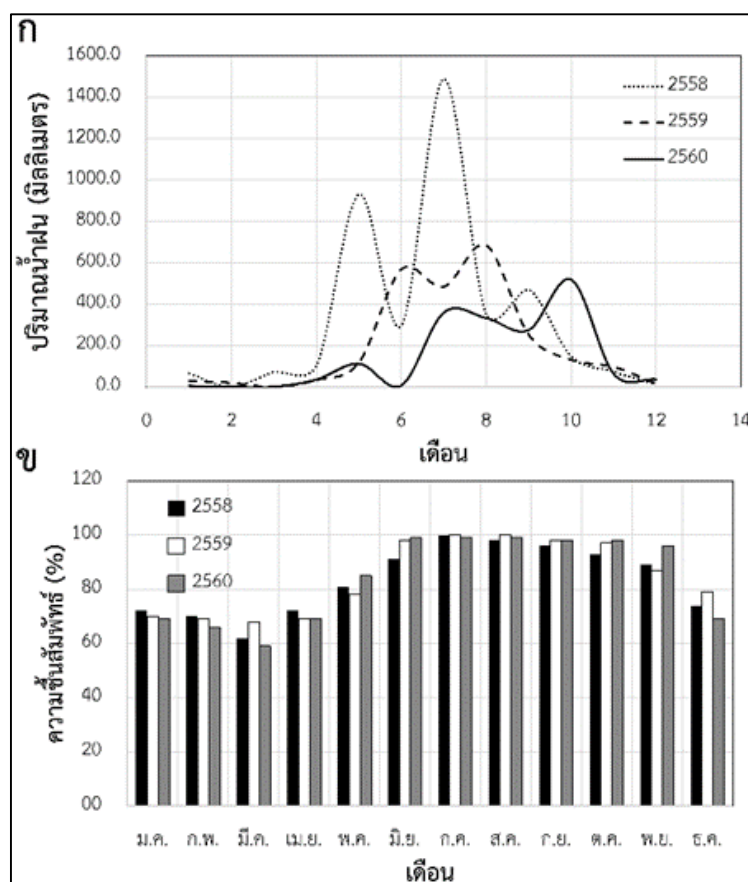
(ก) ค่าความเป็นกรดเบส (pH)

(ข) การวิเคราะห์ปริมาณ  $Ca^{2+}$  ด้วยกราฟมาตรฐานของสารละลาย  $Ca^{2+}$

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความเป็นกรดเบสแสดงค่าประมาณ 7-8 ซึ่งเป็นค่าปกติของน้ำตามธรรมชาติ โดยค่าความกระด้างของน้ำแสดงได้ด้วยค่า total hardness ซึ่งคำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ( $CaCO_3$ ) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (หรือ 1 ส่วนในล้านส่วน, ppm) พบว่าปริมาณของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) ที่ได้คือ 10.125 ppm จัดว่าเป็นน้ำอ่อนที่เป็นน้ำฝน

สำหรับการวิเคราะห์ถึงการเกิดคราบหมองหม่นบนองค์พระมหาธาตุเจดีย์นั้นจำเป็นต้องทราบถึงสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ โดยทำการรวบรวมข้อมูลจากแผนกภูมิอากาศ กองข่าวอากาศ กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ กองทัพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ โดยเก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 1 มกราคม 2558 – 31 ธันวาคม 2560 (รูปที่ 51)

ปริมาณน้ำฝน (รูปที่ 51ก) พบว่าช่วงเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมากกว่า 100 มิลลิเมตร จะอยู่ในช่วงเดือน ก.ค. – ต.ค. ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณฝนที่สูง จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณน้ำฝนที่มากกว่า 100 มิลลิเมตร ครอบคลุมเกินกว่า 6 เดือน จากสถิติข้อมูลในรอบ 3 ปี



รูปที่ 51 แสดงสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ 12 เดือน ช่วง พ.ศ. 2558 – 2560  
(ก) แสดงปริมาณน้ำฝน (ข) ความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 51 ข แสดงให้เห็นว่าดอยอินทนนท์ มีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึงสูงมากตลอดทั้งปี โดยมีค่าเฉลี่ยรายปีของปี พ.ศ.2558 - 2560 ใกล้เคียงกันคือ 84% ช่วงเดือนที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมากคือ พ.ค. - พ.ย. คือมีค่าเฉลี่ยสามปี อยู่ในช่วง 81% ถึง 100% ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝน กล่าวคือในช่วงฤดูฝนจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง โดยความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีผลอย่างมากต่อการเกิดสิ่งมีชีวิตจำพวกรา และสาหร่ายขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัสดุพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ

โดยจากการสำรวจก็พบสิ่งมีชีวิตที่เป็นราและมอสเป็นจำนวนมาก ดังนั้นคราบหมองหม่นเกิดขึ้นเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน โดยปัจจัยหลักคือ ได้แก่ สภาพอากาศที่มีความชื้นและปริมาณน้ำฝนที่สูง กล่าวคือการที่น้ำฝนตกลงมาแล้วเกิดการชะล้างบนโมเสกและปูนยาแนวไหลจากที่สูงลงด้านล่างรอบองค์พระมหาธาตุเจดีย์ เกิดเป็นคราบหินปูนสะสมบนทางเดินพื้นและบันไดเป็นจำนวนมากนั่นเอง นอกจากนี้การที่โมเสกมีความชอบน้ำยังสามารถทำให้เกิดการสะสมคราบฝุ่นบนพื้นผิวของโมเสกทำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของราและมอส ซึ่งจัดว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคราบหมองหม่นขึ้นบนองค์พระมหาธาตุเจดีย์

## 4.2 ผลการหาสารเคลือบผิว อนุภาคนาโน และสูตรเคลือบผิว

### 4.2.1 ผลการหาพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิว

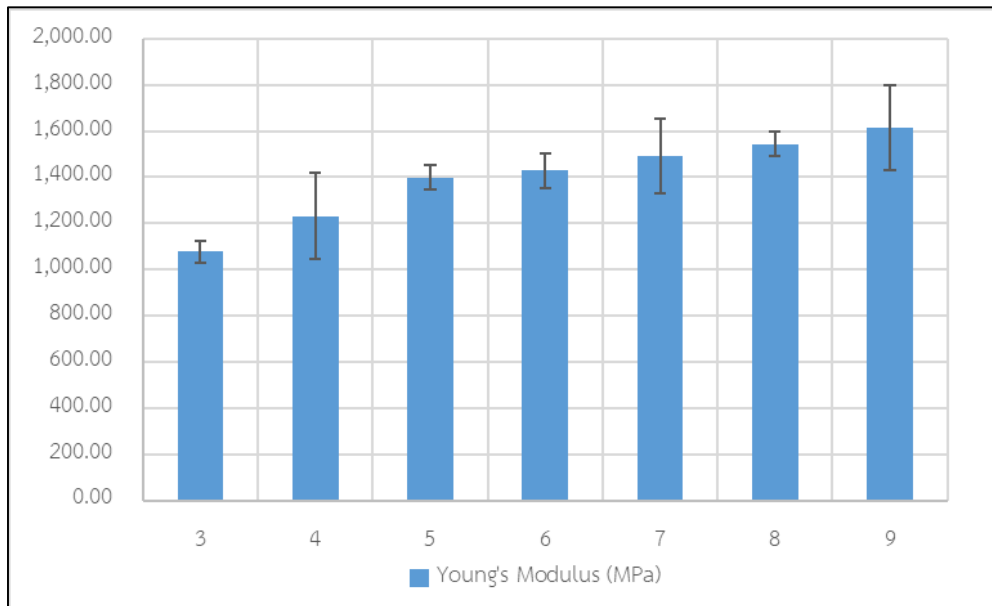
การขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซินและพอลิยูรีเทนในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าอีพ็อกซีเรซินสามารถขึ้นรูปได้ 8 สูตรจากทั้งหมด 10 สูตร ในขณะที่พอลิยูรีเทนสามารถขึ้นรูปได้ทั้ง 10 สูตร ซึ่งผลการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซินและพอลิยูรีเทนได้แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการขึ้นรูปของอีพ็อกซีเรซินและพอลิยูรีเทน

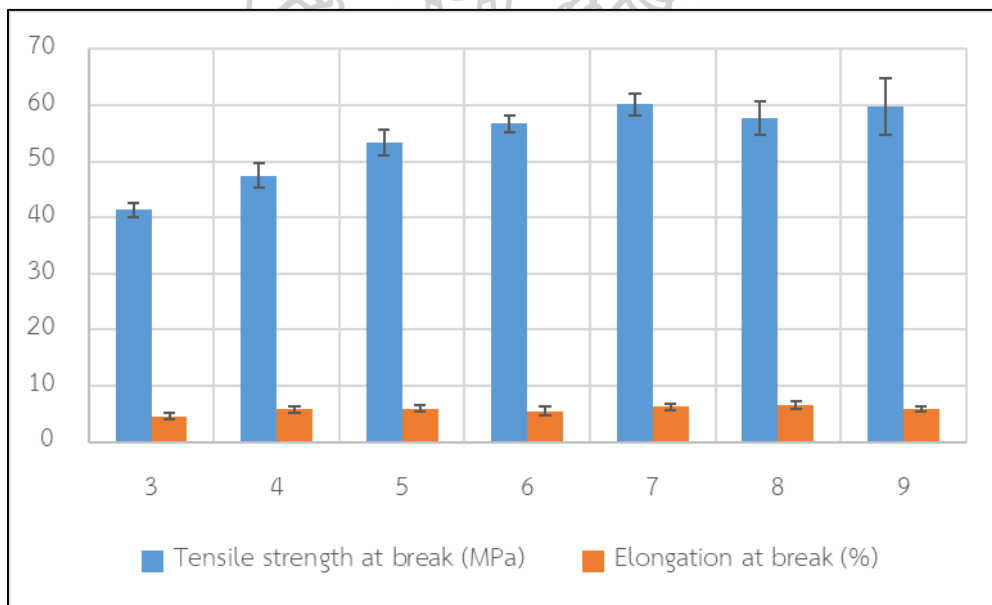
สูตรที่	อีพ็อกซีเรซิน			พอลิยูรีเทน		
	Part A (g)	Part B (g)	ขึ้นรูป	Part A (g)	Part B (g)	ขึ้นรูป
1	5	0.50	✗	8	0.5	✓
2	5	0.75	✗	8	1.0	✓
3	5	1.00	✓	8	1.5	✓
4	5	1.25	✓	8	2.0	✓
5	5	1.50	✓	8	2.5	✓
6	5	1.75	✓	8	3.0	✓
7	5	2.00	✓	8	3.5	✓
8	5	2.25	✓	8	4.0	✓
9	5	2.50	✓	8	4.5	✓
10	5	2.75	✓	8	5.0	✓

การหาอัตราส่วนของสารยึดเกาะที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

การหาอัตราส่วนของสารยึดเกาะที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์สมบัติเชิงกล จะวัดจากคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ซึ่งจะพิจารณาจากค่ามอดูลัส, Tensile strength และ Elongation ซึ่งค่าสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีเรซินสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jorge Antônio Vieira Gonçalves และคณะ [55] จากรูปที่ 52 และรูปที่ 53 แสดงให้เห็นถึงทุกสูตรแข็งและเปราะมากเกินไป และมีค่ามอดูลัสที่สูงประมาณ 1000 Mpa รวมไปถึงค่า Elongation ต่ำ ดังนั้นอีพ็อกซีเรซินจึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาเป็นสารเคลือบผิว

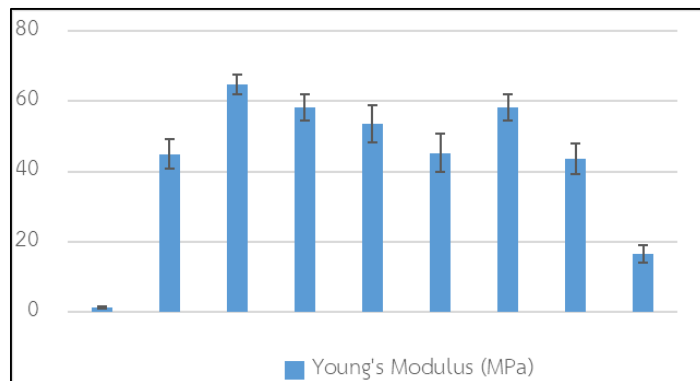


รูปที่ 52 แสดงค่ามอดูลัสของอีพ็อกซีเรซิน

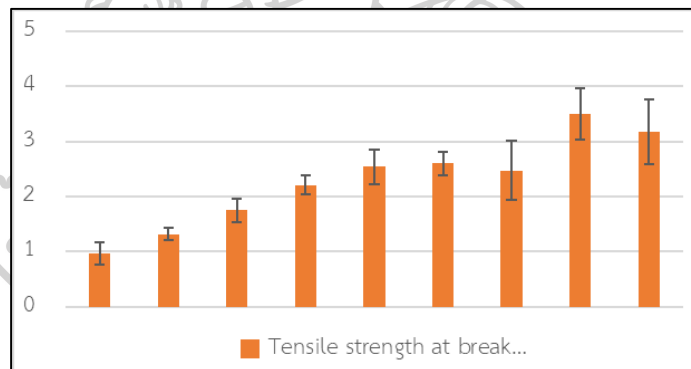


รูปที่ 53 แสดงค่า Tensile strength ของอีพ็อกซีเรซิน

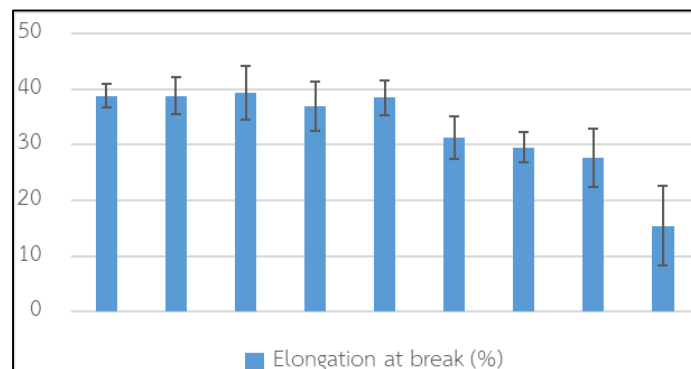
ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทน เช่น ค่ามอดูลัส, Tensile strength และ Elongation พบว่า ค่าสมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนสอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Ugresic และคณะ [56] ในงานวิจัย หัวข้อ “New Developments in Polyurethane Sheet Moulding Compound” ดังแสดงในรูปที่ 54, 55 และ 56 และจากค่ามอดูลัส, Tensile strength และ Elongation ของพอลิยูรีเทนทำให้สามารถเลือกสูตรของสารเคลือบที่เหมาะสมที่สุดได้คือ  $A/B = 8/2$



รูปที่ 54 แสดงค่ามอดูลัสของพอลิยูรีเทน



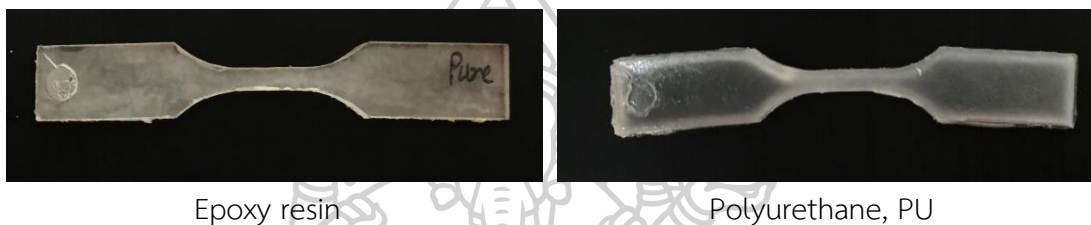
รูปที่ 55 แสดงค่า Tensile strength ของพอลิยูรีเทน



รูปที่ 56 แสดงค่า Elongation ของพอลิยูรีเทน



ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมสารปรับปรุงพื้นผิว (Surface modifier) ให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ พร้อมทั้งมีสมบัติติดทนนานจะอาศัยสารยึดเกาะ (Binding agent) นอกจากนี้สารยึดเกาะนั้นต้องมีสมบัติที่ให้ความใสเมื่อเคลือบไปบนพื้นผิว และต้องไม่เกิดการบดบังสีหรือคุณสมบัติเดิมของพื้นผิว รวมไปถึงการนำไปใช้ในระดับมหภาคที่มีราคาที่ไม่แพงเป็นที่ต้องการอย่างมาก และสามารถทำได้ค่อนข้างง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห ทนต่อสารเคมี และสภาพแวดล้อมภายนอก โดยพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) และ พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU)



รูปที่ 57 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการหล่อลงเข้าหล่อ

จากรูปที่ 57 พบว่าลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานตัวอย่างพบว่า ชิ้นงานที่มาจากพอลิยูรีเทนมีความใสมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากอีพ็อกซีเรซิน นอกจากนี้การแข็งตัวของพอลิยูรีเทนใช้ระยะเวลาที่น้อยกว่าอีพ็อกซีเรซิน อีกทั้งพอลิยูรีเทนนั้นสามารถใช้ภายนอกที่ต้องเจอกับสภาวะอากาศได้โดยที่เนื้อพอลิเมอร์ไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเหมือนพอลิยูรีเทน

ดังนั้นจากลักษณะทางกายภาพและการแห้งตัวแล้วพอลิยูรีเทนเป็นสารยึดเกาะที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำการเคลือบผิวต่อไป

#### 4.2.2 ผลการหาคอนเทนทอนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ

ในงานวิจัยนี้จะใช้อนุภาคนาโนจำนวน 3 ชนิดได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  และ Hydrophobic Fumed Silica (HFS) ซึ่งเป็นอนุภาคที่นิยมใช้กันในกระบวนการเคลือบผิวให้ไม่ชอบน้ำ (โดยเฉพาะ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$ ) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพหลังจากเผาที่  $800^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 58



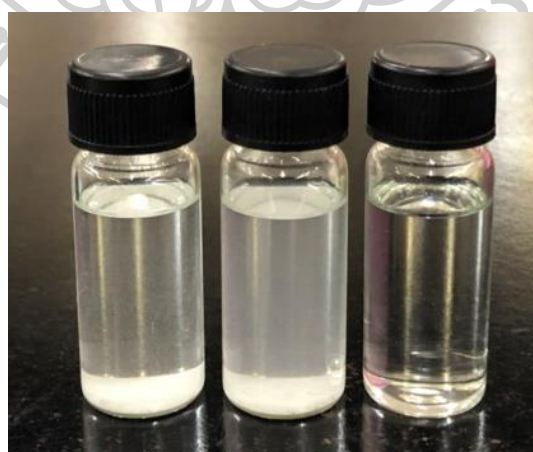
รูปที่ 58 แสดงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนที่ได้หลังจากการเผาที่  $800^\circ\text{C}$

(ก)  $\text{TiO}_2$

(ข)  $\text{ZnO}$

(ค) Hydrophobic Fumed Silica (HFS)

จากการนำ  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  และ Hydrophobic Fumed Silica (HFS) มาศึกษาการกระจายตัวในตัวทำละลายของ PU ซึ่งเป็นทินเนอร์ มาผสมกับอนุภาคนาโนแต่ละชนิดแล้วทิ้งให้เวลาผ่านไปเป็นเวลา 15 นาที พบว่า Hydrophobic Fumed Silica (HFS) มีการกระจายตัวในตัวทำละลายของ PU ดีที่สุดดังรูปที่ 59



$\text{TiO}_2$

$\text{ZnO}$

HFS

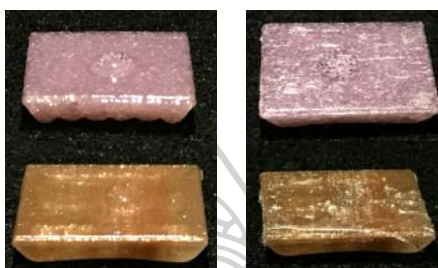
รูปที่ 59 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายทินเนอร์

#### 4.2.3 ผลการหาวิธีเคลือบพื้นผิวด้วยสารเคลือบที่มีอนุภาคนาโน

##### วิธีการจุ่มเคลือบ

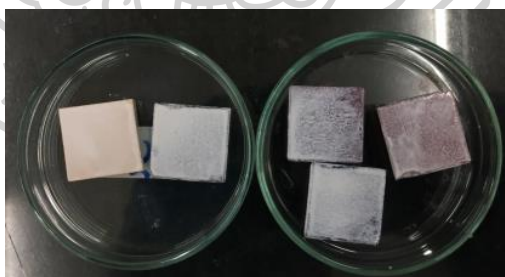
เมื่อทำการจุ่มเคลือบตัวอย่างชิ้นงานด้วยพอลิยูรีเทน พบว่าการจุ่มเคลือบทำให้ตัวอย่างมีลักษณะเงาขึ้น โดยมีความหนาที่เพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 60

ก่อนการจุ่มเคลือบ    หลังการจุ่มเคลือบ

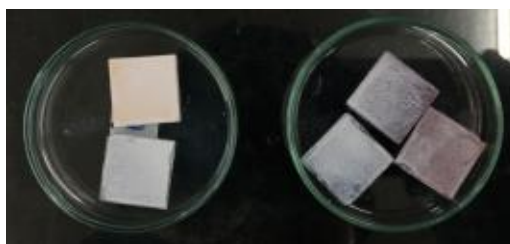


รูปที่ 60 แสดงตัวอย่างชิ้นงานก่อนและหลังการจุ่มเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน

เมื่อทำการจุ่มเคลือบโดยมีอนุภาคนาโน ZnO (ที่เป็นอนุภาคที่กระจายตัวได้ไม่ดี) อยู่ในสารละลายอะซิโตน พบว่าโมเสกตัวอย่างถูกบดบังด้วยอนุภาคนาโน ZnO ซึ่งทำให้ไม่เห็นสีเดิมของตัวอย่างจริงดังรูปที่ 61 และเมื่อจุ่มด้วย 5%wt Stearic acid เพื่อเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิว พบว่าพื้นผิวตัวอย่างเดิมยังคงถูกบดบังด้วยอนุภาค ZnO อยู่เช่นเดิมดังรูปที่ 62 และรูปก่อนและหลังการจุ่มเคลือบของโมเสกได้แสดงดังตารางที่ 8



รูปที่ 61 แสดงการจุ่มเคลือบพอลิยูรีเทน/ZnO ในสารละลายอะซิโตน



รูปที่ 62 แสดงลักษณะของโมเสกหลังจากการจุ่มเคลือบด้วย Stearic acid

ตารางที่ 8 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานก่อนและหลังจุ่มเคลือบ





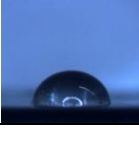
	สีเทาเข้ม	สีม่วง	สีเทาอ่อน	สีทอง	สีน้ำตาล
ก่อนการจุ่มเคลือบ					
หลังการจุ่มเคลือบ					

### วิธีการทำ

สำหรับวิธีการทำจะใช้อัตราส่วนของพอลิยูรีเทนที่เป็นสารยึดเกาะในอัตราส่วนเดิม คือ PU resin (Part A) : Hardener (Part B) : Solvent (Part C) อัตราส่วน 8 : 2 : 2 โดยมีการเพิ่มองค์ประกอบของพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ PDMS และใช้  $\text{TiO}_2$  และ Hydrophobic fume silica (HFS) เป็นอนุภาคนาโน

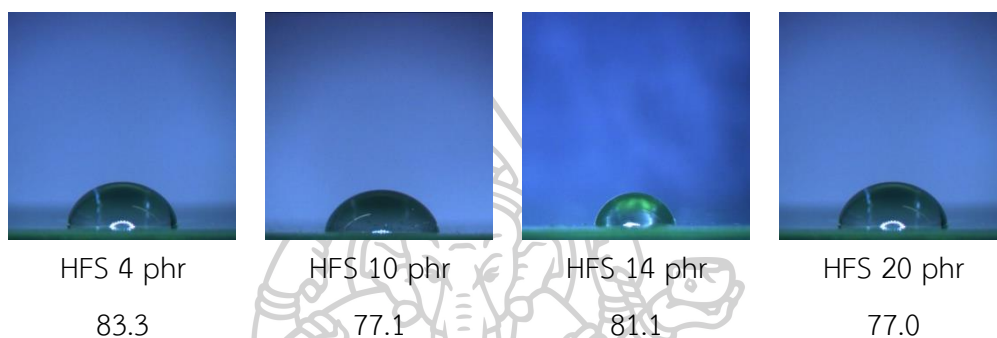
ผลการทดลองพบว่าพื้นผิวที่ทาเสร็จที่มีองค์ประกอบของ  $\text{TiO}_2$  ก็ยังคงบดบังพื้นผิวเดิมของตัวอย่าง เมื่อนำไปวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำพบว่า พื้นผิวที่ถูกทาด้วยสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของ Hydrophobic fumed silica ปริมาณ 0.1 phr มีค่ามุมสัมผัสที่มากกว่าสารเคลือบตัวอื่น คือ  $80.0^\circ$  ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงลักษณะมุมสัมผัสของน้ำของพื้นผิวที่ทาเคลือบด้วยสารเคลือบสูตรต่างๆ

สูตรเคลือบผิวที่	องค์ประกอบ	รูปหยดน้ำบนผิวเคลือบ	มุมสัมผัสของน้ำ ( $^\circ$ )
1	PU		72.3
2	PU + $\text{TiO}_2$ 0.1 phr		75.9
3	PU + HFS 0.1 phr		80.0
4	PU + PDMS 2 phr		67.7
5	PU + $\text{TiO}_2$ 0.1 phr + PDMS 2 phr		73.9

### วิธีการพ่นเคลือบ

จากการพ่นเคลือบด้วย Hydrophobic fumed silica (HFS) 4 phr, 10 phr, 14 phr และ 20 phr พบว่าแผ่นโม่เสกมีความใสกว่าวิธีการทา หรือวิธีการจุ่มเคลือบ และค่ามุมสัมผัสไม่แตกต่างจากการทา (ดังรูปที่ 63) เนื่องจากการผสมอนุภาคนาโนลงไปทำให้อนุภาคนาโนฝังอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ของพอลิยูรีเทน ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานที่เคลือบด้วยสารเคลือบที่ผสม HFS ด้วยวิธีการพ่นแบบธรรมดา มีค่าใกล้เคียงกับเมื่อเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนแบบทาและแบบพ่น

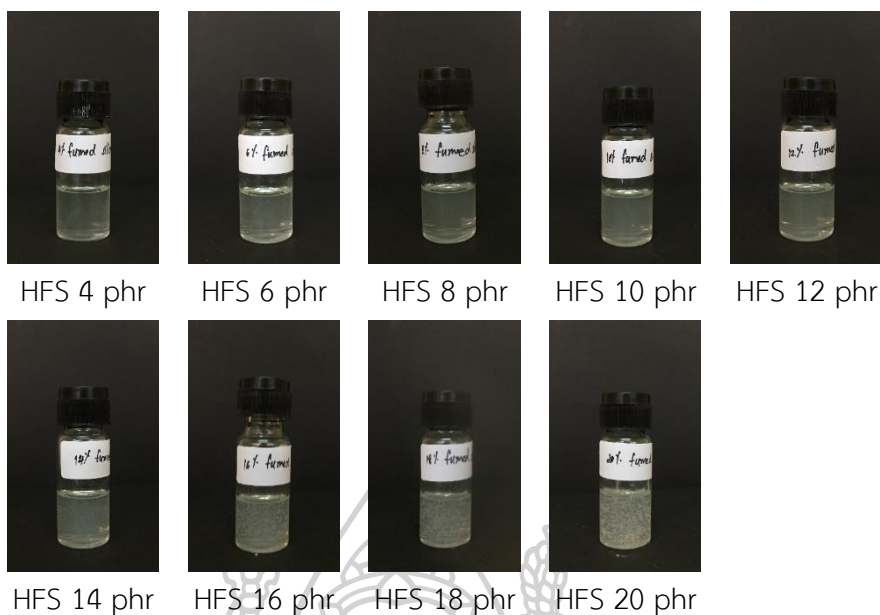


รูปที่ 63 แสดงค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวที่ถูกพ่นเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน/HFS ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.2.4 ผลการหาสถานะของการพ่นเคลือบ

##### ผลการหาปริมาณ HFS ที่สามารถพ่นเคลือบได้

จากการเตรียม Hydrophobic fumed silica (HFS) ให้มีปริมาณ 4 phr, 6 phr, 8 phr, 10 phr, 12 phr, 14 phr, 16 phr, 18 phr และ 20 phr ใน Thinner ปริมาณ 20 g เพื่อทดสอบการพ่นและทดสอบการกระจายตัว และทดสอบความใสของ HFS ใน Thinner พบว่าปริมาณ HFS ที่มีค่ามากกว่า 14 phr จะมีความหนืดมากขึ้นและในขณะเดียวกันจะมีความใสลดลง ถ้าหากปริมาณ HFS ที่มีค่ามากกว่า 14 phr จะไม่สามารถทำการพ่นเคลือบลงบนพื้นผิววัสดุได้ ดังนั้นปริมาณ HFS ที่เหมาะสมที่ใช้สำหรับการพ่นคือ 4 phr HFS, 6 phr HFS, 8 phr HFS, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS สำหรับลักษณะการกระจายตัวและความใสของ HFS ในสารละลาย Thinner ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 64



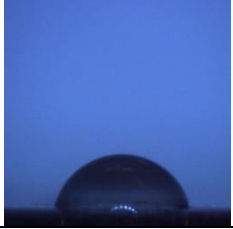





รูปที่ 64 แสดงการกระจายตัวของ HFS ในสารละลาย Thinner ที่ความเข้มข้นต่างๆ

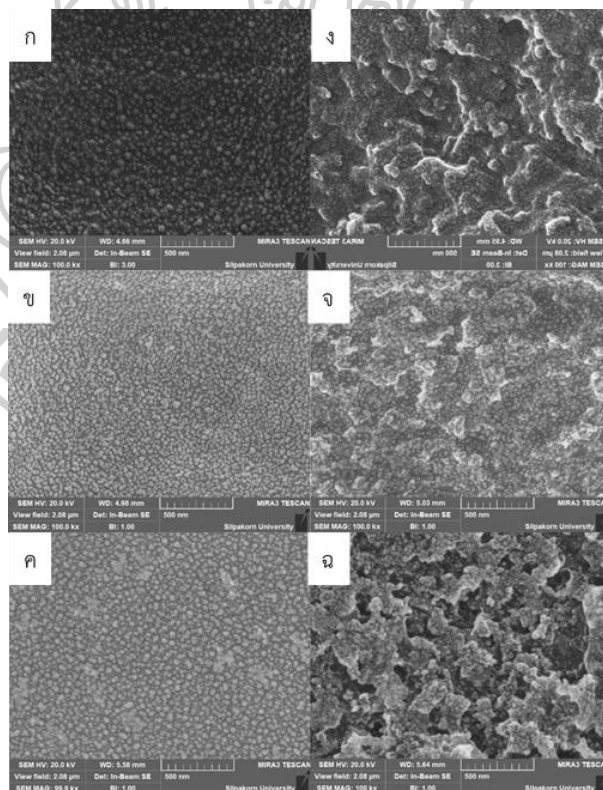
#### ผลการหาเทคนิคการพ่นเคลือบ

จากการทดลองการเปรียบเทียบวิธีการพ่นเคลือบแบบธรรมดาและแบบ Base – top coat โดยการพ่นแบบธรรมดาจะทำการพ่นเคลือบโดยผสม PU + HFS แล้วพ่นลงบนแผ่นโมเสก สำหรับการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat จะทำการพ่นเคลือบ PU ลงไปก่อนและในขณะที่พอลิเมอร์กำลังเซ็ดตัว HFS ในสารละลาย Thinner จะถูกพ่นลงไปบน PU ที่กำลังเซ็ดตัว

ผลการทดลองพบว่า การพ่นเคลือบแบบธรรมดาโดยใช้ HFS 10 phr, HFS 12 phr และ HFS 14 phr จะให้ค่ามุมสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน คือ  $79.8^{\circ}$ ,  $79.8^{\circ}$  และ  $79.5^{\circ}$  ตามลำดับ แตกต่างจากการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat ที่มุมสัมผัสมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณ HFS ที่เพิ่มมากขึ้น นั่นคือ  $100.7^{\circ}$ ,  $114.8^{\circ}$  และ  $128.1^{\circ}$  ตามลำดับดังตารางที่ 10 เนื่องจากว่าการพ่นแบบธรรมดาจะทำให้อนุภาคของ HFS เข้าไปผสมอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat จะทำให้อนุภาคของ HFS เกาะอยู่บนผิว PU และได้แสดงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ สังเกตจากภาพ SEM ของการพ่นเคลือบที่ใช้เทคนิคแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 65 โดยการพ่นเคลือบแบบธรรมดาจะพบว่า HFS 10 phr, HFS 12 phr และ HFS 14 phr อนุภาคมีการจัดเรียงแบบสม่ำเสมอ ในขณะที่การพ่นเคลือบแบบ Base – top coat จะมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ HFS ที่เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้นจึงมีมุมสัมผัสที่มากขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 10 แสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำด้วยการพ่นเคลือบแบบธรรมดาและแบบ Base – top coat

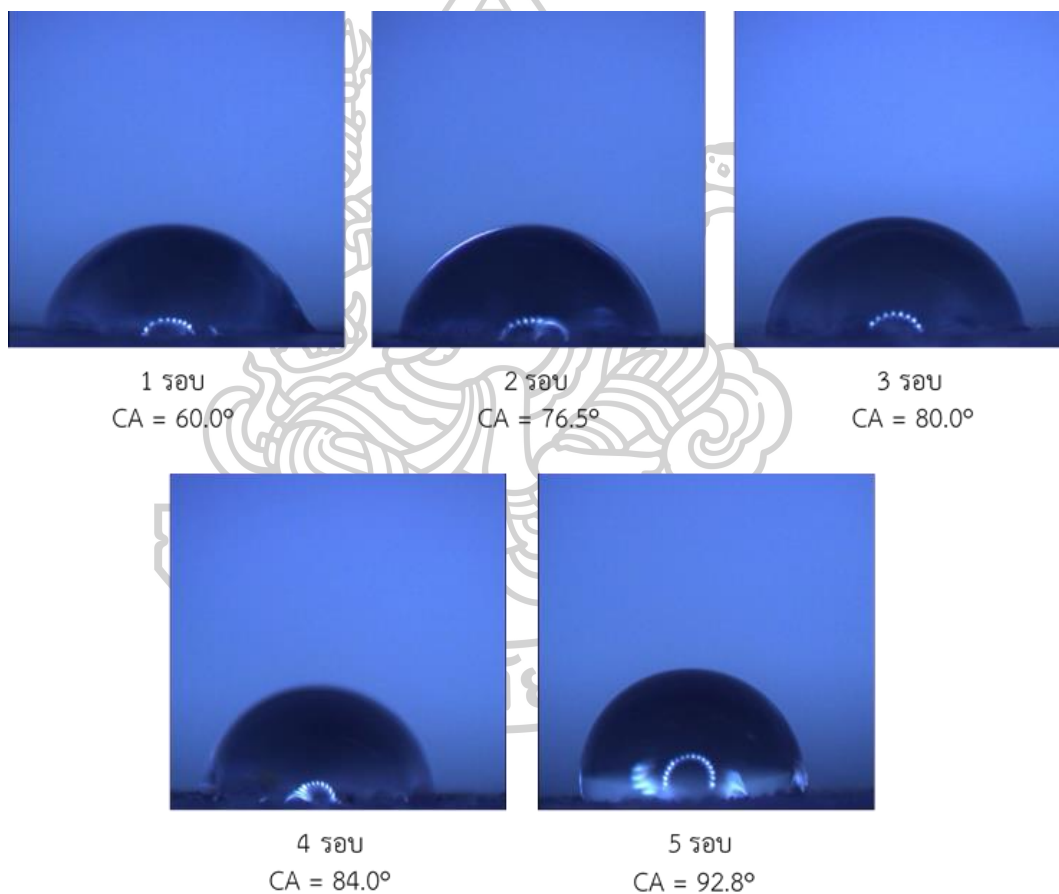
วิธีการพ่น	HFS 10 phr	HFS 12 phr	HFS 14 phr
พ่นแบบธรรมดา	 79.8°	 79.8°	 79.5°
พ่นแบบ Base – top coat	 100.7°	 114.8°	 128.1°



รูปที่ 65 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคการพ่นเคลือบที่แตกต่างกัน การพ่นเคลือบแบบธรรมดาที่มีปริมาณ HFS 10 phr, 12 phr และ 14 phr ดังรูปที่ 64ก, 64ข และ 64ค ตามลำดับ และการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat ที่มีปริมาณ HFS 10 phr, 12 phr และ 14 phr ดังรูปที่ 64ง, 64จ และ 64ฉ ตามลำดับ

### ผลการหาจำนวนรอบของการพ่นเคลือบ

จากการพ่นเคลือบด้วย HFS ปริมาณ 10 phr ในสารละลาย Thinner ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ (โดยการพ่นซ้ายไปขวานับเป็นการพ่น 1 รอบ) ผลการทดลองพบว่าการพ่นด้วยจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่เพิ่มมากขึ้นคือ  $60.0^{\circ}$ ,  $76.5^{\circ}$ ,  $80.0^{\circ}$ ,  $84.0^{\circ}$  และ  $92.8^{\circ}$  ตามลำดับดังรูปที่ 66 เป็นผลเนื่องมาจากการพ่นเคลือบที่จำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณ HFS ให้เกาะบนพื้นผิว PU เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีปริมาณ HFS บนพื้นผิวของ PU มากขึ้นก็จะส่งผลให้ HFS แสดงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ HFS ที่เพิ่มขึ้น



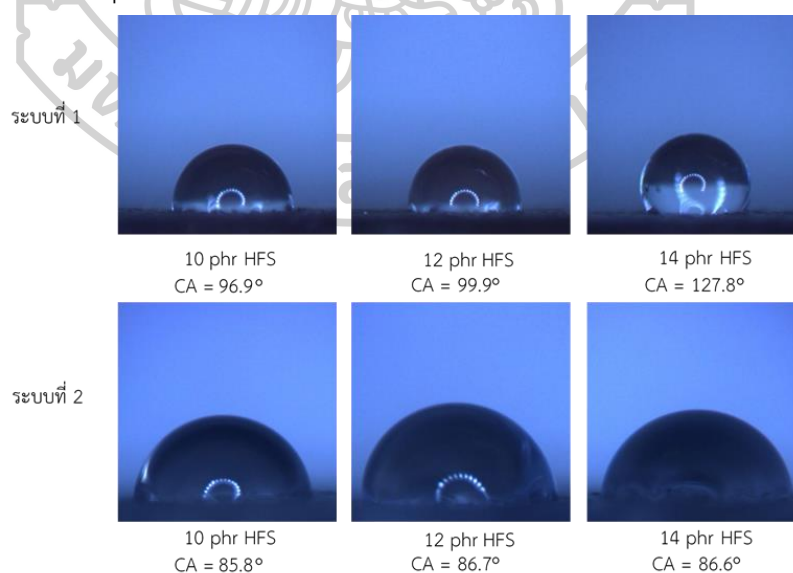
รูปที่ 66 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำที่การพ่นเคลือบในจำนวนรอบที่แตกต่างกัน



### ผลการพ่นเคลือบในสถานะที่มีความชื้น

จากการทดลองการพ่นเคลือบในสถานะที่มีความชื้นในระบบที่ 1 (ที่เตรียมโดยการนำบีกเกอร์ที่มีน้ำปริมาตร 500 ml ไปแช่ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน) พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของระบบที่ 1 มีค่า 69%RH และจากการนำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่ามีค่า 96.9°, 99.9° และ 127.8° ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้จากการพ่นในสถานะชื้นของระบบที่ 1 แตกต่างจากการพ่นเคลือบ Base-top coat ในสถานะปกติไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่าที่ความชื้น 69%RH ไม่มีผลต่อค่ามุมสัมผัสน้ำ

สำหรับการทดลองการพ่นเคลือบในสถานะที่มีความชื้นในระบบที่ 2 (ที่เตรียมโดยการฉีดละอองน้ำปริมาตร 10 ml ด้วยกระบอกฉีดน้ำในตู้ควบคุมความชื้น) พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของระบบที่ 1 มีค่า 81%RH และจากการนำแผ่นโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่ามีค่า 85.8°, 86.7° และ 86.6° ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้จากการพ่นเคลือบในสถานะชื้นของระบบที่ 2 แตกต่างจากการพ่นเคลือบ Base-top coat ในสถานะปกติอย่างมาก เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้คือ Thinner ซึ่งประกอบด้วย Butyl acetate, Ethelene glycol monoethyl-ether, Toluene และ Xylene ตัวทำละลายส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่มีขั้ว ซึ่งในตัวทำละลายมี HFS ที่เป็นอนุภาคกระจายตัวอยู่ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) ในปริมาณที่มากเกินไป จึงทำให้เกิดการแยกเฟสของตัวทำละลายขึ้นระหว่างการพ่นเคลือบ จึงทำให้ HFS ยึดติดกับ PU ได้ไม่ดี ทำให้ได้ค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่าน้อยกว่าการพ่นแบบ Base - top coat ในสถานะปกติ (สถานะปกติมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 58%RH)



รูปที่ 67 แสดงมุมสัมผัสของน้ำที่การพ่นสถานะความชื้นระบบแตกต่างกัน

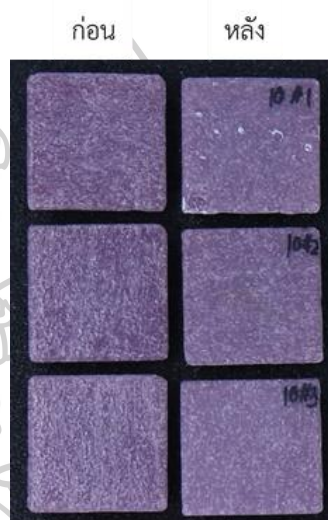
(บน) การพ่นในสถานะชื้นระบบที่ 1

(ล่าง) การพ่นในสถานะชื้นระบบที่ 2

### 4.3 ผลการศึกษาสมบัติการทนต่อสภาวะต่างๆ

#### 4.3.1 ผลการทดสอบความโปร่งใสของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ

ในการทดสอบความโปร่งใสของสารเคลือบผิวจะทำการพ่นเคลือบผิวโดยใช้เทคนิค Base - top coat ที่มีความเข้มข้นของ HFS ที่แตกต่างกันคือ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS พ่นลงไปทีโมเสกอย่างละ 3 แผ่น โดยลักษณะของโมเสกที่ทำการเคลือบผิวได้แสดงดังรูปที่ 68-70 ตามลำดับ และค่าสีของโมเสกในระบบ  $L^* a^* b^*$  ได้แสดงในตารางที่ 11-13 ตามลำดับ



รูปที่ 68 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส)

ตารางที่ 11 แสดงค่าสีในระบบ  $L^*, a^*, b^*$  ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS

แผ่นที่	ค่าสี	ก่อนพ่นเคลือบ	หลังพ่นเคลือบ	$\Delta E$
1	$L^*$	48.4702	49.3866	1.7910
	$a^*$	5.3503	4.3627	
	$b^*$	-5.9039	-4.7238	
2	$L^*$	48.4562	50.8011	2.5742
	$a^*$	4.4392	4.8195	
	$b^*$	-4.1868	-5.1784	
3	$L^*$	50.4225	51.4284	1.1635
	$a^*$	5.0747	4.6103	
	$b^*$	-5.1385	-4.7831	
ค่าเฉลี่ย $\Delta E$				1.8429 $\pm$ 0.7068



รูปที่ 69 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส)

ตารางที่ 12 แสดงค่าสีในระบบ  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS

แผ่นที่	ค่าสี	ก่อนพ่นเคลือบ	หลังพ่นเคลือบ	$\Delta E$
1	$L^*$	45.3497	54.2821	2.2537
	$a^*$	5.7466	3.2821	
	$b^*$	-6.8622	-4.5225	
2	$L^*$	50.2519	51.2468	1.5423
	$a^*$	5.0080	4.4580	
	$b^*$	-5.7307	-4.6884	
3	$L^*$	50.4886	53.0810	1.6565
	$a^*$	4.1103	3.3536	
	$b^*$	-5.1105	-4.7243	
ค่าเฉลี่ย $\Delta E$				$1.8175 \pm 0.3821$



รูปที่ 70 แสดงแผ่นโมเสกก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 14 phr HFS (ทดสอบความโปร่งใส)

ตารางที่ 13 แสดงค่าสีในระบบ L\*, a\*, b\* ก่อนและหลังพ่นเคลือบด้วย 14 phr HFS


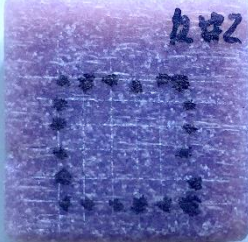
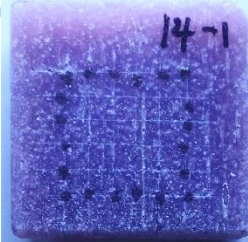
แผ่นที่	ค่าสี	ก่อนพ่นเคลือบ	หลังพ่นเคลือบ	$\Delta E$
1	L*	51.0108	49.0838	2.2270
	a*	4.7523	5.4836	
	b*	-4.9700	-5.8136	
2	L*	50.7684	50.0906	1.1813
	a*	4.0055	3.8271	
	b*	-4.6816	-5.6325	
3	L*	51.0153	50.8700	0.8542
	a*	4.8101	5.0110	
	b*	-5.6833	-4.8659	
ค่าเฉลี่ย $\Delta E$				1.4208 $\pm$ 0.7171

จากผลการคำนวณ  $\Delta E$  หรือค่าความแตกต่างของสี พบว่าโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบโดยใช้เทคนิค Base - top coat ที่มีความเข้มข้นของ HFS เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS มีค่า  $\Delta E$  อยู่ระหว่าง 1-2 ซึ่งถือว่าสีของโมเสกก่อนเคลือบและหลังเคลือบมีลักษณะที่ยอมรับได้ โดยความแตกต่างจะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อพิจารณาแบบใกล้ชิดเท่านั้น (Perceptible through close observation) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเคลือบผิวของโมเสก โดยมีความเข้มข้นของ HFS ในชั้น Top coat เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS สามารถพ่นเคลือบโมเสกได้โดยไม่บดบังสีของพื้นผิวโมเสกเดิม

#### 4.3.2 ผลการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบผิว

เมื่อทำการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบบนโมเสกทุกสูตร (ที่มีความเข้มข้นของ HFS โดยใช้เทคนิคการพ่นแบบ Base - top coat เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS) พบว่าทุกโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย HFS ที่มีความเข้มข้นเป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ผิวเคลือบที่ได้ทำการเคลือบหลุดลอกเพียงเล็กน้อยที่ตำแหน่งรอยกรีดตัดกันการหลุดลอกไม่เกิน 5% ของพื้นที่ตาราง ดังแสดงในตารางที่ 14 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารเคลือบทั้งสามสูตรนี้มีการยึดติดบนโมเสกที่แข็งแรงมาก เนื่องมาจากพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมเซต (Thermoset) และมีลักษณะเป็นร่างแห (Crosslink) จึงมีคุณสมบัติที่มีความทนต่อการขีดขูด และการขัดถูได้อย่างดี






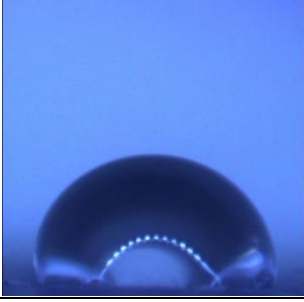
ตารางที่ 14 แสดงผลการทดสอบการยึดติดของฟิล์ม

ฟิล์มที่พ่นเคลือบ	ลักษณะพื้นผิวเคลือบที่หลุดลอก	ลักษณะพื้นผิวเคลือบที่หลุดลอก
10 phr HFS	น้อยกว่า 5%	
12 phr HFS	น้อยกว่า 5%	
14 phr HFS	น้อยกว่า 5%	

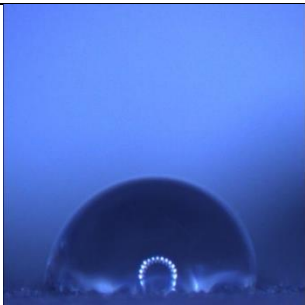
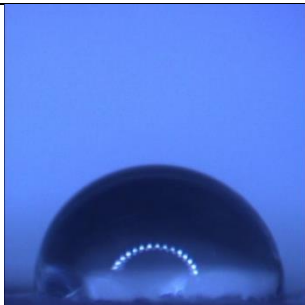



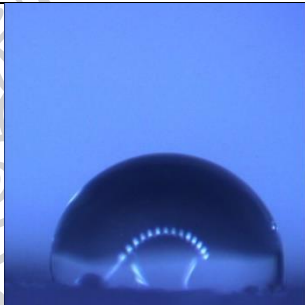
เมื่อนำโมเสกที่ผ่านการทดสอบการยึดติดมาวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของน้ำโดยเทียบกับก่อนการทดสอบการยึดติด พบว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำที่พื้นผิว (Hydrophobic surface) ที่เปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวโมเสกทั้งสามสูตร (ที่มีความเข้มข้นของ HFS โดยใช้เทคนิคการพ่นแบบ Base - top coat เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS) ไม่แตกต่างจากเดิมดังแสดงในตารางที่ 15-17 ตามลำดับ โดยสูตรที่มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากที่สุดคือโมเสกที่พ่นเคลือบในชั้น Top coat เป็น

14 phr HFS > 12 phr HFS > 10 phr HFS ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าผลการพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS และ 14 phr HFS ให้ค่ามุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  ซึ่งให้เห็นว่ามีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่พื้นผิว (Hydrophobic surface) อยู่ทั้งก่อนและหลังการทดสอบการยึดติด เนื่องจากการที่ฟิล์มหลุดออกในปริมาณที่น้อยมากดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 14 จึงทำให้ผิวของโมเสกหลังทำการทดสอบการยึดติดยังมีอนุภาคของ HFS เหลืออยู่เป็นจำนวนที่ใกล้เคียงกับจำนวนเดิม จึงทำให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำก่อนและหลังการทดสอบการยึดติดไม่แตกต่างกันมากนัก







ตารางที่ 15 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 10 phr HFS

โมเสก	ก่อนทดสอบการยึดติด	หลังทดสอบการยึดติด
แผ่นที่ 1	 86.4	 87.5
แผ่นที่ 2	 94.2	 89.0
แผ่นที่ 3	 89.2	 91.4
เฉลี่ย	$89.9 \pm 3.9$	$89.3 \pm 1.9$

ตารางที่ 16 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 12 phr HFS

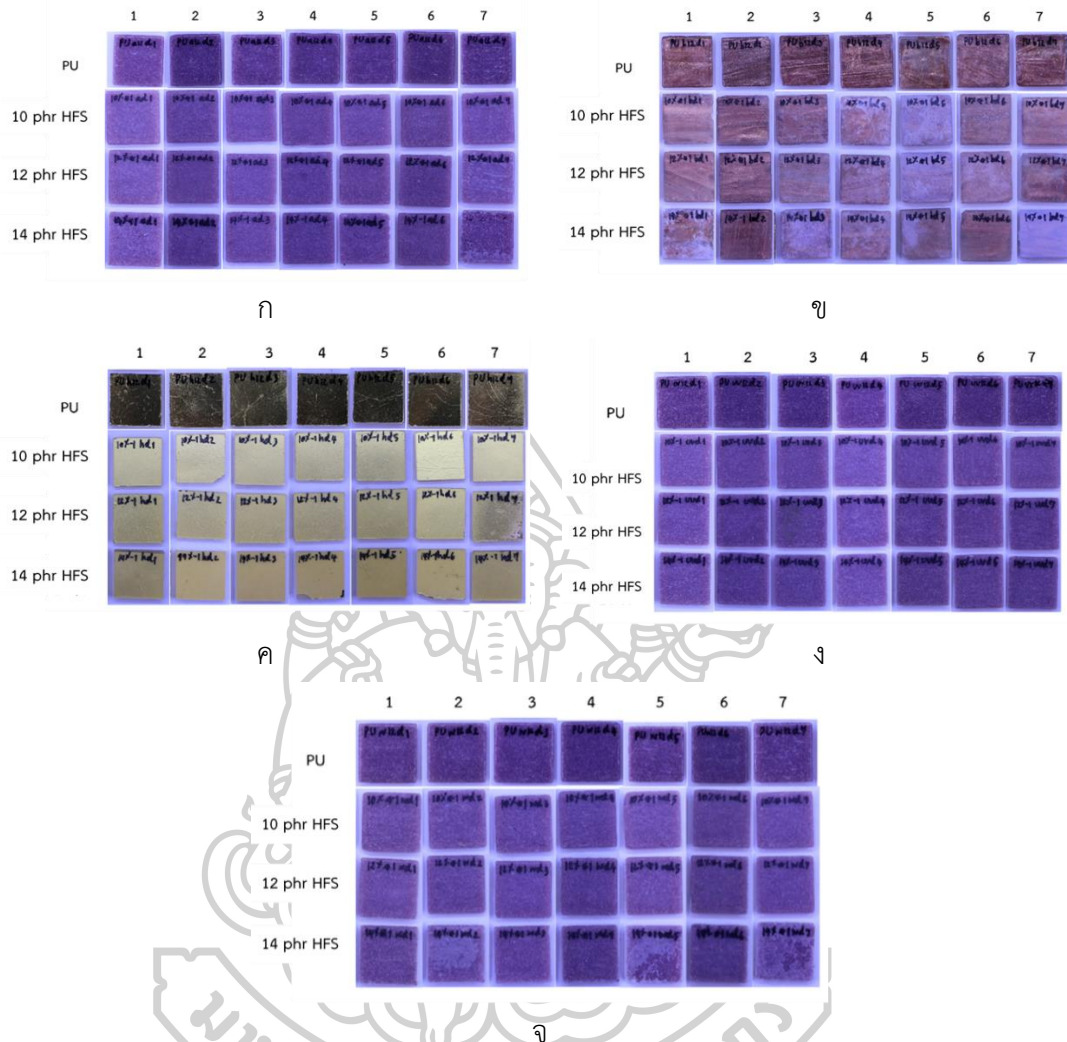
โมเสก	ก่อนทดสอบการยึดติด	หลังทดสอบการยึดติด
แผ่นที่ 1	 97.7	 95.6
แผ่นที่ 2	 104.9	 99.2
แผ่นที่ 3	 100.5	 101.0
เฉลี่ย	$101.0 \pm 3.6$	$98.6 \pm 2.8$

ตารางที่ 17 มุมสัมผัสของน้ำก่อน-หลังการทดสอบการยึดติดของโมเสกที่เคลือบด้วย 14 phr HFS

โมเสก	ก่อนทดสอบการยึดติด	หลังทดสอบการยึดติด
แผ่นที่ 1	 134.2	 139.1
แผ่นที่ 2	 134.7	 132.0
แผ่นที่ 3	 120.0	 120.5
เฉลี่ย	$129.6 \pm 8.3$	$130.5 \pm 9.4$



### ผลการทดสอบความทนของฟิล์มในสภาวะต่างๆ

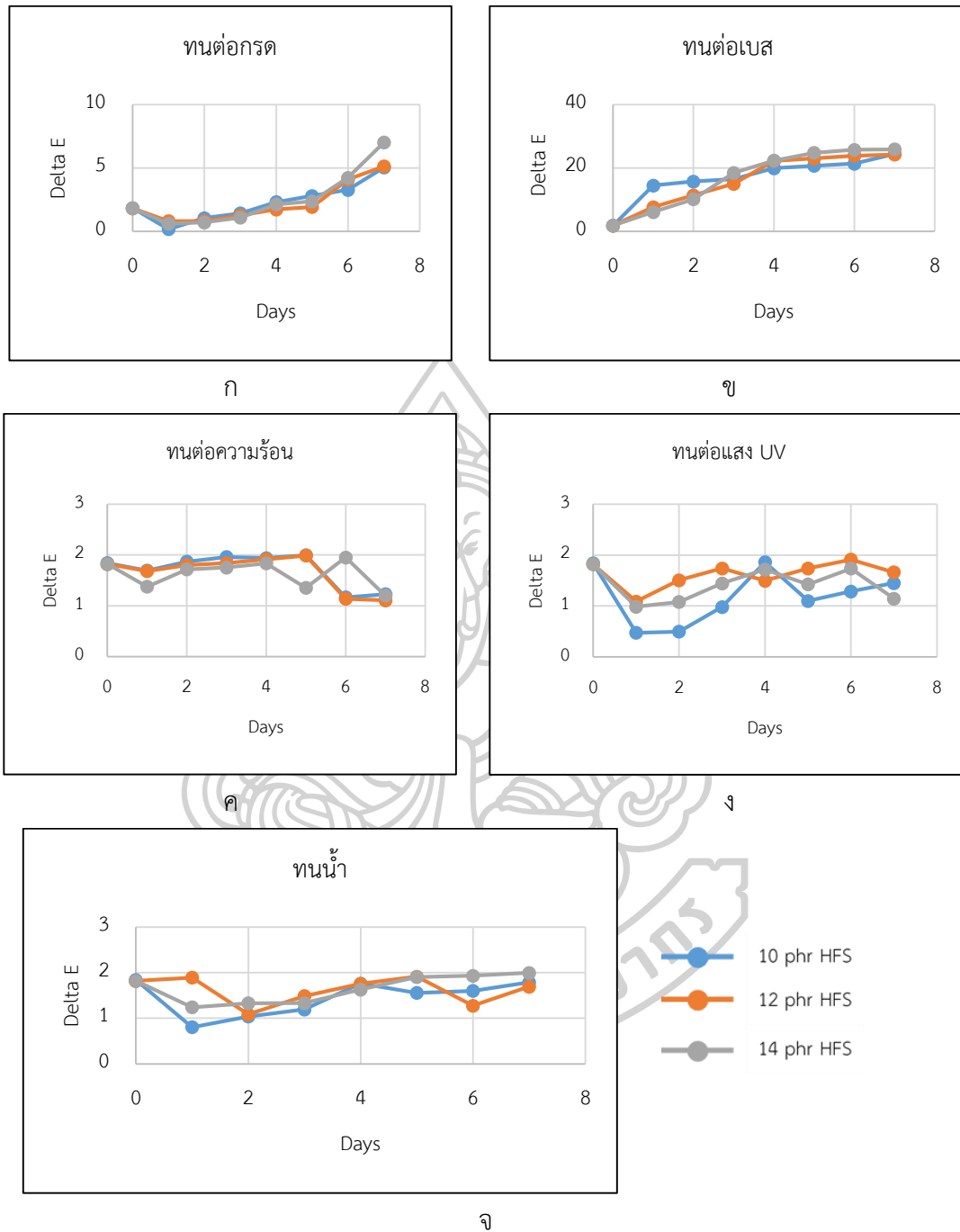


รูปที่ 71 แสดงรูปโมเสกหลังการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ในเวลา 7 วัน

- (ก) การทดสอบความทนต่อกรด      (ข) การทดสอบความทนต่อเบส  
 (ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน      (ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV  
 (จ) การทดสอบความทนน้ำ

สำหรับโมเสกที่ได้ทำการพ่นเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS เมื่อนำไปทดสอบความทนที่สภาวะต่างๆ เป็นเวลา 7 วันแล้ว พบว่าแผ่นโมเสกที่ทำการทดสอบความทนต่อกรด และทนต่อความร้อนสีของโมเสกก่อนการทดสอบและหลังทดสอบไม่แตกต่างกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ในขณะที่การทดสอบความทนต่อเบส สีของแผ่นโมเสกก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบที่ 7 วัน มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังรูปที่ 71 เนื่องจากความเป็นเบสที่รุนแรงถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จึงทำให้เกิดการกัดเซาะของพื้นผิวของแผ่นโมเสกที่มีการพ่นเคลือบ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS

#### 4.3.3 ผลการทดสอบค่าความแตกต่างของสี (Delta E) หลังการทดสอบที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 72 แสดงค่าความแตกต่างของสี (Delta E) หลังการทดสอบ

(ก) การทดสอบความทนต่อกรด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

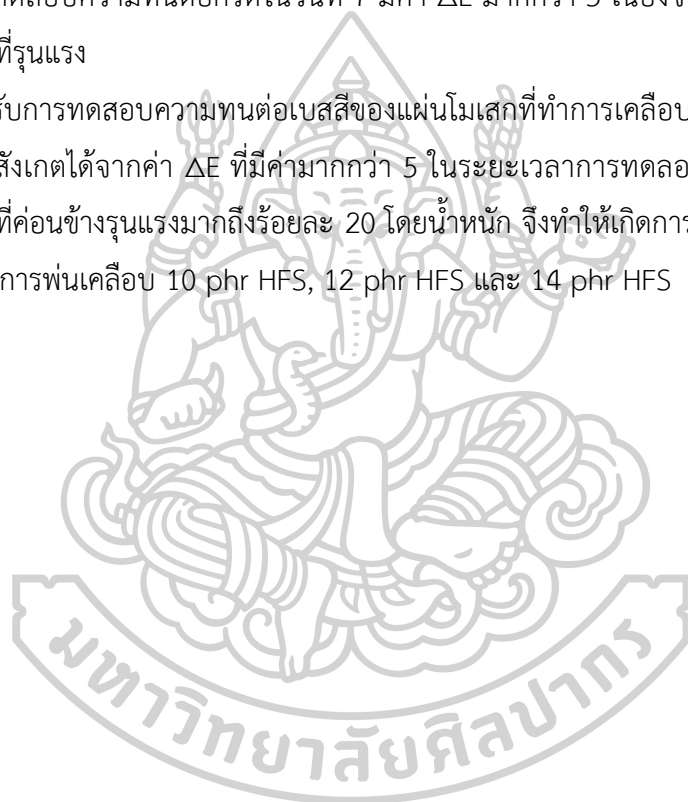
(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

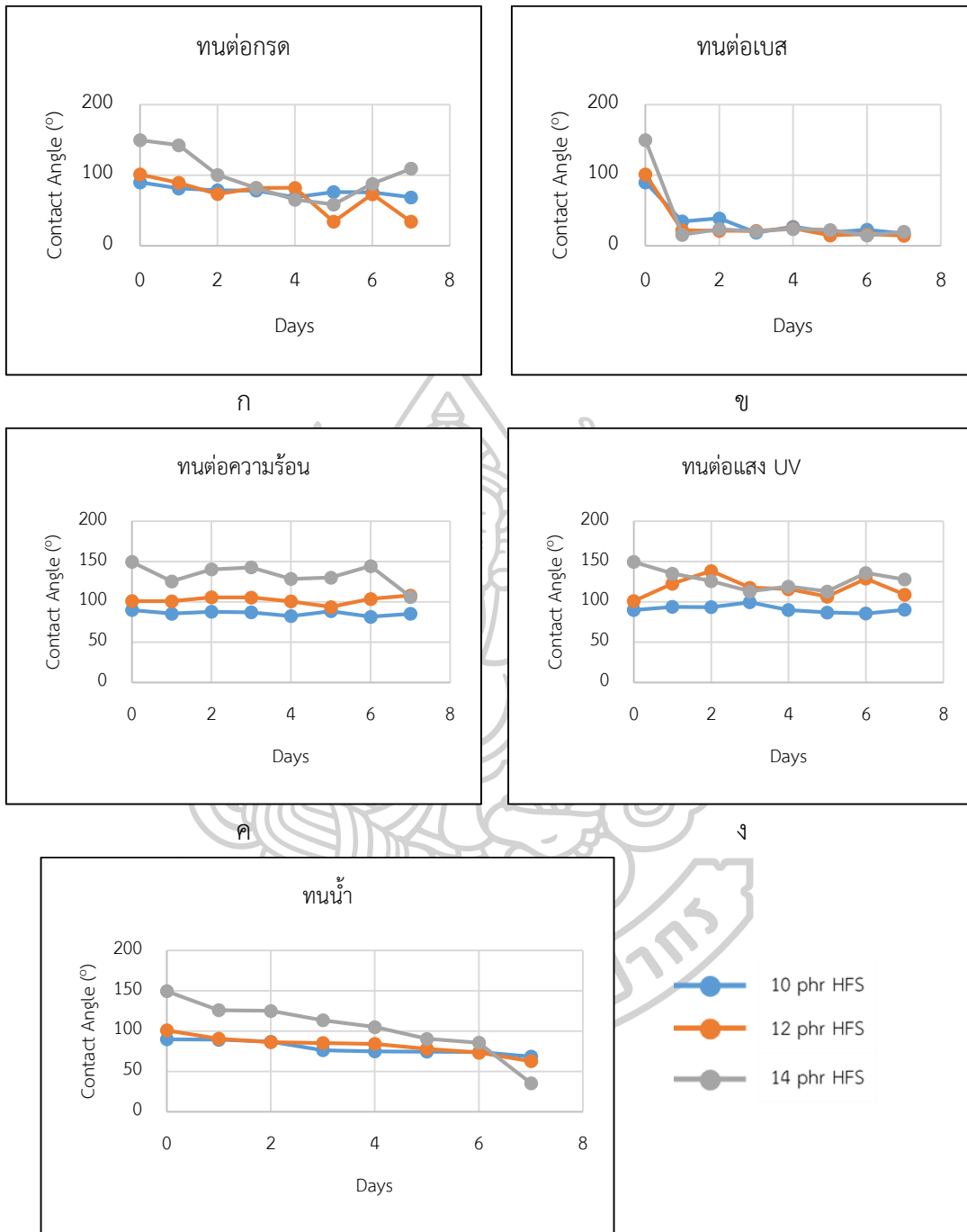
(จ) การทดสอบความทนน้ำ

จากการทดสอบค่าความแตกต่างของสี (Delta E) หลังการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของแผ่น โม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบที่สภาวะ เป็นเวลา 7 วัน ผลการทดลองพบว่าการทดสอบความทนต่อกรด, การทดสอบความทนต่อความร้อน, การทนต่อแสง UV และการทนต่อน้ำสีของโม่เสกก่อนทดสอบและหลังทดสอบแตกต่างกันเพียง เล็กน้อยเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าอย่างใกล้ชิดเท่านั้นสังเกตได้จากค่า  $\Delta E$  ที่มีค่าน้อยกว่า 5 ดังรูปที่ 72 ก, 72 ค, 72 ง และ 72 จ ตามลำดับ ซึ่งรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสีที่ความทนต่อ สภาวะต่างๆ ในทั้ง 7 วันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าอย่างใกล้ชิดเท่านั้น ในขณะที่ สภาวะการทดสอบความทนต่อกรดในวันที่ 7 มีค่า  $\Delta E$  มากกว่า 5 เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนของ พื้นผิวที่มีกรดที่รุนแรง

สำหรับการทดสอบความทนต่อเบสสีของแผ่นโม่เสกที่ทำการเคลือบแล้วมีความแตกต่างกัน อย่างชัดเจน สังเกตได้จากค่า  $\Delta E$  ที่มีค่ามากกว่า 5 ในระยะเวลาการทดลองทั้ง 7 วัน เนื่องมาจาก ความเป็นเบสที่ค่อนข้างรุนแรงมากถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของพื้นผิวของ แผ่นโม่เสกที่มีการพ่นเคลือบ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS



4.3.4 ผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำหลังการทดสอบการทนที่สถานะต่างๆ



รูปที่ 73 แสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำหลังการทดสอบ

(ก) การทดสอบความทนต่อกรด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

(จ) การทดสอบความทนน้ำ

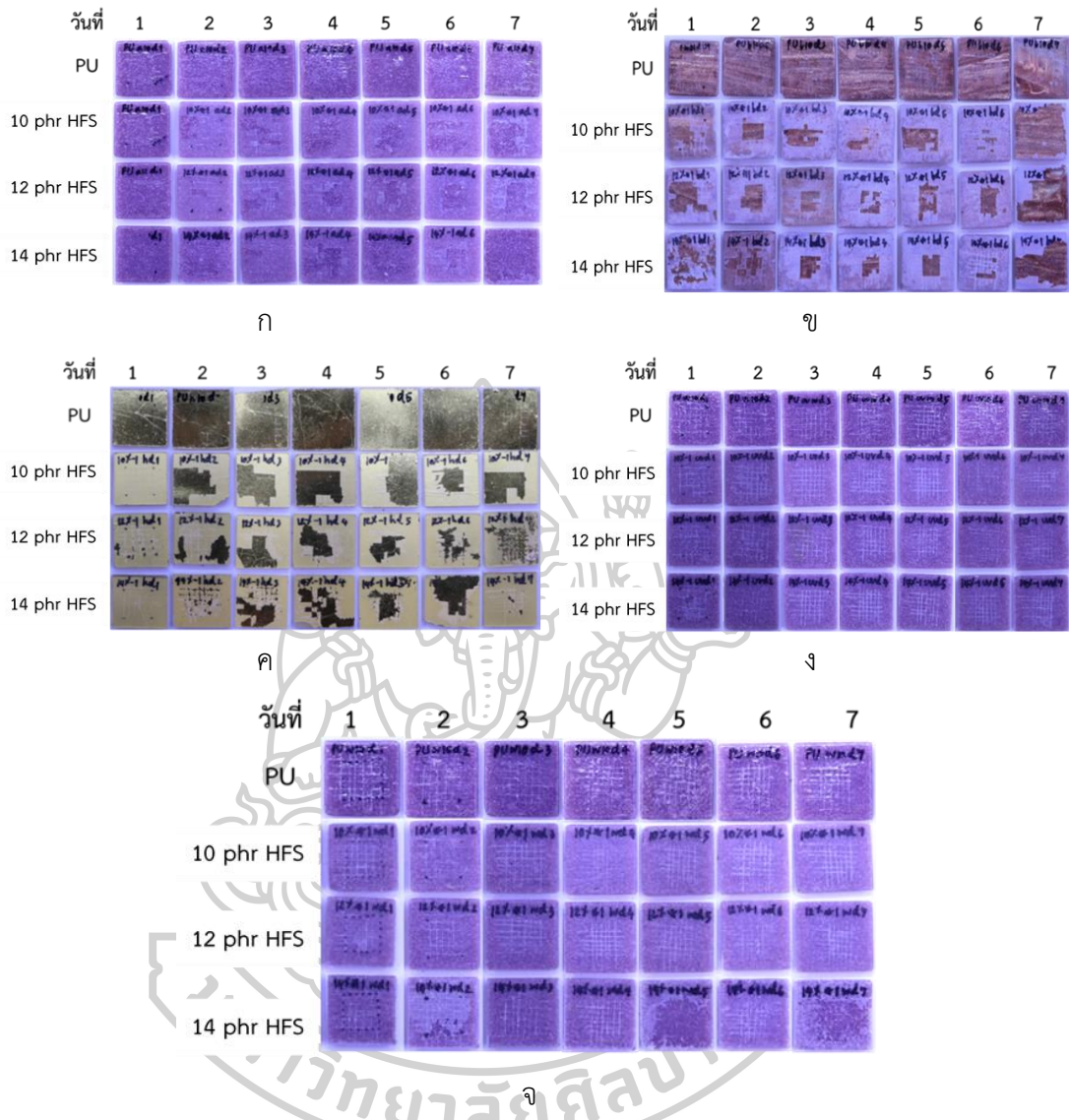
จากการทดสอบที่สภาวะต่างๆ ของแผ่นโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบที่สภาวะเป็นเวลา 7 วัน เมื่อนำแผ่นโม่เสกหลังจากการทดสอบ สภาวะมาวัดค่ามอดุลัสของน้ำพบว่า ค่ามอดุลัสน้ำของการทดสอบความทนต่อความร้อน และความทนต่อแสง UV มีค่าที่ใกล้เคียงกับการพ่นที่สภาวะปกติ คือมีค่ามอดุลัสของน้ำของ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อยู่ที่ช่วง 80°+, 100°+ และ 120°+ ตามลำดับ ดังรูปที่ 73ค และ 73ง เนื่องจากแผ่นโม่เสกดังกล่าวหลังการทดสอบสภาวะยังคงมีปริมาณของ HFS เคลือบที่ ผิวหน้าจึงทำให้เกิดคุณสมบัติที่มีความไม่ชอบน้ำคงเดิม

นอกจากนี้พบว่า การทดสอบความทนต่อน้ำที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS มีค่ามอดุลัสของน้ำที่ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงแสดงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจนถึงวันที่ 6 (มีค่ามอดุลัสน้ำมากกว่า 90°) ดังรูปที่ 73จ

สำหรับแผ่นโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อกรด และความทนต่อเบสมีค่ามอดุลัสของน้ำ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดของการพ่นเคลือบทั้ง 3 คือ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS เนื่องจากความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก และเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีมากเกินไป จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของพื้นผิวที่มาก จึงทำให้ปริมาณของ HFS เหลืออยู่น้อย คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจึงลดลง ยิ่งไปกว่านั้นพื้นผิวที่ได้หลังจากการทดสอบยังมีการตกค้างของกรดซัลฟิวริก และเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นน้ำจึงเข้าไปรวมตัวกับกรดและเบส ทำให้บดบังการเกิดคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว ที่มี HFS



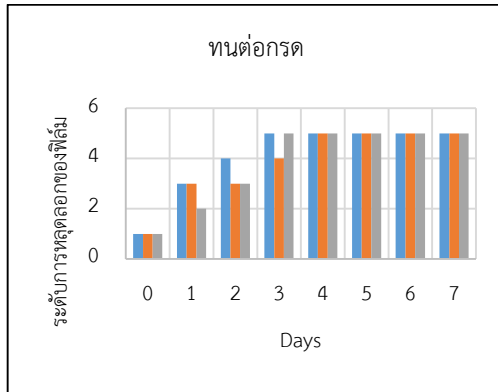
4.3.5 ผลการทดสอบลักษณะผิวของฟิล์มหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ



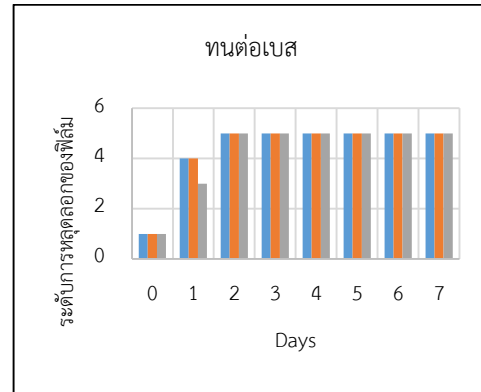
รูปที่ 74 แสดงลักษณะผิวของฟิล์มหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ

- (ก) การทดสอบความทนต่อกรด
- (ข) การทดสอบความทนต่อเบส
- (ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน
- (ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV
- (จ) การทดสอบความทนน้ำ

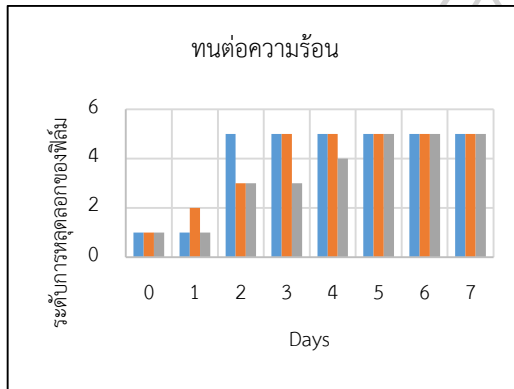
การวิเคราะห์ผลหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ



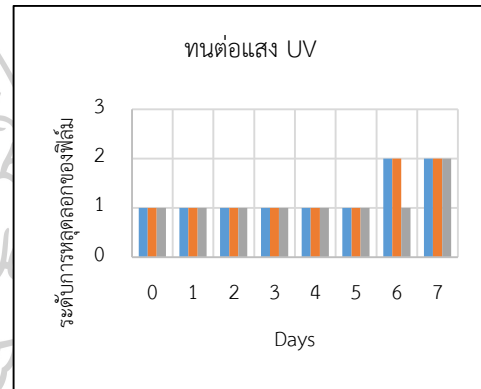
ก



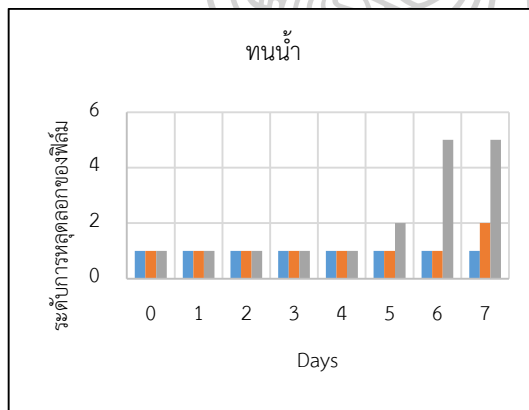
ข



ค



ง



จ

■ 10 phr ■ 12 phr ■ 14 phr

ระดับการหลุดลอกของฟิล์ม

- 1 คือ หลุดลอกน้อยกว่า 5%
- 2 คือ หลุดลอก 5-15%
- 3 คือ หลุดลอก 15-35%
- 4 คือ หลุดลอก 35-65%
- 5 คือ หลุดลอกมากกว่า 65%

รูปที่ 75 แสดงการวิเคราะห์ผลหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ

(ก) การทดสอบความทนต่อกรด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

(จ) การทดสอบความทนน้ำ

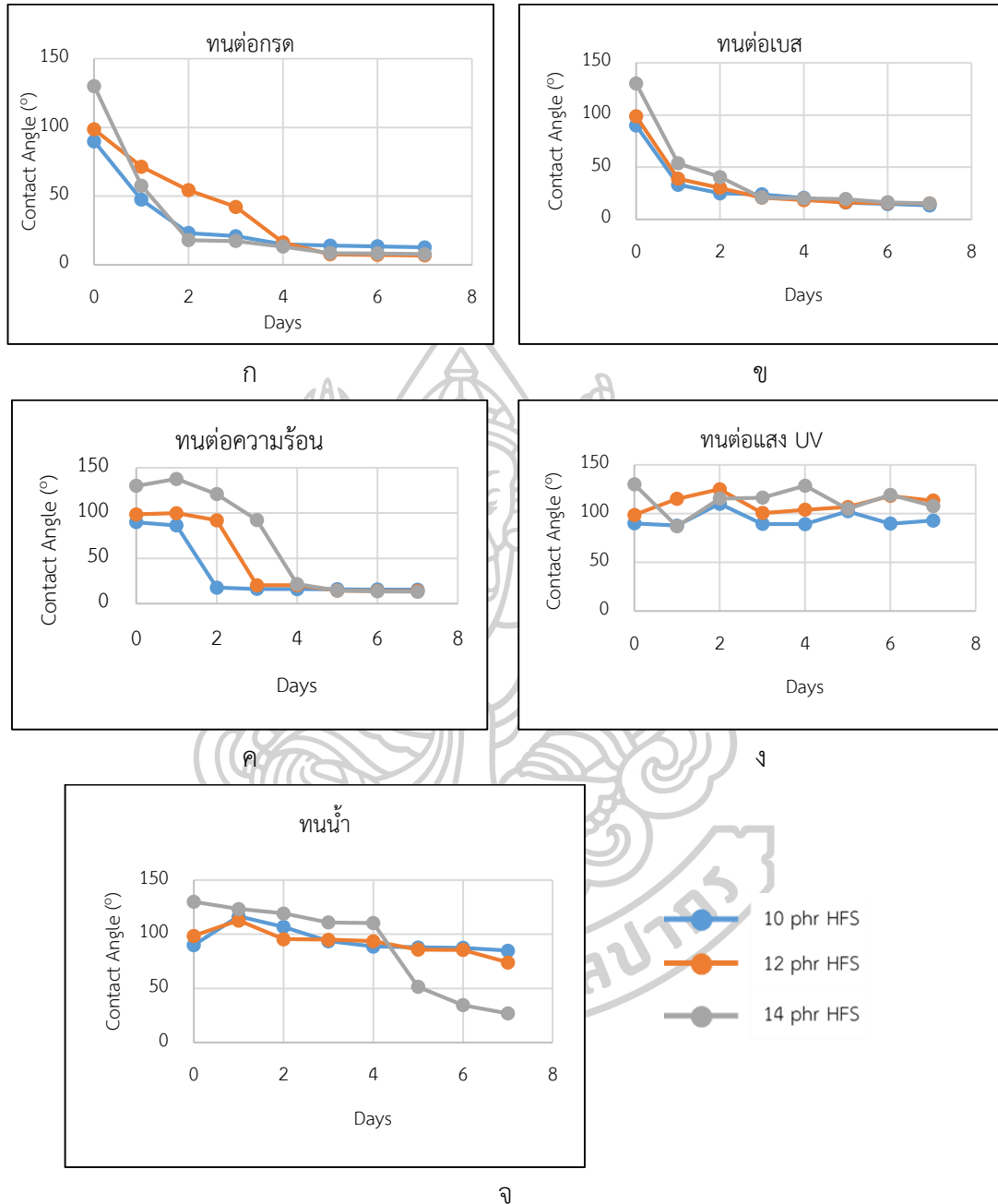
จากการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบที่สภาวะต่างๆ ของแผ่นโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย PU, 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบที่สภาวะเป็นเวลา 7 วัน ได้มีการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน มอก.285 เล่ม 47-2559 หน้า 5 มีวิธีการทดสอบดังหัวข้อ 2.8 และได้ทำการวิเคราะห์ผลการยึดติดตามตารางที่ 1 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของแผ่นโม่เสกหลังจากการทดสอบการยึดติดที่สภาวะการทดสอบความทนต่อกรด, การทดสอบความทนต่อเบส, การทดสอบความทนต่อความร้อน, การทดสอบความทนต่อแสง UV และการทดสอบความทนน้ำ ได้แสดงดังรูปที่ 74 และจากการวิเคราะห์ผลพบว่าฟิล์มที่ทำการเคลือบที่ถูกทดสอบที่สภาวะความทนต่อแสง UV และความทนต่อน้ำมีการหลุดลอกที่ระดับน้อยกว่า 2 ในการทดสอบสภาวะ 5 วันแรกแสดงดังรูป 75ง และ 75จ หมายความว่าฟิล์มเกิดการหลุดลอกในช่วง 5-15% ซึ่งผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับฟิล์มที่ถูกทดสอบที่สภาวะปกติ

สำหรับพบว่าฟิล์มที่ทำการเคลือบที่ถูกทดสอบที่สภาวะความทนต่อความร้อน มีการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ในระดับที่น้อยกว่า 2 (เกิดการหลุดลอกในช่วง 5-15%) ในวันแรกแสดงดังรูปที่ 75ค สำหรับการหลุดลอกของฟิล์มหลังจากวันแรกมีระดับการหลุดลอกที่มากกว่า 3 เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ให้คือ 60°C เป็นความร้อนที่ค่อนข้างสูงกว่าสภาวะจริงฟิล์มจึงเกิดการหลุดลอกที่มากขึ้น

นอกจากนี้ฟิล์มที่ทำการเคลือบที่ถูกทดสอบที่สภาวะความทนต่อกรด และความทนต่อเบสมีการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ในระดับที่มากกว่า 2 ทั้งช่วงเวลา 7 วัน เนื่องจากการทดสอบนี้พื้นผิวที่ถูกทำการเคลือบจะถูกนำไปแช่ในกรด และเบสซึ่งมี NaOH ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หมู่ -OH ของ NaOH จะเข้าไปโปรโตเนทโปรตอนของหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่อยู่บน Acrylate copolymer ของพอลิยูรีเทนทำให้หมู่ -COOH กลายเป็น -COO<sup>-</sup> ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีจึงทำให้ค่ามัมสัมผัสน้ำมีค่าน้อยลง และทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Meng Li และคณะ [57] ที่มีค่ามัมสัมผัสน้ำลดลงเมื่อมี pH ที่เพิ่มมากขึ้น



ผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปหลังจากทำการทดสอบการยึดติดที่  
สภาวะต่างๆ



รูปที่ 76 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปหลังจากทำการทดสอบการยึดติดที่สภาวะต่างๆ

(ก) การทดสอบความทนต่อกรด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

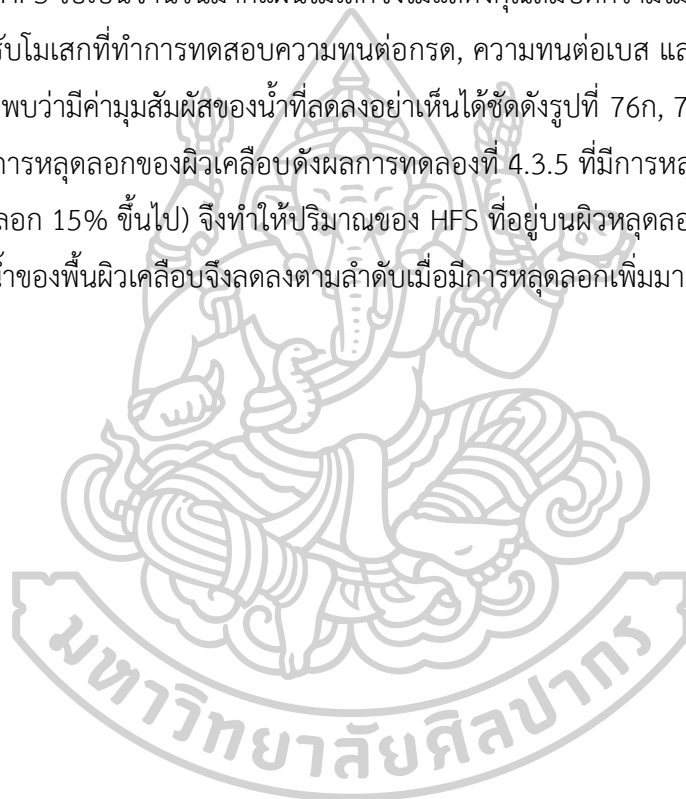
(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

(จ) การทดสอบความทนน้ำ

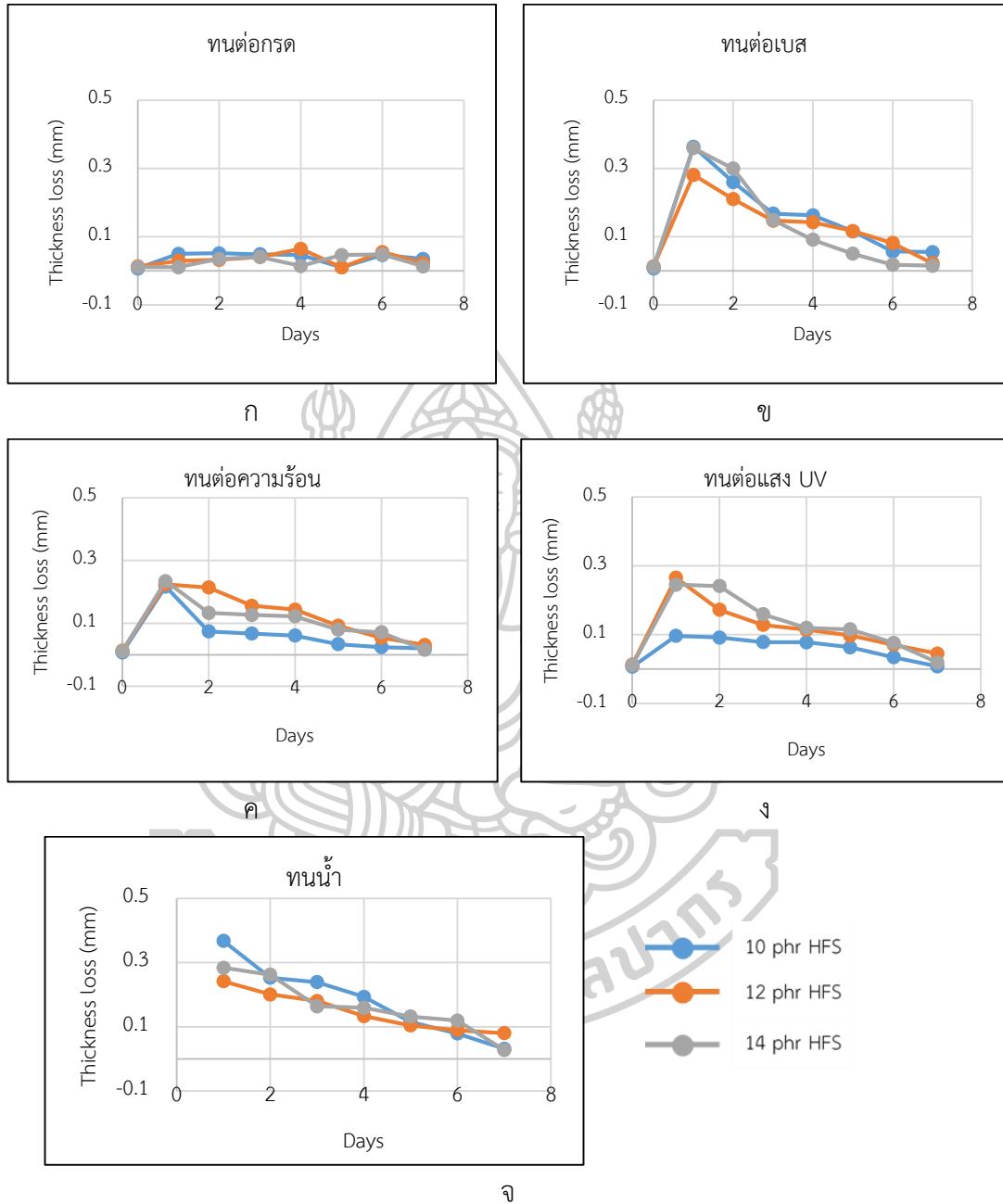
จากการนำโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบความทนที่สภาวะต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน และผ่านการทดสอบการยึดติดของสารเคลือบที่สภาวะต่างๆ มาวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ ผลการทดลองพบว่าแผ่นโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อแสง UV และความทนต่อน้ำมีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่มีค่ามากกว่า  $80^{\circ}$  แสดงดังรูปที่ 76ง และ 76จ ตามลำดับ เนื่องจากโม่เสกมีการหลุดลอกที่ช่วง 5-15% (ดังผลการทดลองที่ 4.3.5) จึงมีปริมาณของ HFS เหลืออยู่บนพื้นผิวจึงทำให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ สำหรับความทนต่อน้ำในวันที่ 5 – 7 มีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ลดลงเนื่องจากมีการหลุดลอกของพื้นผิวเคลือบที่มากกว่า 65% จึงทำให้เกิดการหลุดลอกของ HFS ไปเป็นจำนวนมากแผ่นโม่เสกจึงไม่แสดงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

สำหรับโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อกรด, ความทนต่อเบส และความทนต่อความร้อน ผลการทดลองพบว่ามีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 76ก, 76ข และ 76ค ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบดังผลการทดลองที่ 4.3.5 ที่มีการหลุดลอกในระดับ 3 ขึ้นไป (ช่วงการหลุดลอก 15% ขึ้นไป) จึงทำให้ปริมาณของ HFS ที่อยู่บนผิวหลุดลอกออกไปด้วย คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวเคลือบจึงลดลงตามลำดับเมื่อมีการหลุดลอกเพิ่มมากขึ้น



#### 4.3.6 ผลการทดสอบความทนต่อการขัดถูที่สภาวะต่างๆ

##### การทดสอบการขัดถู (abrasion) วัดความหนาของโมเสกที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 77 แสดงการทดสอบการขัดถู (abrasion) และวัดความหนาของโมเสกที่สภาวะต่างๆ

(ก) การทดสอบความทนต่อการกรัด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

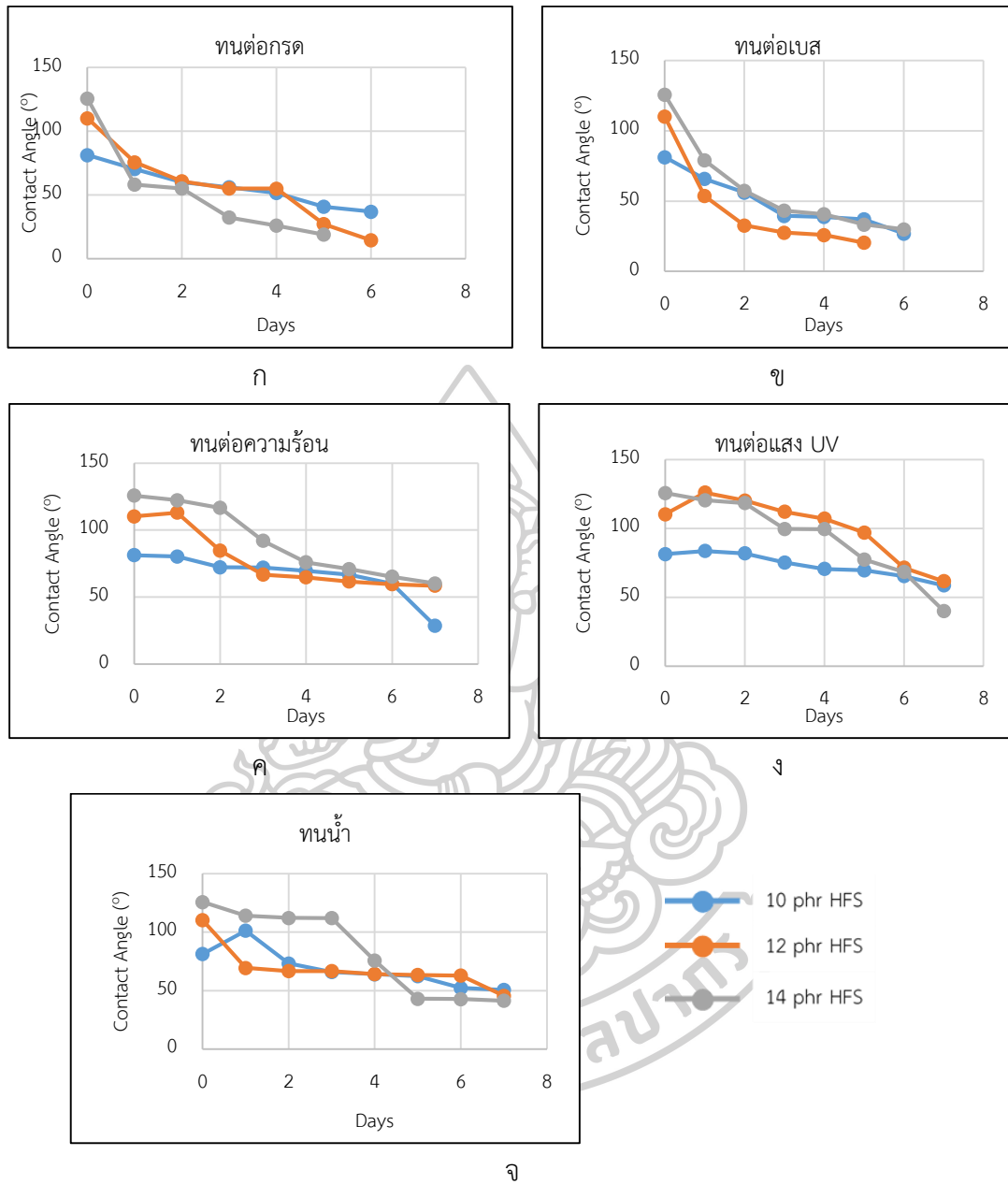
(จ) การทดสอบความทนน้ำ

จากการนำโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบความทนที่สภาวะต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน ทำการทดสอบการขัดถู (abrasion) และวัดความหนาของโม่เสกที่สภาวะต่างๆ พบว่าความหนาเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อทดสอบสภาวะความทนต่อกรด, ความทนต่อความร้อน, ความทนต่อแสง UV และความทนน้ำ โดยมีความหนาที่เปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า 0.3 mm สำหรับที่สภาวะความทนต่อเบสมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก เนื่องจากการทดสอบนี้พื้นผิวที่ถูกทำการเคลือบจะถูกนำไปแช่ในกรด และเบสซึ่งมี NaOH ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หมู่ -OH ของ NaOH จะเข้าไปโปรตอนของหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่อยู่บน Acrylate copolymer ของพอลิยูรีเทนทำให้หมู่ -COOH กลายเป็น -COO<sup>-</sup> ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้จึงทำให้ค่ามัมสัมผัสของน้ำมีค่าน้อยลง และทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เกิดการหลุดลอกได้มาก ความหนาจึงลดลงไปมากกว่าสภาวะอื่นๆ

และจากการทดสอบพบว่าชั้น PU ยังคงอยู่ทุกสภาวะการทดสอบ ซึ่งความหนาที่หายไปไม่เกิน 0.52 mm และชั้นของ HFS ยังคงอยู่เนื่องจากการหายไปของความหนาในชั้น HFS ที่ไม่เกิน 0.01, 0.02 และ 0.03 mm ตามลำดับ



ค่ามุมสัมผัสของโม่เสกที่เปลี่ยนแปลงหลังการทดสอบการชำรุดที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 78 ค่ามุมสัมผัสของโม่เสกที่เปลี่ยนแปลงหลังการทดสอบการชำรุดที่สภาวะ

(ก) การทดสอบความทนต่อกรด

(ข) การทดสอบความทนต่อเบส

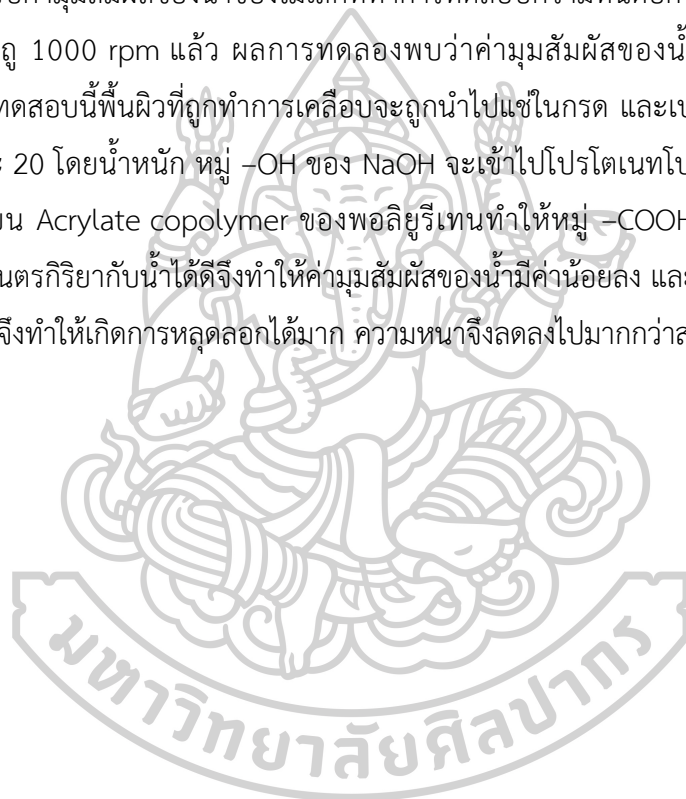
(ค) การทดสอบความทนต่อความร้อน

(ง) การทดสอบความทนต่อแสง UV

(จ) การทดสอบความทนน้ำ

จากการนำโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทดสอบความทนที่สภาวะต่างๆ เป็นเวลา 7 วัน และผ่านการทดสอบการขัดถูของสารเคลือบที่ 1000 rpm มาวัดค่ามูมสัมผัสน้ำ ผลการทดลองพบว่าแผ่นโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อความร้อน ความทนต่อแสง UV และความทนต่อน้ำมีค่ามูมสัมผัสน้ำที่มีค่ามากกว่า 90° ในช่วง 1-3 วันแรก ที่ทำการทดสอบ สำหรับวันที่ 4 เป็นต้นไปแผ่นโม่เสกที่ทำการเคลือบมีค่ามูมสัมผัสน้ำที่มีค่าลดลง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบที่มี HFS จึงทำให้คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ลดลงไปด้วย

สำหรับค่ามูมสัมผัสน้ำของโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อกรด และความทนต่อเบส ที่ผ่านการขัดถู 1000 rpm แล้ว ผลการทดลองพบว่าค่ามูมสัมผัสน้ำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการทดสอบนี้พื้นผิวที่ถูกทำการเคลือบจะถูกนำไปแช่ในกรด และเบสซึ่งมี NaOH ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หมู่ -OH ของ NaOH จะเข้าไปโปรโตเนทโปรตอนของหมู่ฟังก์ชัน -COOH ที่อยู่บน Acrylate copolymer ของพอลิยูรีเทนทำให้หมู่ -COOH กลายเป็น  $-COO^-$  ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้ดีจึงทำให้ค่ามูมสัมผัสน้ำมีค่าน้อยลง และทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกได้ง่ายขึ้นจึงทำให้เกิดการหลุดลอกได้มาก ความหนาจึงลดลงไปมากกว่าสภาวะอื่นๆ



#### 4.3.7 ผลการทดสอบการเกิดตะไคร่ของพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารเคลือบ

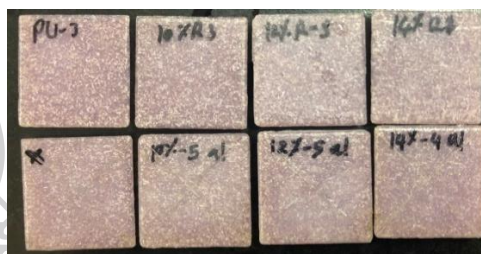
การทดสอบการเกิดตะไคร่น้ำบนพื้นผิวจะทำการเปรียบเทียบกับแผ่นกระจกสไลด์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบด้วย PU/HFS (รูปที่ 79ก) และเปรียบเทียบกับโมเสกที่ผ่านการเคลือบด้วย PU/HFS (10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS) ชนิดไม่มีรอย (รูปที่ 79ข) และชนิดมีรอย (รูปที่ 79ค) ทำการทดลองนำไปแช่ในน้ำที่มีตะไคร่น้ำในสภาวะเร่ง ทำการทดลองแช่ 7 วัน ได้ผลลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 79 พบว่าสามารถสังเกตได้ว่ามีตะไคร่น้ำติดอยู่บนแผ่นสไลด์ และโมเสกที่ทำการเคลือบด้วย HFS ทั้งชนิดมีรอยละไม่มีรอย ไม่เกิดตะไคร่น้ำขึ้นบริเวณผิวโมเสก



ก



ข

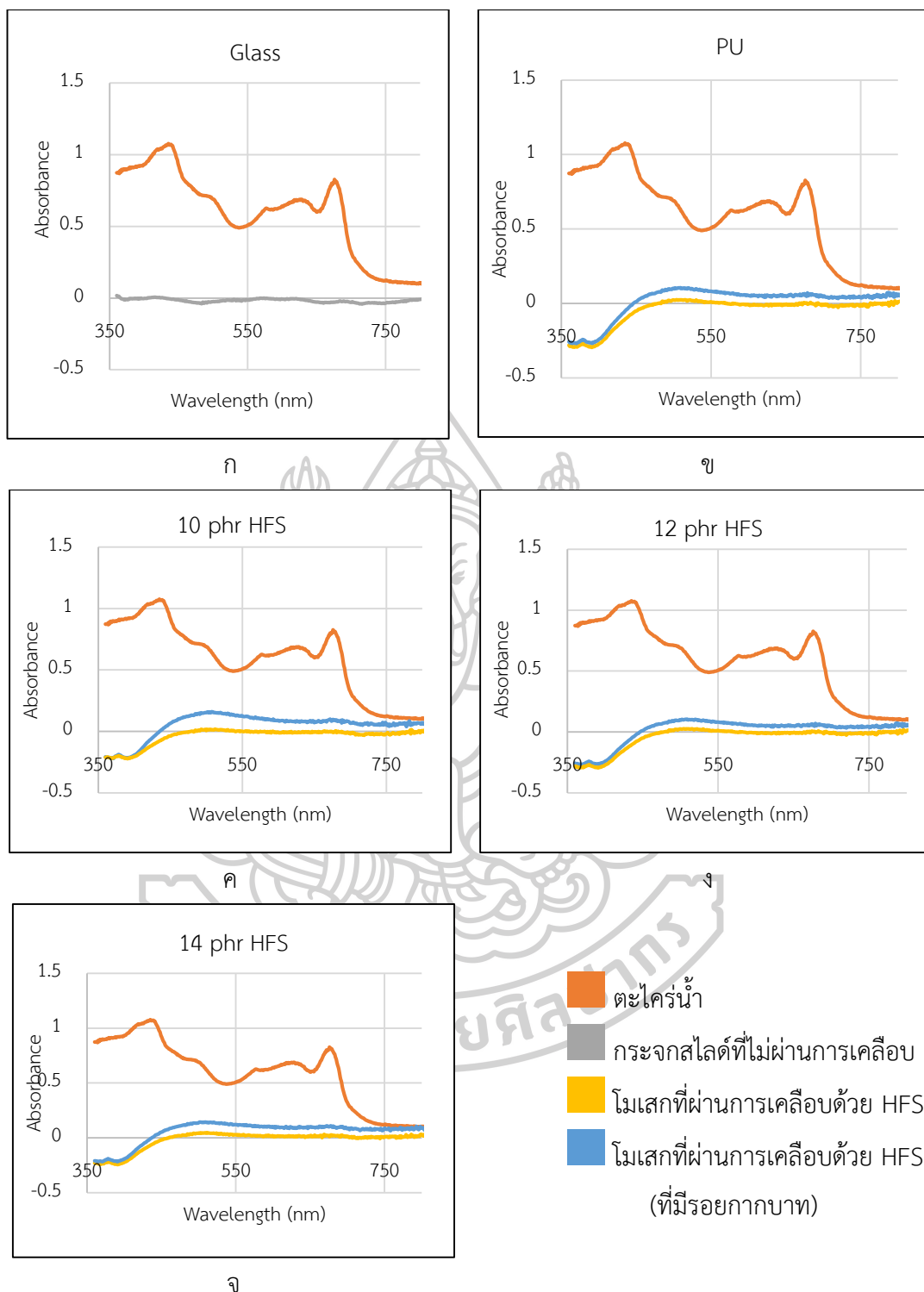


ค

รูปที่ 79 แสดงพื้นผิวของแผ่นกระจก และแผ่นโมเสกหลังจากการแช่ตะไคร่น้ำที่สภาวะเร่ง

(ก) แผ่นกระจกสไลด์ (ข) โมเสกเคลือบที่ไม่มีรอย (ค) โมเสกเคลือบที่มีรอย

จากการนำโมเสกที่เคลือบด้วย PU, PU/10 phr HFS, PU/12 phr HFS และ PU/14 phr HFS และผ่านการแช่ในน้ำที่มีตะไคร่น้ำในสภาวะเร่งที่ทำการทดลองแช่ 7 วัน ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อทดสอบการเกิดตะไคร่น้ำ ผลการทดลองพบว่าโมเสกที่ผ่านการเคลือบด้วย PU, PU/10 phr HFS, PU/12 phr HFS และ PU/14 phr HFS ไม่มีการดูดกลืนแสงช่วงเดียวกับตะไคร่น้ำ นั่นแสดงว่าตะไคร่น้ำไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในโมเสกที่ผ่านการเคลือบ PU หรือ PU/HFS ดังรูป 80ข, 80ค, 80ง และ 80จ แตกต่างจากแผ่นกระจกสไลด์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนแสงช่วงเดียวกับตะไคร่น้ำ นั่นแสดงว่าตะไคร่น้ำสามารถเจริญเติบโตบนกระจกที่ไม่ผ่านการเคลือบได้ดังรูป 80ก เนื่องจากการเคลือบของ PU หรือ PU/HFS ทำให้น้ำไม่สามารถเกาะบนพื้นผิวที่ทำการเคลือบได้ เมื่อน้ำไม่สามารถเกาะบนพื้นผิวเคลือบได้ดังนั้นตะไคร่น้ำก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงทำให้ผิวเคลือบไม่มีการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำ



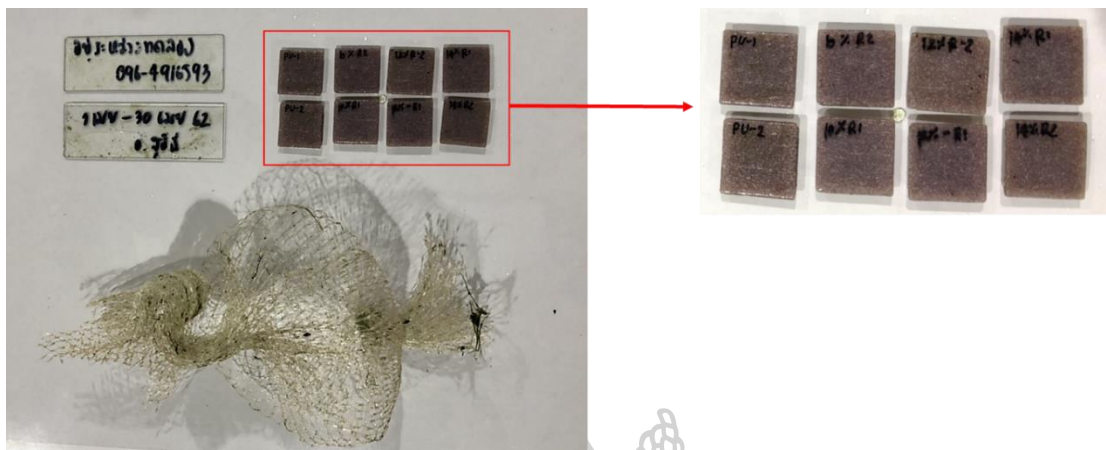
รูปที่ 80 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นกระจก และโม่เสกหลังจากการแช่ตะไคร่น้ำที่สภาวะเร่ง

ก) กระจกสไลด์ (ข) โม่เสกเคลือบ PU (ค) โม่เสกเคลือบ PU/10 phr HFS

(ง) โม่เสกเคลือบ PU/12 phr HFS (จ) โม่เสกเคลือบ PU/14 phr HFS

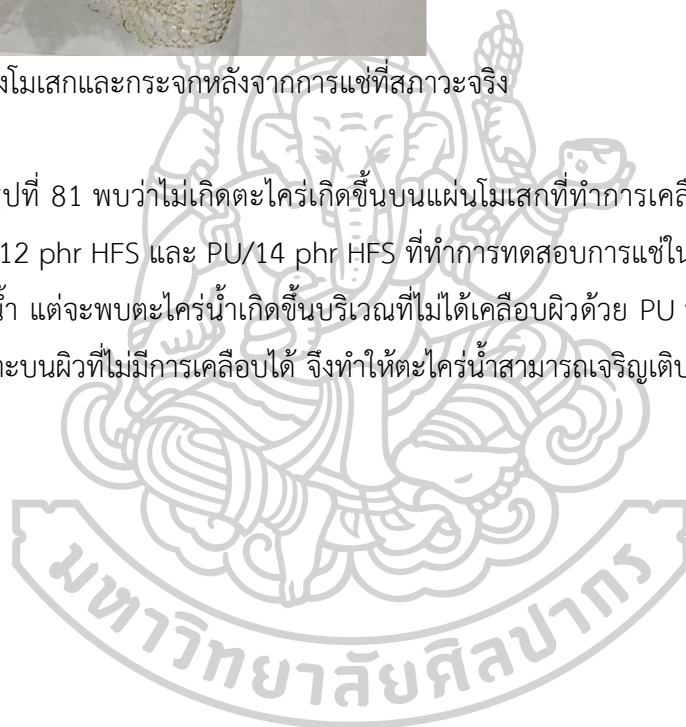


### การทดสอบการเกิดตะไคร่น้ำโดยเทียบเคียงจากสถานะจริง



รูปที่ 81 แสดงโมเสกและกระจกหลังจากการแช่ที่สถานะจริง

จากรูปที่ 81 พบว่าไม่เกิดตะไคร่เกิดขึ้นบนแผ่นโมเสกที่ทำการเคลือบผิวด้วย PU, PU/10 phr HFS, PU12 phr HFS และ PU/14 phr HFS ที่ทำการทดสอบการแช่ในระยะเวลา 24 วันในบ่อน้ำที่มีตะไคร่น้ำ แต่จะพบตะไคร่น้ำเกิดขึ้นบริเวณที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วย PU หรือ PU/HFS เนื่องจากน้ำสามารถเกาะบนผิวที่ไม่มีการเคลือบได้ จึงทำให้ตะไคร่น้ำสามารถเจริญเติบโตบนพื้นผิวดังกล่าวได้



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาสาเหตุการเกิดคราบไม่พึงประสงค์ที่เกิดขึ้นบนพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ รวมไปถึงการสำรวจวัสดุกระเบื้องที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ เพื่อที่จะนำข้อมูลไปหาสารยึดเกาะที่เหมาะสมกับวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นผิว และอนุภาคนาโนที่เหมาะสมกับสารยึดเกาะและวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นผิว จากนั้นหาสภาวะในการเตรียมที่เหมาะสมของสารยึดเกาะที่คอมโพสิตกับอนุภาคนาโน ให้ได้คุณสมบัติเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ อีกทั้งศึกษาสมบัติการทนต่อ กรด เบส ความร้อน และทดสอบการทนต่ออากาศสภาวะเร่งของพื้นผิวที่ทำการเคลือบด้วยสารเคลือบ โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

จากการสำรวจสาเหตุของการเกิดคราบหมองหม่นของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าองค์พระมหาธาตุฯ ใช้โมเสกที่เป็นวัสดุตกแต่งทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ โมเสกสีทอง สีน้ำตาล สีเทาเข้ม สีเทาอ่อน และสีม่วง ซึ่งเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบด้วย SEM และ ATR-FTIR ซึ่ให้เห็นว่าเป็นโมเสกที่ทำมาจากแก้วซิลิกาที่พื้นผิวมีการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นพอลิยูรีเทน แผ่นโมเสกจึงมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่แสดงถึงพื้นผิวที่ชอบน้ำ คือ สีทอง สีน้ำตาล สีเทาเข้ม สีเทาอ่อน และ สีม่วง มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น  $45.5^{\circ} \pm 0.6$ ,  $35.9^{\circ} \pm 0.6$ ,  $42.9^{\circ} \pm 0.5$ ,  $35.7^{\circ} \pm 0.6$  และ  $25.2^{\circ} \pm 0.3$  ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าสีที่ปรากฏของโมเสกแต่ละชนิดมาจากองค์ประกอบของสารให้สีที่มีธาตุที่แตกต่างกันคือ โมเสกสีทองมีองค์ประกอบของธาตุทอง (Au) สีน้ำตาลและสีเทาเข้มมีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) และสีม่วงมีองค์ประกอบของธาตุแมงกานีส (Mn) และจากสมบัติทางความร้อนที่ได้จากเทคนิค DSC และ TGA ซึ่ให้เห็นว่าแผ่นโมเสกทำมาจากวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูงมากกว่า  $1,000^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก SEM-EDX ที่พบองค์ประกอบของธาตุซิลิกา (Si) ในแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด

เมื่อทำการสำรวจและวิเคราะห์คราบไม่พึงประสงค์ตามทางเดินและบันได พบว่าคราบไม่พึงประสงค์นั้นประกอบด้วยธาตุหลักที่เป็นแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของหินปูน สำหรับตัวอย่างน้ำฝนเมื่อถูกตรวจสอบความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) พบว่ามีค่าเป็นกลาง และมีปริมาณของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) เท่ากับ 10.125 ppm ซึ่งถือว่าเป็นค่าปกติของน้ำฝนที่จัดว่าเป็นน้ำอ่อน นอกจากนี้จากการสำรวจยังพบว่าปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อระหว่างแผ่นโมเสกนั้นถูกหลุดล่อนออกซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โมเสกหลุดออกจากตัวองค์พระธาตุฯ ทั้งสอง ดังนั้นคราบหมองหม่นเกิดขึ้น เกิดจากการที่มีน้ำฝนชะลงบนองค์พระมหาธาตุฯ เป็นเวลานานและสม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของปริมาณ

น้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์ที่มาก ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ ทำให้ปูนยาแนวเกิดการหลุดร่อน จึงส่งผลให้เกิดเป็นคราบหินปูนสะสมบนทางเดินพื้นและบันไดเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การที่โมเสกมีความชอบน้ำยังสามารถทำให้เกิดการสะสมคราบฝุ่นบนพื้นผิวของโมเสกทำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของราและมอส ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคราบหมองหม่นขึ้นบนองค์พระมหาเจดีย์ฯ

สำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวจะใช้พอลิยูรีเทน เป็นสารที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งมีแนวโน้มค่ามอดูลัสที่ต่ำ มีแนวโน้มของ Tensile strength ที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นแนวโน้มของค่า Elongation สูง และพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เคลือบคือ Part A/Part B = 8/2 สำหรับอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำพบว่า Hydrophobic Fumed Silica (HFS) สามารถกระจายตัวในตัวทำละลาย Thinner ที่ใช้ร่วมกับพอลิยูรีเทนได้ดีกว่า  $\text{TiO}_2$  NPs และ ZnO อีกทั้งยังให้ความใส ในขณะที่กระจายตัวอยู่ในตัวทำละลาย

วิธีการเคลือบโดยการพ่นเคลือบเป็นวิธีเคลือบที่ให้มุมสัมผัสของน้ำมากกว่าวิธีการเคลือบแบบจุ่มเคลือบ และวิธีการเคลือบแบบการทา ซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสน้ำสูงถึง  $83.3^\circ$  และปริมาณ HFS ที่เหมาะสมต่อการพ่นเคลือบคือ 4 phr HFS จนถึง 14 phr HFS ซึ่งมากที่สุดคือ 14 phr HFS เมื่อเปรียบเทียบเทคนิคการพ่นเคลือบแบบธรรมดา และการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat ผลการทดลองพบว่า การพ่นเคลือบแบบธรรมดาโดยใช้ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS จะให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่ใกล้เคียงกัน คือ  $79.8^\circ$ ,  $79.8^\circ$  และ  $79.5^\circ$  ตามลำดับ แต่ต่างจากการพ่นเคลือบแบบ Base – top coat ที่มุมสัมผัสน้ำมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณ HFS ที่เพิ่มมากขึ้นนั้นคือ  $100.7^\circ$ ,  $114.8^\circ$  และ  $128.1^\circ$  ตามลำดับ และจำนวนรอบของการพ่นเคลือบด้วย HFS ปริมาณ 10 phr HFS ด้วยเทคนิค Base – top coat เป็นจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ พบว่าการพ่นด้วยจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่เพิ่มมากขึ้นคือ  $60.0^\circ$ ,  $76.5^\circ$ ,  $80.0^\circ$ ,  $84.0^\circ$  และ  $92.8^\circ$  ตามลำดับ การพ่นเคลือบจึงพ่นเคลือบที่จำนวน 5 รอบ

การพ่นเคลือบในสถานะที่มีความชื้นในระบบที่ 1 ที่ทำการพ่นเคลือบด้วย 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่ามีค่า  $96.9^\circ$ ,  $99.9^\circ$  และ  $127.8^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้จากการพ่นในสถานะชื้นของระบบที่ 1 ไม่มีความแตกต่างจากการพ่นเคลือบ Base-top coat ในสภาวะปกติ แตกต่างจากการพ่นเคลือบที่สภาวะชื้นระบบที่ 2 ได้ค่ามุมสัมผัสของน้ำคือ  $85.8^\circ$ ,  $86.7^\circ$  และ  $86.6^\circ$  ตามลำดับ

การคำนวณ  $\Delta E$  หรือค่าความแตกต่างของสี พบว่าโมเสกที่ทำการพ่นเคลือบโดยใช้เทคนิค Base - top coat ที่มีความเข้มข้นของ HFS เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS มีค่า  $\Delta E$  อยู่ระหว่าง 1-2 ซึ่งถือว่าสีของโมเสกก่อนเคลือบและหลังเคลือบมีลักษณะที่ยอมรับได้ โดยความแตกต่างจะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อพิจารณาแบบใกล้ชิดเท่านั้น (Perceptible through

close observation) นั่นคือการเคลือบผิวของโม่เสก โดยมีความเข้มข้นของ HFS ในชั้น Top coat เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS สามารถพ่นเคลือบโม่เสกได้โดยไม่บดบังสีของพื้นผิวโม่เสกเดิม

การทดสอบการยึดติดของสารเคลือบบนโม่เสกที่ทำการพ่นเคลือบด้วย HFS ที่มีความเข้มข้น เป็น 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS ผิวเคลือบที่ได้ทำการเคลือบหลุดลอกเพียง เล็กน้อยที่ตำแหน่งรอยกรีดตัดกันการหลุดลอกไม่เกิน 5% ของพื้นที่ตาราง เมื่อนำโม่เสกที่ผ่านการ ทดสอบการยึดติดมาวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสของน้ำโดยเทียบกับก่อนการทดสอบการยึดติด พบว่าสมบัติ ความไม่ชอบน้ำที่พื้นผิว (Hydrophobic surface) ที่เปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวโม่เสกทั้งสามสูตรไม่ แตกต่างจากเดิม นอกจากนี้พบว่า การพ่นเคลือบด้วย 12 phr HFS และ 14 phr HFS ให้ค่ามุมสัมผัส ที่มากกว่า  $90^{\circ}$

ผลการทดสอบความทนของฟิล์มในสถานะต่างๆ (การทดสอบความทนต่อกรด, การทดสอบ ความทนต่อเบส, การทดสอบความทนต่อความร้อน, การทดสอบความทนต่อแสง UV และการ ทดสอบความทนน้ำ)

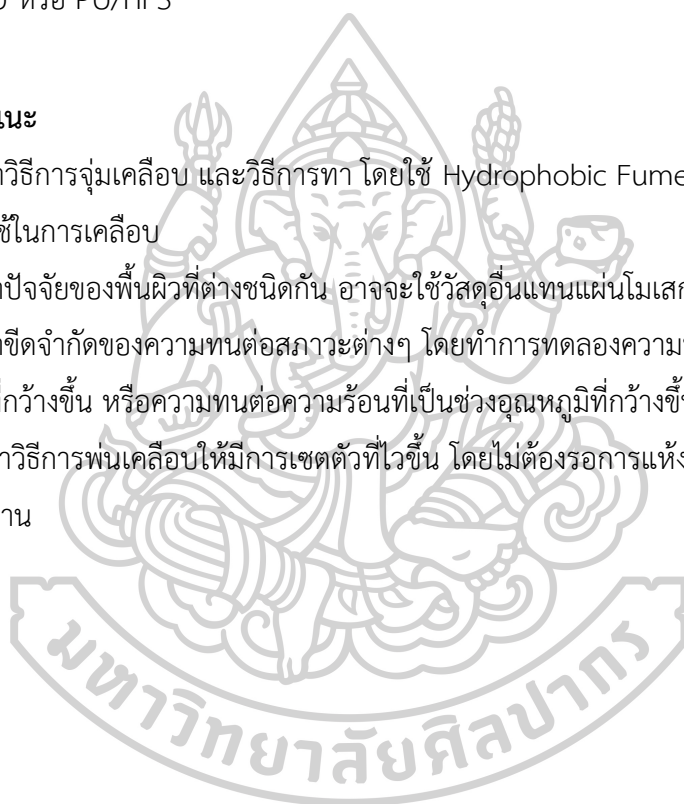
- สีของโม่เสกก่อนทดสอบและหลังทดสอบที่สถานะความทนต่อกรด, การทดสอบ ความทนต่อความร้อน, การทนต่อแสง UV และการทนต่อน้ำ แตกต่างกันเพียง เล็กน้อยเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าอย่างใกล้ชิดเท่านั้น คือค่า  $\Delta E$  ที่มีค่าน้อยกว่า 5 สำหรับการทดสอบความทนต่อเบสสีของแผ่นโม่เสกที่ทำการเคลือบแล้วมีความ แตกต่างกันอย่างชัดเจน  $\Delta E$  ที่มีค่ามากกว่า 5
- มุมสัมผัสของน้ำค่ามุมสัมผัสน้ำของการทดสอบความทนต่อความร้อน และความ ทนต่อแสง UV มีค่าที่ใกล้เคียงกับการพ่นที่สถานะปกติ คือมีค่ามุมสัมผัสของน้ำ ของ 10 phr HFS, 12 phr HFS และ 14 phr HFS อยู่ที่ช่วง  $80^{\circ}+$ ,  $100^{\circ}+$  และ  $120^{\circ}+$  ตามลำดับ สำหรับแผ่นโม่เสกที่ทำการทดสอบความทนต่อกรด และความ ทนต่อเบสมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดของการพ่นเคลือบ ทั้ง 3
- การทดสอบการยึดติดที่สถานะความทนต่อแสง UV และความทนต่อน้ำมีการหลุด ลอกที่ระดับน้อยกว่า 2 ในการทดสอบสภาวะ 5 วันแรก (ฟิล์มเกิดการหลุดลอก ในช่วง 5-15%) สภาวะความทนต่อความร้อน มีการหลุดลอกของฟิล์มเคลือบใน ระดับที่น้อยกว่า 2 ในวันแรก สำหรับการหลุดลอกของฟิล์มหลังจากวันแรกมีระดับ การหลุดลอกที่มากกว่า 3 และที่สถานะความทนต่อกรด และความทนต่อเบสมีการ หลุดลอกของฟิล์มในระดับที่มากกว่า 2 ทั้งช่วงเวลา 7 วัน

- การทดสอบการขัดถูที่ทดสอบสภาวะความทนต่อกรด, ความทนต่อความร้อน, ความทนต่อแสง UV และความทนน้ำ โดยมีความหนาที่เปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า 0.3 mm สำหรับที่สภาวะความทนต่อเบสมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก และจากการทดสอบพบว่าชั้น PU ยังคงอยู่ทุกสภาวะการทดสอบ ซึ่งความหนาที่หายไปไม่เกิน 0.52 mm และชั้นของ HFS ยังคงอยู่

โมเสกที่ผ่านการเคลือบด้วย PU, PU/10 phr HFS, PU/12 phr HFS และ PU/14 phr HFS ไม่มีการดูดกลืนแสงช่วงเดียวกับตะไคร่น้ำ นั่นคือตะไคร่น้ำไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในโมเสกที่ผ่านการเคลือบ PU หรือ PU/HFS

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการจุ่มเคลือบ และวิธีการทา โดยใช้ Hydrophobic Fumed Silica เป็นอนุภาคนาโนที่ใช้ในการเคลือบ
2. ศึกษาปัจจัยของพื้นผิวที่ต่างชนิดกัน อาจจะใช้วัสดุอื่นแทนแผ่นโมเสกที่ทำการวิจัย
3. ศึกษาขีดจำกัดของความทนต่อสภาวะต่างๆ โดยทำการทดลองความทนต่อกรด-เบส เป็นช่วง pH ที่กว้างขึ้น หรือความทนต่อความร้อนที่เป็นช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น
4. พัฒนาการพ่นเคลือบให้มีการเซตตัวที่ไวขึ้น โดยไม่ต้องรอการแห้งของพื้นผิวใหม่ในเวลายาวนาน



## รายการอ้างอิง

- [1] ธิติมา คุณยศยิ่ง, การทดลองเนื้อดินเพื่อทาเซรามิกหอม โดยใช้กากดินขาวทดแทนทราย. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, 2556. **6**(1): p. 19.
- [2] ปณต ไกรโรจนานันท์, บรรณาธิการ,, อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์. 2542, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์สารคดี.
- [3] ภัทร์ สุขแสน, พื้นผิวอัจฉริยะด้วยนาโนเทคโนโลยี. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 2554. **16**(1): p. 124-130.
- [4] Ensikat, H.J., et al., *Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf*. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011. **2**: p. 152-161.
- [5] Law, K.-Y., *Definitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity, and Superhydrophobicity: Getting the Basics Right*. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014. **5**(4): p. 686-688.
- [6] Tian, X., T. Verho, and R.H. Ras, *Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications*. *Science*, 2016. **352**(6282): p. 142-143.
- [7] Li, J., et al., *One-step spray-coating process for the fabrication of colorful superhydrophobic coatings with excellent corrosion resistance*. *Langmuir*, 2015. **31**(39): p. 10702-10707.
- [8] Blosssey, R., *Self-cleaning surfaces—virtual realities*. *Nature materials*, 2003. **2**(5): p. 301.
- [9] Latthe, S.S., et al., *Recent progress in preparation of superhydrophobic surfaces: a review*. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2012. **2**(02): p. 76.
- [10] Cho, E.-C., et al., *Robust multifunctional superhydrophobic coatings with enhanced water/oil separation, self-cleaning, anti-corrosion, and anti-biological adhesion*. *Chemical Engineering Journal*, 2017. **314**: p. 347-357.
- [11] Kumar, D., L. Li, and Z. Chen, *Mechanically robust polyvinylidene fluoride (PVDF) based superhydrophobic coatings for self-cleaning applications*. *Progress in Organic Coatings*, 2016. **101**: p. 385-390.



- วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ. 2558, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [26] Patel, B., D.S. Chaudhari, and A. Mandot, *EFFECT OF UREA AND THIOUREA ON PHYSICO-CHEMICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF POLYURETHANE FILAMENT*. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, ISSN 0976 – 6480, 2013. **6480**: p. 60-70.
- [27] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, การสังเคราะห์เทอร์โมเซต *Synthesis and Chemical Reaction of Polymer*. 2556.
- [28] จันทิมา ชั่งสิริพร พรศิริ แก้วประดิษฐ์และพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า, การเคลือบผิวกระจกโซลาร์เซลล์ให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้. 2560, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
- [29] Sánchez-Herencia, A., *Water Based Colloidal Processing of Ceramic Laminates*. Vol. 333. 2007. 39-48.
- [30] Ge, D., et al., *Spray coating of superhydrophobic and angle-independent coloured films*. *Chemical Communications*, 2014. **50**(19): p. 2469-2472.
- [31] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีทดสอบสี วาร์นิช และวัสดุที่เกี่ยวข้อง เล่ม 47 การกรีดเป็นตาราง. ราชกิจจานุเบกษา, 28 ธันวาคม 2559. เล่ม **113** ตอนพิเศษ **312**: p. 5.
- [32] Cortez, R., et al., *Natural pigments: stabilization methods of anthocyanins for food applications*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2017. **16**(1): p. 180-198.
- [33] วลัยกร นิตยพัฒน์, วิทยาศาสตร์ของสี. *คหกรรมศาสตร์ มศว*, 2557. **13**(1): p. 3-11.
- [34] เจริญชัย เหลืองอ่อน, การวัดสีด้วยเทคนิค *UV-VIS-NIR SPECTROPHOTOMETRY*. *เทคโนโลยีและวัสดุ*, 2553(59): p. 8-13.
- [35] Mokrzycki, W. and M. Tatol, *Color difference Delta E - A survey*. Vol. 20. 2011. 383-411.
- [36] แม้น อมรสิทธิ์, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เครื่องมือ. 2534, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- [37] วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา, เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ ทฤษฎี และหลักการงานเบื้องต้น. 2543, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [38] Walock, M., *Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon systems*. 2012.

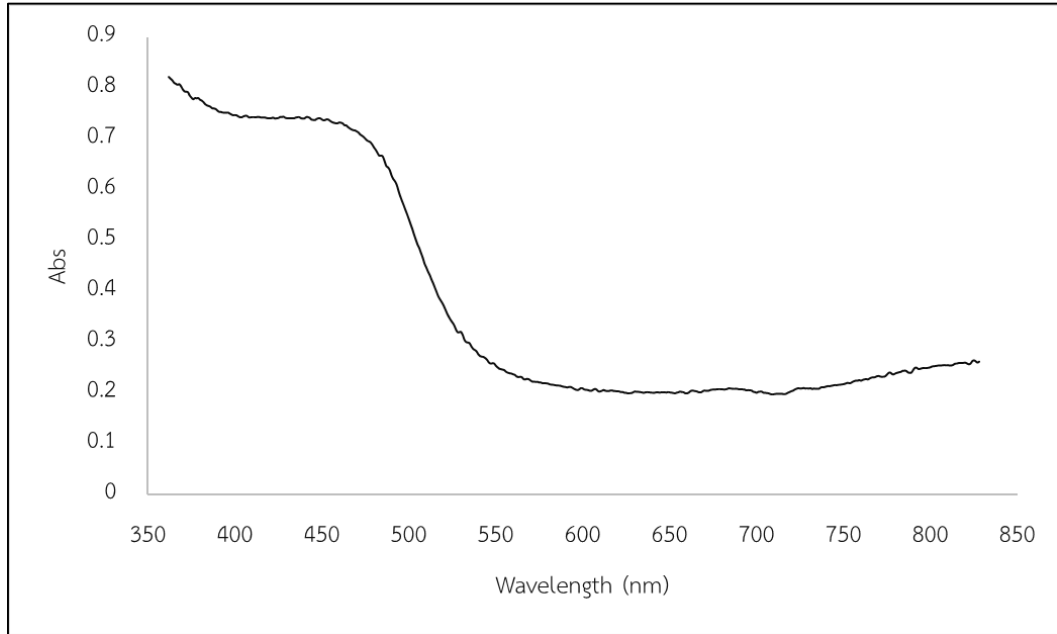


- [39] อมรรัตน์ คำบุญ, ผลของความต่างศักย์ไบแอสต่อโครงสร้างของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ สปีดเตอริง ที่มีผลต่อการเกิดอปาไทต์, in สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. 2551, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [40] ศักดิ์สิทธิ์ จันทร์ไทย, การวิเคราะห์เชิงความร้อน และ แคลอริเมตรี. 2553, ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [41] Nair, S., et al., *Cadmium ethylxanthate: A novel single-source precursor for the preparation of CdS nanoparticles*. Journal of Materials Chemistry - J MATER CHEM, 2002. **12**: p. 2722-2725.
- [42] Perevosnik, K., *INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF POLY(STYRENE-BLOCK-ISOBUTYLENE-BLOCK-STYRENE) (SIBS) AND ITS BLENDS WITH THYMIN-FUNCTIONALIZED POLYSTYRENE*. 2008.
- [43] Tang, Y., et al., *Fabrication of superhydrophobic polyurethane/MoS<sub>2</sub> nanocomposite coatings with wear-resistance*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014. **459**: p. 261–266.
- [44] Zhao, X. and W. Li, *Morphology and hydrophobicity of a polyurethane film molded on a porous anodic alumina template*. Surface and Coatings Technology, 2006. **200**(11): p. 3492-3495.
- [45] Wu, Z., et al., *Facile preparation of superhydrophobic surfaces with enhanced releasing negative air ions by a simple spraying method*. Composites Science and Technology, 2014. **94**: p. 111-116.
- [46] Wong, W.S., et al., *Ultra-durable and transparent self-cleaning surfaces by large-scale self-assembly of hierarchical interpenetrated polymer networks*. ACS applied materials & interfaces, 2016. **8**(21): p. 13615-13623.
- [47] Steele, A., I. Bayer, and E. Loth, *Adhesion strength and superhydrophobicity of polyurethane/organoclay nanocomposite coatings*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. **125**(S1): p. E445-E452.
- [48] Yang, G., J. Song, and X. Hou, *Fabrication of highly hydrophobic two-component thermosetting polyurethane surfaces with silica nanoparticles*. Applied Surface Science, 2018. **439**: p. 772-779.

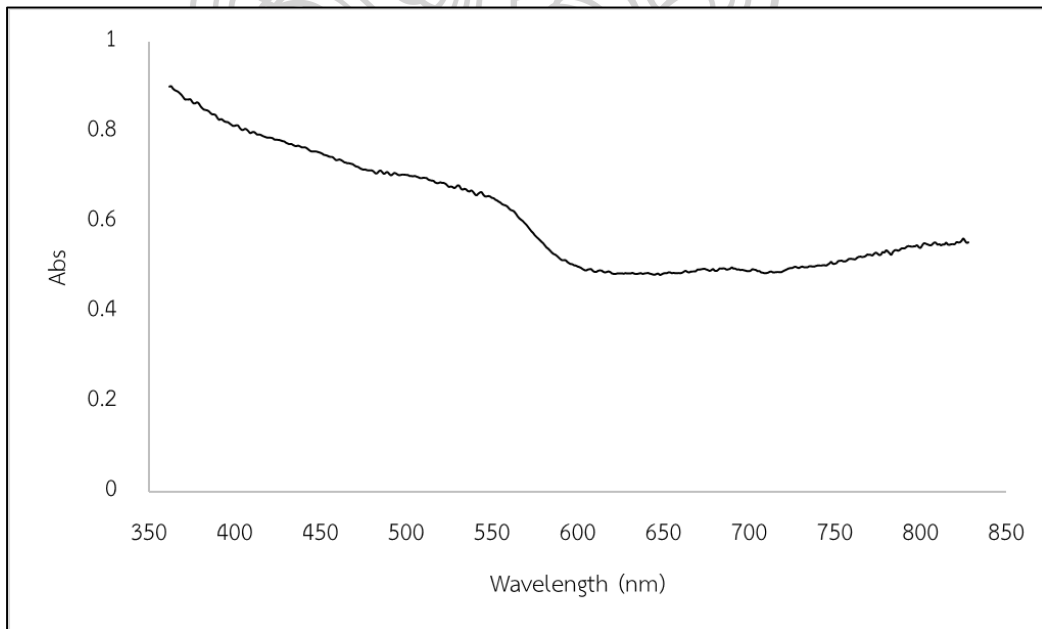
- [49] Zhang, X., et al., *Robust micro-nanoscale flowerlike ZnO/epoxy resin superhydrophobic coating with rapid healing ability*. Chemical Engineering Journal, 2017. **313**: p. 1152-1159.
- [50] กองทัพอากาศ. พระมหาเจดีย์ธาตุนภเมทนีดล. [cited 2562 30 มกราคม]; Available from: <http://phramahathat.com/fulldoc/father.html>.
- [51] กองทัพอากาศ. พระมหาธาตุนภพลภูมิสิริ. [cited 2562 30 มกราคม]; Available from: <http://phramahathat.com/fulldoc/mother.html>.
- [52] Chiono, V., et al., *Polyurethane-based scaffolds for myocardial tissue engineering*. Interface focus, 2014. **4**(1): p. 20130045.
- [53] Amrollahi, M., G.M.M. Sadeghi, and Y. Kashcooli, *Investigation of novel polyurethane elastomeric networks based on polybutadiene-ol/polypropyleneoxide mixture and their structure-properties relationship*. Materials & Design, 2011. **32**(7): p. 3933-3941.
- [54] Zhang, H., et al., *In situ synthesis of poly (methyl methacrylate)/SiO<sub>2</sub> hybrid nanocomposites via Grafting Onto strategy based on UV irradiation in the presence of iron aqueous solution*. Journal of Nanomaterials, 2012. **2012**: p. 3.
- [55] Gonçalves, J.A.V., et al., *Mechanical properties of epoxy resin based on granite stone powder from the Sergipe fold-and-thrust belt composites*. Materials Research, 2014. **17**(4): p. 878-887.
- [56] Ugresic, V., et al., *New Developments in Polyurethane Sheet Moulding Compound*.
- [57] Li, M., et al., *Water-based acrylate copolymer/silica hybrids for facile preparation of robust and durable superhydrophobic coatings*. Applied Surface Science, 2018. **447**: p. 489-499.

## ภาคผนวก

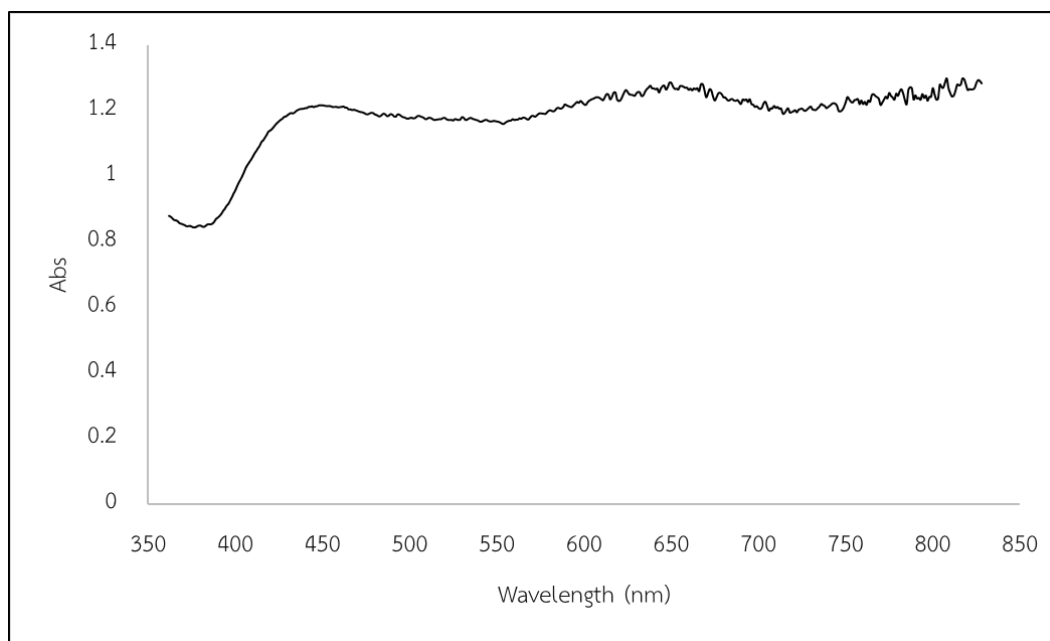
ผลการวิเคราะห์ลักษณะสีของแผ่นโม่เสกที่มาจากพระมหาธาตุเจดีย์



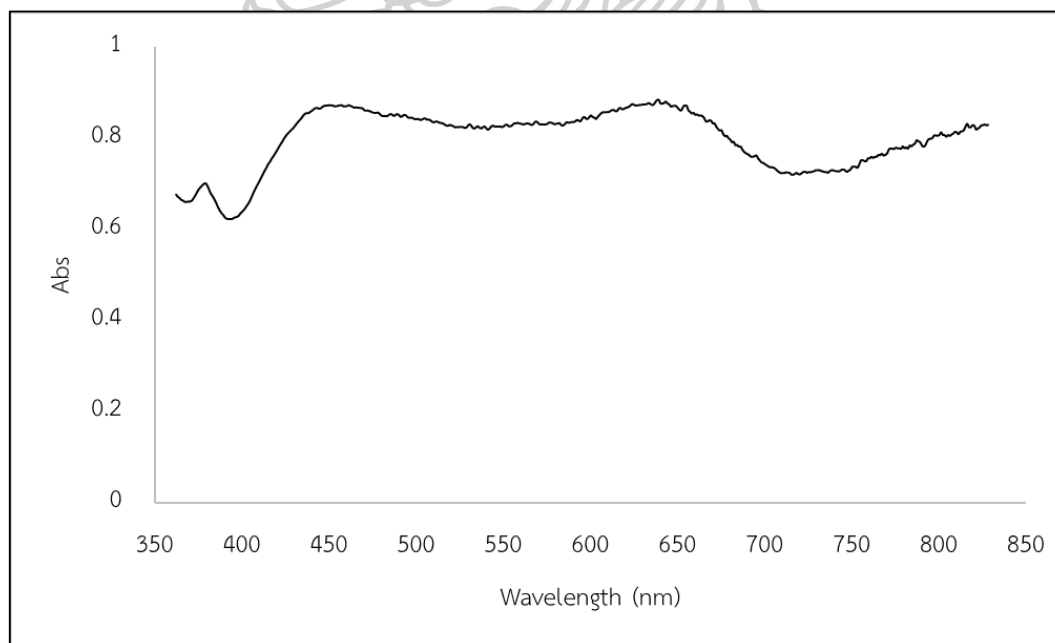
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นของแผ่นโม่เสกสีทอง



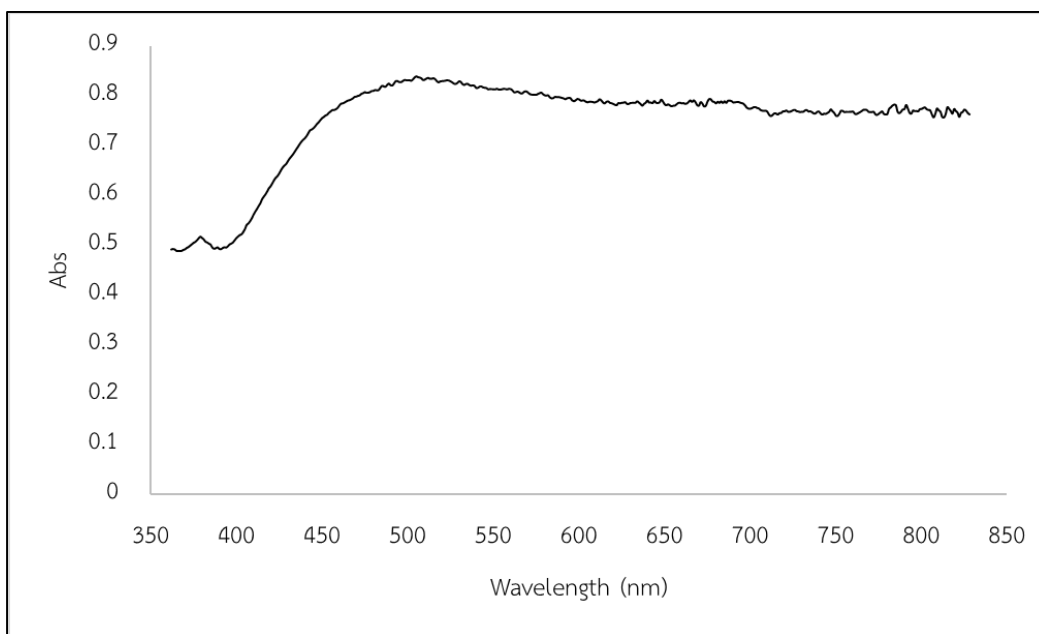
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นของแผ่นโม่เสกสีน้ำตาล



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นของแผ่นโม่เสกสีเทาเข้ม

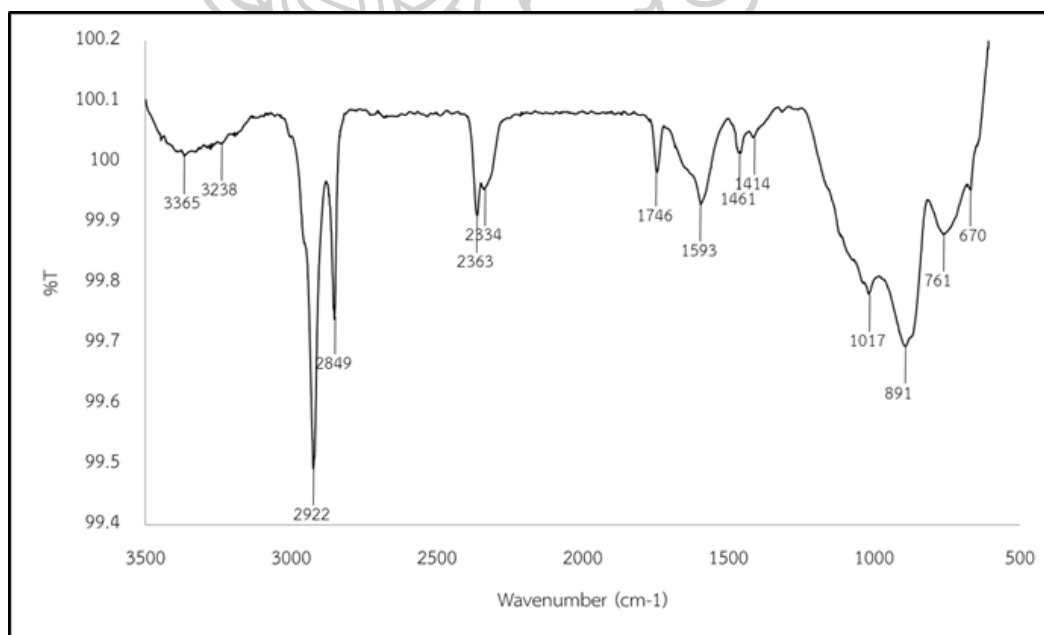


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นของแผ่นโม่เสกสีเทาอ่อน

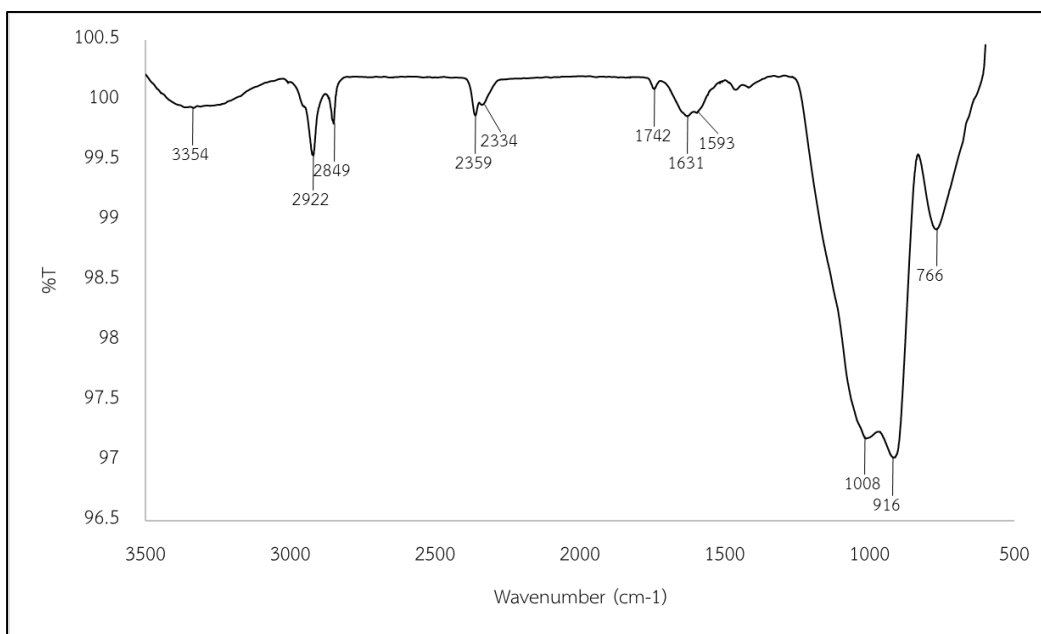


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความยาวคลื่นของแผ่นโม่เสกสีม่วง

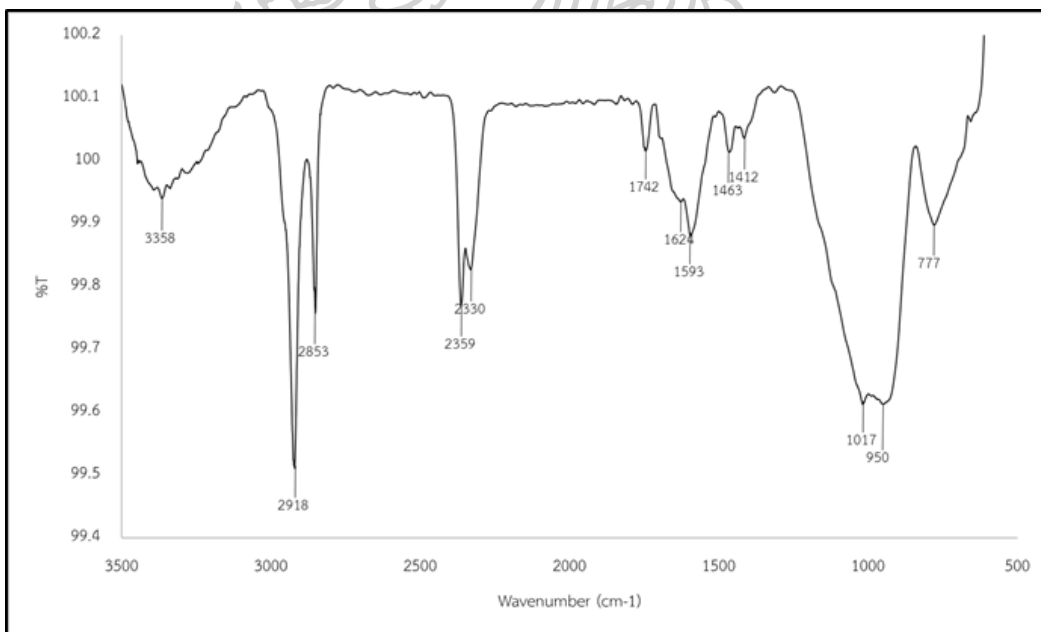
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่สำคัญด้วย Infrared spectroscopy (IR) ATR mode ของโม่เสกตัวอย่าง



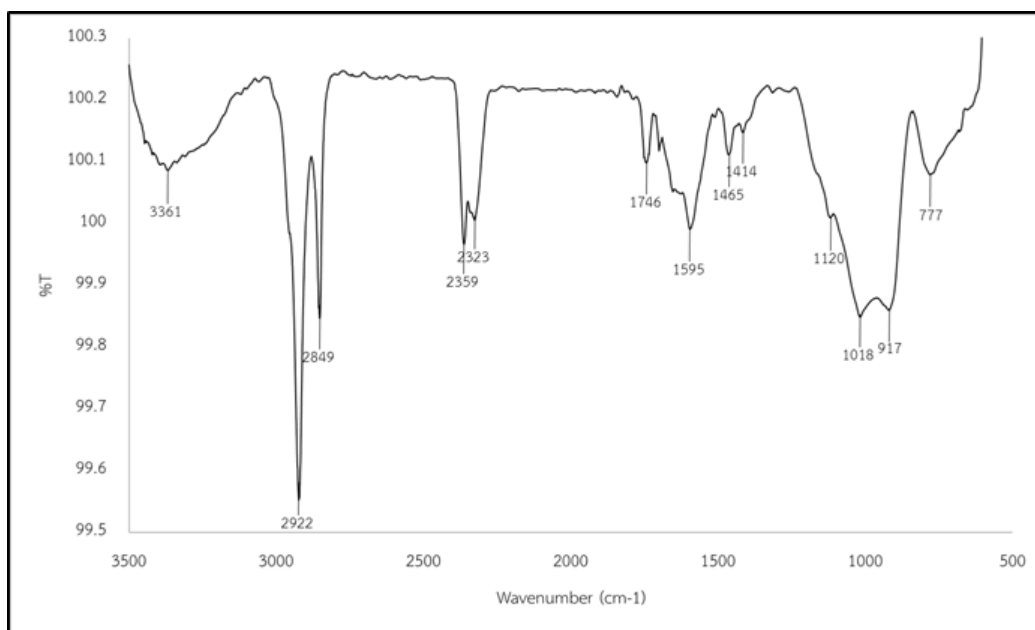
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm<sup>-1</sup>) และค่า %T ของแผ่นโม่เสกสีทอง



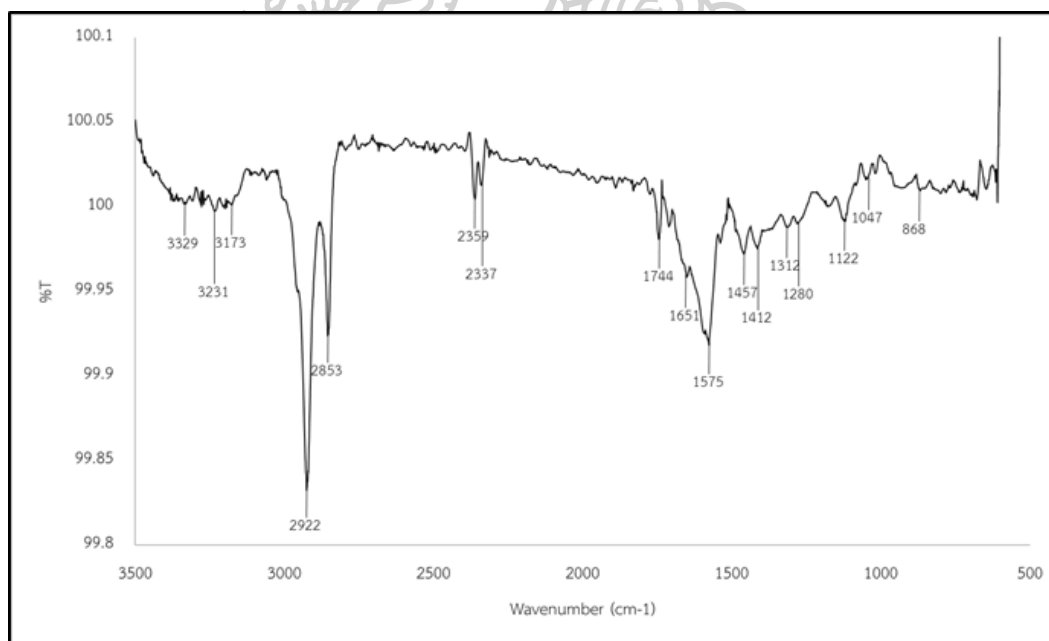
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm<sup>-1</sup>) และค่า %T ของแผ่นโมเสกสีน้ำตาล



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm<sup>-1</sup>) และค่า %T ของแผ่นโมเสกสีเทาเข้ม

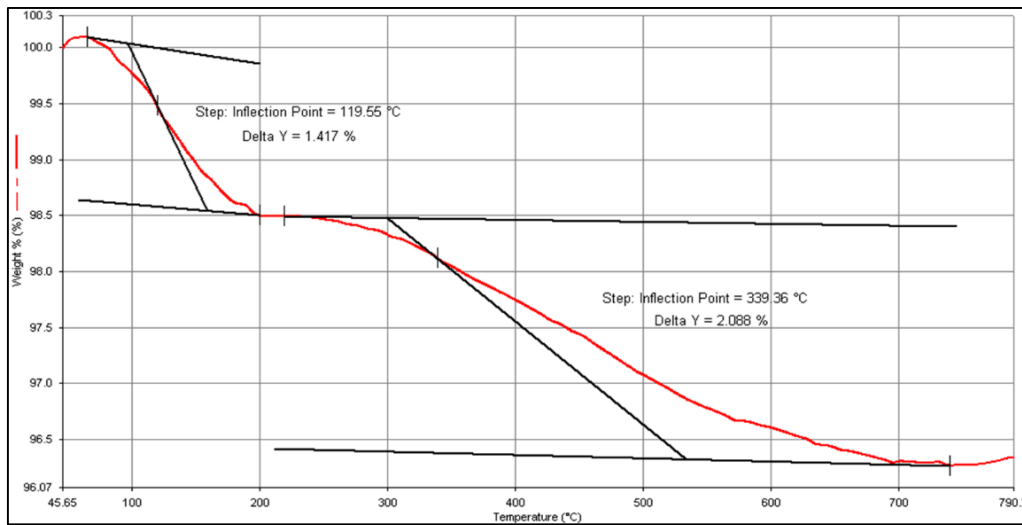


รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm<sup>-1</sup>) และค่า %T ของแผ่นโพลีเอทิลีน

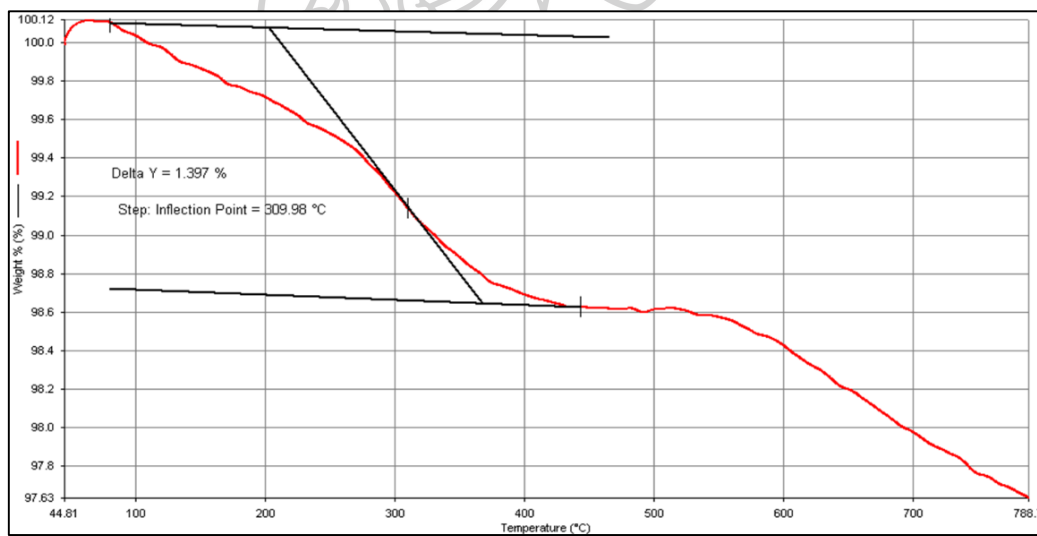


รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm<sup>-1</sup>) และค่า %T ของแผ่นโพลีโพรพิลีน

ผลการวิเคราะห์สมบัติและเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโม่เสก

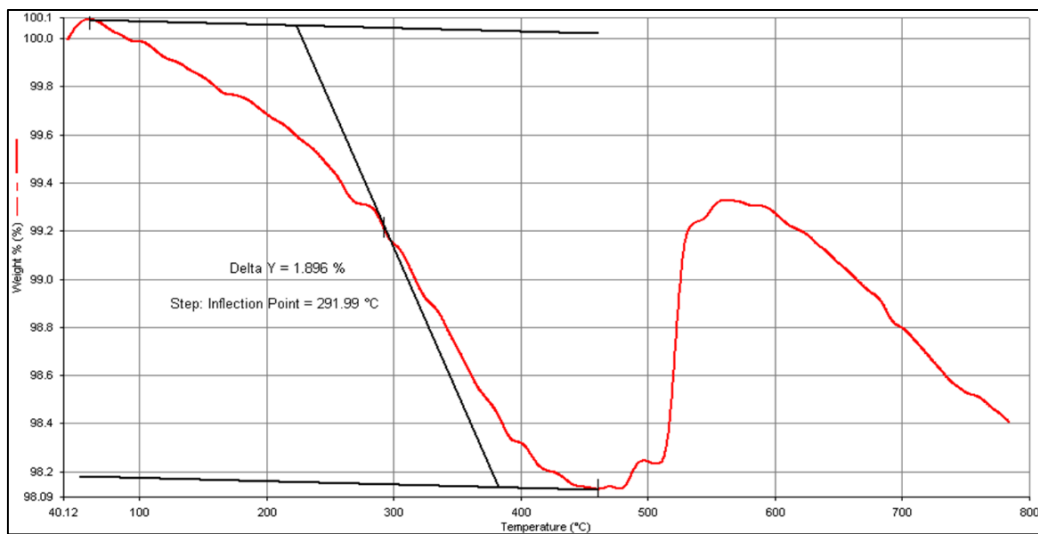


รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของ โม่เสกสีทอง

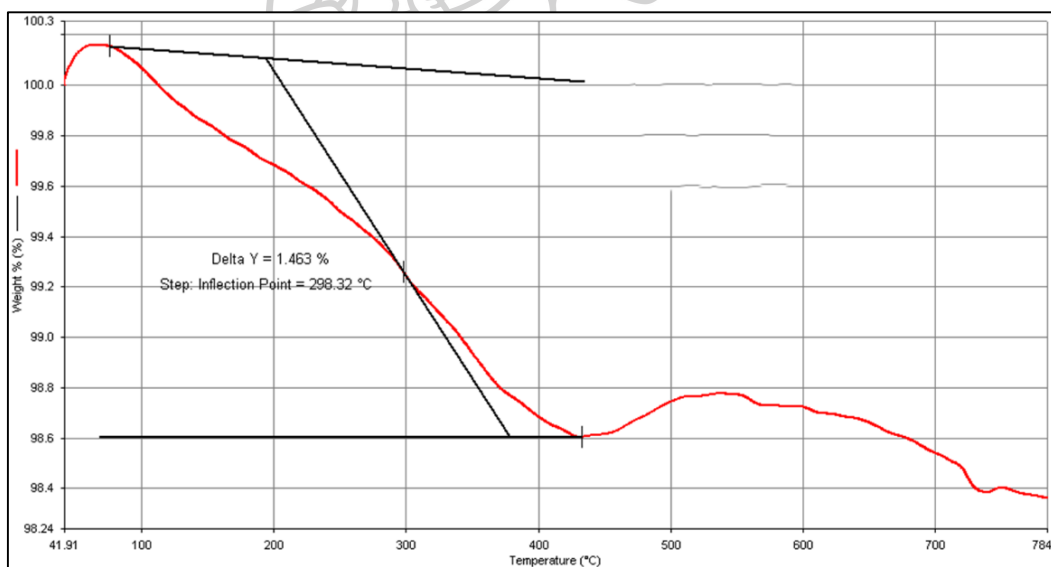


รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของ โม่เสกสีน้ำตาล

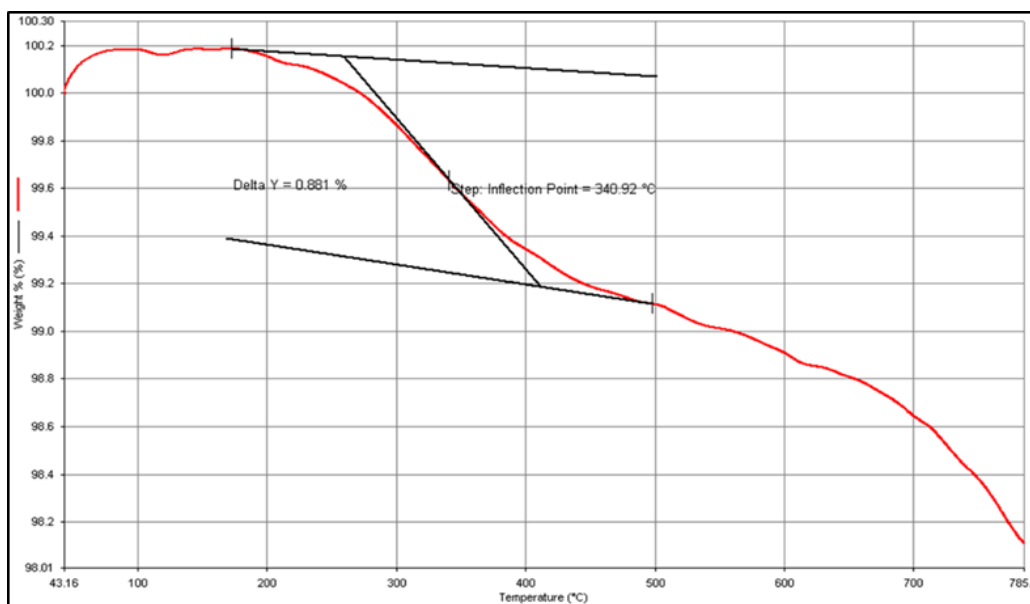




รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของ โมเสกสีเทาเข้ม



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของ โมเสกสีเทาอ่อน



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของ โมเสกสีม่วง



ตารางที่ 1 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีทองตำแหน่งที่ 1

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	39.4	54.34	8.79
NaK	15.82	15.18	8.78
AlK	2.1	1.72	10.43
SiK	31.85	25.02	5.02
K K	1.5	0.85	14.75
CaK	3.58	1.97	8.33
BaL	5.75	0.92	20.16

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีทองตำแหน่งที่ 2

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	44.37	58.52	8.13
NaK	17.7	16.25	8.34
AlK	1.83	1.43	10.28
SiK	28.24	21.22	4.99
K K	0.99	0.53	16.57
CaK	2.68	1.41	8.04
BaL	4.21	0.65	18.5

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีทองตำแหน่งที่ 3

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	5.54	18.35	14.38
O K	18.59	46.24	10.53
NaK	5.85	10.14	10.96
AlK	0.74	1.09	16.81
SiK	7.54	10.69	6.3
CaK	1.09	1.09	24.68
BaL	1.62	0.47	45.16
AuL	59.03	11.93	8.73

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีน้ำตาล

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	40.81	54.33	9.15
F K	3.27	3.66	17.78
NaK	11.48	10.64	9.16
AlK	3.16	2.5	8.43
SiK	31.37	23.79	4.58
K K	1.72	0.94	12.83
CaK	6.75	3.59	4.81
FeK	1.44	0.55	15.37

ตารางที่ 5 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีเทาเข้ม

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	0.02	0.03	99.99
O K	43.44	57.82	9.3
NaK	8.96	8.3	9.46
AlK	3.64	2.88	7.84
SiK	34.3	26	4.4
K K	1.68	0.91	15.03
CaK	6.79	3.61	5.09
FeK	1.17	0.45	18.77

ตารางที่ 6 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีเทาอ่อน

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	44.08	56.76	9.61
F K	4.88	5.29	20.37
NaK	11.6	10.4	10.72
AlK	3.02	2.3	11.37
SiK	29.65	21.75	5.13
K K	1.39	0.73	17.95
CaK	5.38	2.77	7.13

ตารางที่ 7 แสดงร้อยละของอะตอมในแผ่นโมเสกสีเทาม่วง

Element	Weight %	Atomic %	Error %
O K	38.15	51.81	9.61
F K	3.35	3.83	17.46
NaK	10.24	9.68	9.4
AlK	2.98	2.4	8.69
SiK	34.06	26.35	4.47
K K	1.52	0.85	14.55
CaK	8.52	4.62	4.86
MnK	1.18	0.47	19.46

ตารางที่ 8 แสดงร้อยละของอะตอมในคราบหินปูนบนพื้นทางเดินของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	6.27	11.67	10.91
O K	42.92	59.98	11.99
CaK	50.82	28.35	2.02

ตารางที่ 9 แสดงร้อยละของอะตอมในคราบหินปูนบนพื้นทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุ

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	24.54	36.12	8.75
O K	45.25	50.01	11.68
AlK	1.32	0.87	13.67
SiK	1.38	0.87	10.14
CaK	27.5	12.13	2.74

ตารางที่ 10 แสดงร้อยละของอะตอมในปูนยาแนวของพระมหาธาตุเจดีย์

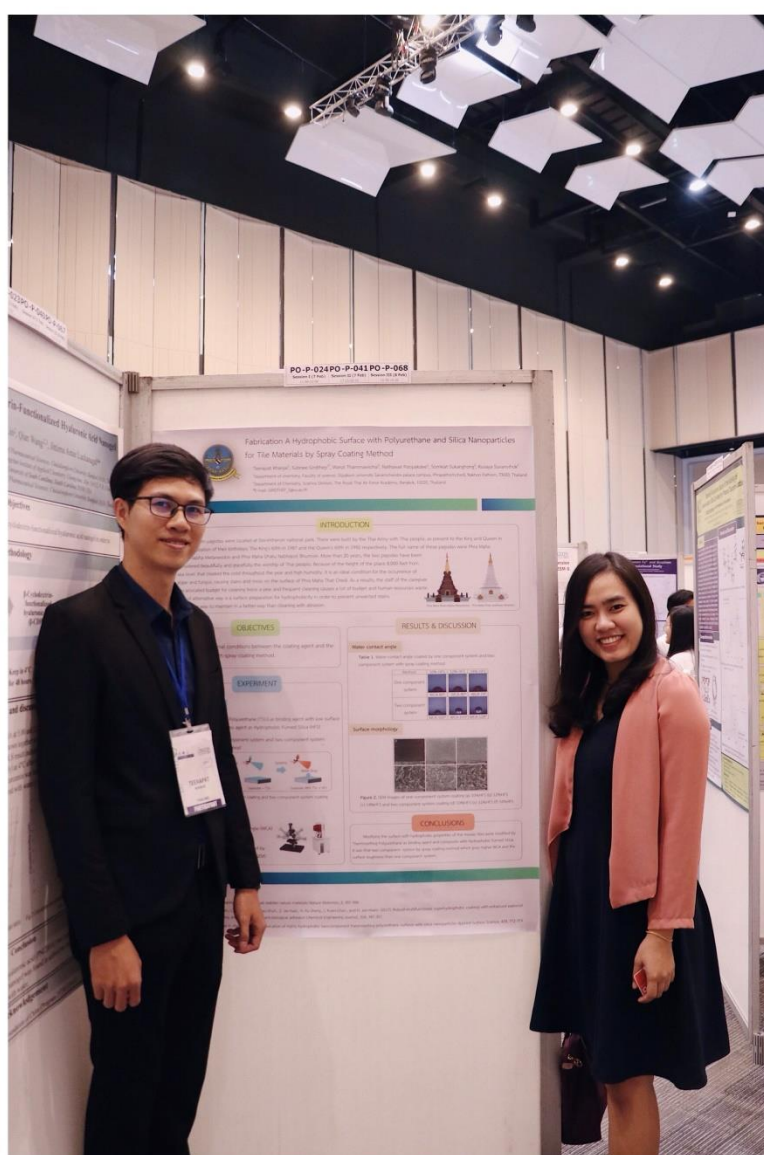
Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	10.07	17.39	12.6
O K	47.83	62.04	8.18
AlK	10.05	7.73	7.42
SiK	0.79	0.59	16.82
CaK	4.34	2.25	5.02
FeK	26.92	10	2.86



## ผลงานตีพิมพ์และการนำเสนอผลงานวิจัย

### การนำเสนอผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีโอกาสนำเสนอผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ ณ งานประชุมวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON) 2019 ตั้งแต่วันที่ 7-8 กุมภาพันธ์ 2562 ณ กรุงเทพมหานคร ในหัวข้อ Fabrication A Hydrophobic Surface with Polyurethane and Silica Nanoparticles for Tile Materials by Spray Coating Method







## Fabrication A Hydrophobic Surface with Polyurethane and Silica Nanoparticles for Tile Materials by Spray Coating Method

Teerapat Khanjai<sup>1</sup>, Sutinee Girdthep<sup>1</sup>, Warut Thamwichai<sup>2</sup>, Nathawat Poopakdee<sup>2</sup>, Sornkiat Sukanghong<sup>2</sup>, Kusaya Suvanvihok<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of chemistry, Faculty of science, Sakon Nakhon university Sanamchandra palace campus, Phraaphonchedi, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Science Division, The Royal Thai Air Force Academy, Bangkok, 10220, Thailand

\*E-mail: GIRDTHEP\_S@su.ac.th

### INTRODUCTION

The twin pagodas were located at Doi Inthanon national park. There were built by the Thai Army with Thai people, as present to the King and Queen in commemoration of their birthdays; The King's 60th in 1987 and the Queen's 60th in 1992 respectively. The full name of these pagodas were Phra Maha Dhatu Nabha Metaneeedon and Phra Maha Dhatu Nabhapol Bhumisiri. More than 20 years, the two pagodas have been considered beautifully and gracefully the worship of Thai people. Because of the height of the place 8,000 feet from sea level that created the cold throughout the year and high humidity. It is an ideal condition for the occurrence of algae and fungus, causing stains and moss on the surface of Phra Maha That Chedi. As a result, the staff of the caregiver has allocated budget for cleaning twice a year and frequent cleaning causes a lot of budget and human resources waste. One of alternative way is a surface preparation for hydrophobicity in order to prevent unwanted stains. It will be a way to maintain in a better way than cleaning with abrasion.



### OBJECTIVES

To find the optimal conditions between the coating agent and the binding agent with spray coating method.

### EXPERIMENT

#### Surface modifications

- Use Thermosetting Polyurethane (TSU) as binding agent with low surface energy and roughness agent as Hydrophobic Fumed Silica (HFS)
- Comparison one component system and two component system by spray coating method

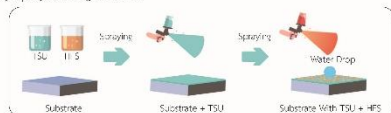


Figure 1. One component system coating and two component system coating

#### Surface characterizations

- Measure the water contact angle (WCA) with the camera microscope
- Surface morphology was studied by Scanning Electron Microscope (SEM)



### RESULTS & DISCUSSION

#### Water contact angle

Table 1. Water contact angle coated by one component system and two component system with spray coating method

Method	10% HFS	12% HFS	14% HFS
One component system			
	WCA 80°	WCA 80°	WCA 79°
Two component system			
	WCA 101°	WCA 115°	WCA 128°

#### Surface morphology

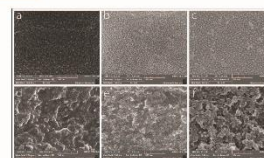


Figure 2. SEM images of one component system coating (a) 10% HFS (b) 12% HFS (c) 14% HFS and two component system coating (d) 10% HFS (e) 12% HFS (f) 14% HFS

### CONCLUSIONS

Modifying the surface with hydrophobic properties of the mosaic tiles were modified by Thermosetting Polyurethane as binding agent and composite with Hydrophobic Fumed Silica. It was that two component system by spray coating method which gives higher WCA and the surface roughness than one component system.

### Reference

- B. Palfi. (2003). Self-cleaning surfaces - virtual realities nature materials *Nature Materials*, 2, 301-306.
- C. Li-Chieh, C. Cai-Wan, C. Hsin-Chou, C. Kao-Shuh, Z. Jia-Huei, H. Yu-Sheng, L. Kuen-Chan, and H. Jen-Hsien. (2017). Robust multifunctional superhydrophobic coatings with enhanced water/oil separation, self-cleaning, anti-corrosion, and anti-biological adhesion *Chemical Engineering Journal*, 314, 347-357.
- Y. Guang, S. Jiaxi, and H. Xianghui. (2018). Fabrication of highly hydrophobic two-component thermosetting polyurethane surfaces with silica nanoparticles *Applied Surface Science*, 439, 772-779.

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้มีโอกาสนำเสนอผลงานทางการศึกษา ณ งานประชุมวิชาการ The 6th International Conference on Education (ICE 2019) and The 15th National Conference Creative Paradigms towards Internationalizing Education ครั้งที่ 15 ณ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร



## การตีพิมพ์ผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ถูกตีพิมพ์ในวารสาร Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal ในหัวข้อ การสำรวจและวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบหมองหม่นของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ (Finding the cause of the stain of the Phra Maha Dhatu Nabhamethanidol and Nabhapolbhumisiri at Doi Inthanon National Park, Chom Thong, Chiang Mai)

**การสำรวจและวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบหมองหม่นของพระมหาธาตุ  
เจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ  
ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่  
Finding the cause of the stain of the Phra Maha Dhatu Nabhamethanidol  
and Nabhapolbhumisiri at Doi Inthanon National Park, Chom Thong,  
Chiang Mai**

ธีรพัฒน์ ขันใจ<sup>1</sup>, พัฒนาวีศวร์ สว่างลาภ<sup>1</sup>, วรุต ธรรมวิชัย<sup>2</sup>, ณัฐวัฒน์ ภูักักดี<sup>2</sup>, กุศยา สุวรรณวิหก<sup>2</sup>,  
สมเกียรติ ตุกกางโฮง<sup>2</sup>, สมคิด ระหงส์ และสุธินี เกิดเทพ<sup>1\*</sup>  
Teerapat Khanjai<sup>1</sup>, Pattanawit Sawanglap<sup>1</sup>, Warut Thammawichai<sup>2</sup>, Nathawat Poopakdee<sup>2</sup>, Kusaya Suvanvihok<sup>2</sup>,  
Somkiat Sukanghong<sup>2</sup>, Somkid Rahong<sup>2</sup> and Sutinee Girdthep<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

พระมหาธาตุเจดีย์เจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ได้ถูกสร้างมานานและเกิดปัญหาความหมองหม่นจากคราบสกปรก งานวิจัยนี้ได้สำรวจและวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดคราบสกปรกที่เกิดขึ้นบนพระมหาธาตุเจดีย์ พบว่าแผ่นกระเบื้องโมเสกที่ถูกใช้ในการสร้างองค์พระธาตุฯ มีทั้งหมด 5 สี คือ สีทอง สีน้ำตาล สีเทาเข้ม สีเทาอ่อน และสีม่วง ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงและค่ามีสีเฉพาะ พื้นผิวของแผ่นโมเสกมีมุมสัมผัสน้ำประมาณ 25-45 องศา เมื่อตรวจสอบหุ้ที่ทั้งชั้นทางเคมีของแผ่นโมเสกพบว่ามีการขึ้นรูปจากแก้วซิลิกาที่เคลือบด้วยฟอสฟอริเซน โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDX สำหรับสมบัติทางความร้อนของแผ่นโมเสกซึ่งให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเกิดขึ้นเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC และจากเทคนิค TGA แสดงให้เห็นว่าวัสดุสามารถทนความร้อนได้ดี โดยมี Weight loss ลดลง 3-4 % ที่อุณหภูมิ 785°C โดยมี %char ที่มีค่าน้อยกว่า 95% สำหรับคราบไม่พึงประสงค์ตัวอย่างพบว่ามีธาตุแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก การตรวจสอบความเป็นกรด-ด่างของน้ำฝนตัวอย่างที่เก็บได้มีค่า pH ที่ 7-8 ซึ่งเป็นค่าปกติของน้ำฝนตามธรรมชาติ และเมื่อนำมาวิเคราะห์พบว่าปริมาณของแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) 10.125 ppm จัดว่าเป็นน้ำอ่อนที่เป็นน้ำฝนตามธรรมชาติ สำหรับการหลุดร่อนของปูนยาแนวมาจากสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์และมีปริมาณน้ำฝนที่สูง เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดเป็นคราบหินปูนเกาะบนพื้นผิวและพื้นตามทางเดินของพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสองส่งผลให้เกิดคราบหมองขึ้น

**คำสำคัญ :** พระมหาธาตุเจดีย์, แผ่นโมเสก, คราบหินปูน, อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์

ผู้วิจัยได้มีโอกาสตีพิมพ์วารสารทางการศึกษาประเภท Proceeding ในงานประชุมวิชาการ The 6th International Conference on Education (ICE 2019) and The 15th National Conference Creative Paradigms towards Internationalizing Education ครั้งที่ 15 ณ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในหัวข้อ การศึกษาการกำกับอภิปัญญาของของนักศึกษาวิทยาศาสตร์การกีฬาในรายวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน (A Study of Metacognitive Regulation of Sport Science Students in the Basic Chemistry Laboratory)

**การศึกษาการกำกับอภิปัญญาของของนักศึกษาวิทยาศาสตร์การกีฬา  
ในรายวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน  
A Study of Metacognitive Regulation of Sport Science Students  
in the Basic Chemistry Laboratory**

วิทวัส หาญดี<sup>1</sup>, ธีรพัฒน์ ชันใจ<sup>2</sup>, วนิดา ลำพอล<sup>2</sup> และ ศศิประภา วิลาวรรณ<sup>2</sup>  
Witawas Handee<sup>1</sup>, Teerapat Khanjai<sup>2</sup>, Vanida Lumpol<sup>2</sup> and Sasiprapa Wilawan<sup>2</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาระดับการกำกับอภิปัญญาของนักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา ในรายวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน โดยมีกลุ่มประชากรเลือกแบบจำเพาะเจาะจงคือนักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา ชั้นปีที่ 1 จำนวน 64 คน ในรายวิชาปฏิบัติการเคมีพื้นฐาน หัวข้อสมดุลเคมี โดยใช้แบบสอบถามเพื่อวัดการกำกับอภิปัญญาที่แบ่งเป็นสามหัวข้อคือ การวางแผน การควบคุม และการประเมินตนเอง จากนั้นเปรียบเทียบผลการประเมินจากแบบสอบถามร่วมกับการสังเกตพฤติกรรมในห้องปฏิบัติการและผลสอบ ผลการศึกษาพบว่านักศึกษาส่วนใหญ่มีทักษะอภิปัญญาด้านการวางแผนที่ดี แต่ไม่สามารถนำแผนมาใช้จนบรรลุผลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลระดับอภิปัญญาด้านการควบคุมตนเองและการประเมินตนเองที่บกพร่อง โดยพบว่านักศึกษาส่วนใหญ่ประเมินและมีความเชื่อมั่นในความสามารถของตนเองสูงเกินจริง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ระดับประเมินตนเองและผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดย One-way ANOVA test พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลับพบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสอดคล้องกับแผนการศึกษาในระดับมัธยมศึกษา และวิธีการรับเข้าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อวิเคราะห์ด้วย Factorial ANOVA analysis แสดงให้เห็นว่าในการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการทางเคมีให้แก่ นักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา ควรมีการกระตุ้นการกำกับอภิปัญญาด้านการควบคุมและการประเมินตนเองควบคู่ไปกับการรับพื้นฐานทางวิชาการ

**คำสำคัญ:** การกำกับอภิปัญญา / ปฏิบัติการเคมี / วิทยาศาสตร์การกีฬา

**ABSTRACT**

This study investigated the metacognitive regulation of sports science students in the basic chemistry laboratory class. Samples were purposively selected from 64 students enrolled in the basic chemistry laboratory during the topic of chemical equilibrium. The research instruments were metacognitive surveys including 3 areas of metacognitive regulation: planning, monitoring, and evaluating. The survey data were evaluated with students' behaviors via classroom observation and test scores. The results revealed that most students displayed decent metacognitive planning. However, they largely failed to successfully apply their plans, which was agreed with their impaired metacognitive monitoring and evaluating. The majority of the students demonstrated overconfidence in their ability and judgment. Nonetheless, the one-way ANOVA test showed that the level of self-evaluation and the exam scores were not statistically

<sup>1</sup> อาจารย์ที่ปรึกษา คร. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

<sup>2</sup> นักศึกษามหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธีรพัฒน์ ชันใจ
วัน เดือน ปี เกิด	18 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	เชียงราย
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนอนุชนาถอนุสรณ์ จังหวัดเชียงราย ปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอนุชนาถอนุสรณ์ จังหวัดเชียงราย ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรการศึกษาระดับบัณฑิต สาขาวิชาเคมี (เกียรตินิยมอันดับ 1) คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ที่อยู่ปัจจุบัน	125 หมู่ 1 ตำบลแม่เจดีย์ใหม่ อำเภอเวียงป่าเป้า จังหวัดเชียงราย 57260
ผลงานตีพิมพ์	ผลงานตีพิมพ์ Khanjai, T., Sawanglap, P., Thammawichai, W., Poopakdee, N., Suvanvihok, K., Sukanghong, S., Rahong, S. and Girdthep, S., (2019) Finding the cause of the stain of the Phra Maha Dhatu Nabhamethanidol and Nabhapolbhumisiri at Doi Inthanon National Park, Chom Thong, Chiang Mai. Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal, 12(3).  Handee, W., Khanjai, T., Lumpol, V. and Wilawan, S., (2019) A Study of Metacognitive Regulation of Sport Science Students in the Basic Chemistry Laboratory. The 6th International Conference on Education (ICE 2019) and The 15th National Conference Creative Paradigms towards Internationalizing Education, 445-456.

การนำเสนอผลงานวิจัย

Khanjai, T., Thammawichai, W., Poopakdee, N., Sukanghong, S.,  
Suvanvihok, K., Rahong, S., Beagkhuntod, B. and Girdthep, S.,  
Fabrication A Hydrophobic Surface with Polyurethane and Silica  
Nanoparticles for Tile Materials by Spray Coating Method. Poster  
presentation at Pure and Applied Chemistry International  
Conference (PACCON) 2019, Bangkok, Thailand, 7th-8th February  
2019.

