

สมรรถนะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กที่มีระบบการเคลือบสี  
แตกต่างกัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE AND ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT STEEL ROOF PAINT COATED  
SYSTEMS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Architecture  
Department of Architecture  
FACULTY OF ARCHITECTURE  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่น หลังคาเหล็กที่มีระบบการเคลือบสีแตกต่างกัน
โดย	นายธนพล ไคร้งาม
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจัน เศรษฐบุตุร

---

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนะจฤดี)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์พรพนชล์ก สุริโยธิน)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจัน เศรษฐบุตุร)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิกันต์ ยิ้มประยูร)	

ธนพล ไคร้รัมย์ : สมรรถนะการใช้งานและประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กที่มีระบบการเคลือบสีแตกต่างกัน. ( PERFORMANCE AND ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT STEEL ROOF PAINT COATED SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.อรุณรัตน์ เศรษฐภูบุตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงของสีบนแผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีระบบสีแตกต่างกัน รวมทั้งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร แผ่นเหล็กเคลือบสีใช้ในการทดสอบประกอบด้วยระบบสีโพลีเอสเตอร์ชั้นเดียวและสองชั้น และแบ่งตามโทนสี ทำการทดสอบแบบเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยการพ่นละอองน้ำเกลือเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง และความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมเป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง จากนั้นทำวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบปรับอากาศก่อนและหลังการทดสอบดังกล่าว

ผลทดสอบพบว่าแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นมีความคงทนต่อการกัดกร่อนดีกว่าแผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว ชั้นเคลือบโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสีจะมีความคงทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าชั้นเคลือบสังกะสี สังเกตได้จากลักษณะการกัดกร่อนที่มีการพองตัวของสีและการเกิดสนิมขาวตามรอยกรีดผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบ การเปลี่ยนแปลงของสีบนแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น สีโทนอ่อนจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุด แผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นที่มีชั้นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่น หากประเมินเทียบกับมาตรฐานแล้ว สีโทนกลางทุกอย่างทดสอบมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไม่เกิน 5 หน่วย การสะท้อนรังสีอาทิตย์หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีค่าลดลงระหว่างร้อยละ 0.10 ถึง 3.30 แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น สีโทนกลาง มีค่าลดลงสูงสุดร้อยละ 7.80 และแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น โทนเข้ม มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงขึ้น เนื่องจากผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของชั้นเคลือบสีภายนอก ทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีส่วนประกอบเป็นผงสีขาวบนผิวตัวอย่างทดสอบ การจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ แผ่นเหล็กเคลือบสีโทนอ่อนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด หากพิจารณาตลอดปี เดือนมีนาคมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดในเดือนธันวาคม การใช้พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้านค้าเปิดเวลา 7:00 น. เวลา 14:00 น. ที่มีการใช้พลังงานสูงสุดและจะลดลงมาจนกระทั่งปิดร้านเวลา 21:00 น. การเลือกแผ่นหลังคาเหล็กสีโทนอ่อนเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีและเคลือบสีสองชั้นจะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานทางด้านสมรรถนะของวัสดุ ทั้งยังลดการถ่ายเทความร้อนสู่ตัวอาคาร ประหยัดพลังงานที่ใช้กับระบบปรับอากาศภายในอาคารได้ถึงร้อยละ 34 หากเทียบกับการใช้สีโทนเข้ม หรือร้อยละ 18 หากเป็นสีโทนอ่อนเหมือนกัน

สาขาวิชา           สถาปัตยกรรม  
ปีการศึกษา        2562

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6073560825 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORD: ROOF SHEET, ENERGY, PAINT SYSTEM, SOLAR REFLECTANCE

Thanapol Kraingam : PERFORMANCE AND ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT STEEL ROOF PAINT COATED SYSTEMS. Advisor: Assoc. Prof. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D.

The objectives of this research are to study and compare corrosion and color change performance on prepainted steel that is under different paint systems. The study is related to a single layer and double layers of polyester on prepainted steel. The test was conducted in a laboratory such as corrosion resistance by operating salt spray apparatus for 1,000 hours and color difference by the QUV accelerated weathering for 2,000 hours. In addition, the study in changes of solar reflectance and analyze about cooling energy consumption in the building by VisualDOE 4.1 simulation.

The research found that the corrosion resistance by accelerating salt spray test occurred different patterns of corrosion in white rust on cross-cut and color blistering. Double paint layers have better corrosion resistance than the single layer. Specimen of aluminium-zinc alloy coating are more resistant to corrosion than the zinc-coated layer. The color change value tends to increase when test duration is longer. Light color has the highest value. Aluminium-zinc alloy coated in prepainted steel of double layer system have less change value by compared to all specimens. The assessment against the standard are within the specified threshold that is less than 5 units. In addition, the test results of solar reflectance reduce between 0.10% to 3.30%. Specimen of double paint layers of zinc-coated prepainted steel reduces maximum value 7.80%. Dark tone specimen in double paint layers of aluminium-zinc alloy coated results higher reflectance because of deterioration of coating surface. It creates titanium dioxide that contains white pigment on surface after the test. According to building energy simulation, light color is the lowest energy consumption. To consider in the whole year, the highest is in March and the lowest is in December. Store opens between 7am-9pm, peak energy consumption is at 2pm. The lighter doubles prepainted of aluminium-zinc coated steel can provide higher solar reflectance and the better quality of paint system can be more durable. It can save energy consumption 34% to compared with dark tone and 18% to compared with other light tone.

Field of Study: Architecture

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษา แก้ไขข้อบกพร่อง และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างมาก ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณในความกรุณามา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.พรรณชลัท สุริโยธิน ผศ.ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ ในฐานะอาจารย์ผู้ให้ความรู้พื้นฐานในระดับปริญญาโท และ รศ.ดร.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ตลอดจนคณาจารย์และเจ้าหน้าที่คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและแรงคิดอันเป็นประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ตลอดจนสามารถนำไปประยุกต์กับการทำงานในอนาคตได้

ขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น iDea 10 ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจกันเสมอมา และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธนพล ไคร้งาม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	3
สารบัญแผนภูมิ.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	9
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
1.6 ข้อจำกัดในการวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นเหล็กเคลือบสี.....	13
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสีและสารเคลือบผิว.....	20
2.4 การทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะ.....	29
2.5 รังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อวัสดุ.....	32
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	42

3.1	ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	42
3.2	การกำหนดตัวแปรในการทดลอง .....	43
3.3	ขั้นตอนการวิจัย .....	44
3.4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	54
3.5	การจำลองการใช้พลังงานระบบปรับอากาศของอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 .....	59
3.6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	63
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	65
4.1	การทดสอบหาความหนาชั้นเคลือบสี .....	65
4.2	การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบการพ่นละอองน้ำเกลือ ...	70
4.3	การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม .....	72
4.4	การทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์.....	78
4.5	การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ .....	81
บทที่ 5	สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	93
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2	เสนอแนะแนวทางการเลือกใช้วัสดุ.....	95
5.3	ข้อเสนอแนะ .....	95
บรรณานุกรม.....		97
ประวัติผู้เขียน.....		101



## สารบัญตาราง

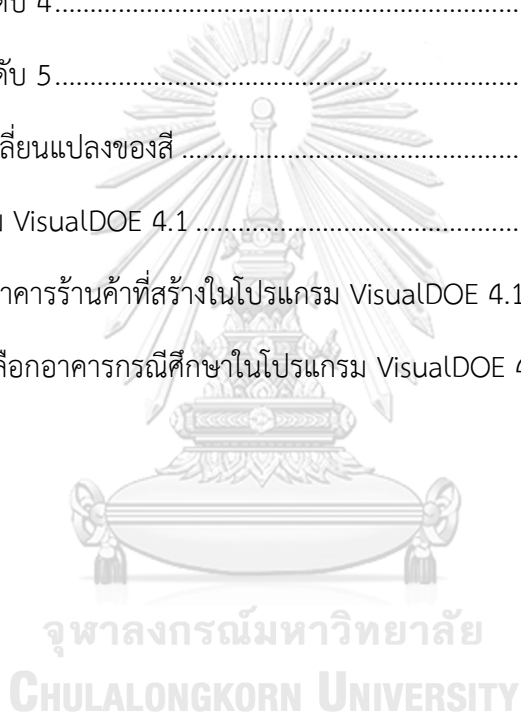
ตารางที่ 2.1	ประเภทของลักษณะการเคลือบสีแต่ละด้าน .....	14
ตารางที่ 2.2	ชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี .....	15
ตารางที่ 2.3	คุณลักษณะของแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว .....	15
ตารางที่ 2.4	คุณลักษณะของแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	16
ตารางที่ 2.5	ความคงทนละอองน้ำเกลือแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี .....	17
ตารางที่ 2.6	ชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี .....	18
ตารางที่ 2.7	ประเภทของสัญลักษณ์ของการเคลือบสี .....	19
ตารางที่ 2.8	คุณลักษณะของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	19
ตารางที่ 2.9	ระยะเวลาของการทดสอบความคงทนของการเคลือบผิว .....	20
ตารางที่ 2.10	การเปลี่ยนแปลงของสีหลังการทดสอบ 2,000 ชั่วโมง .....	30
ตารางที่ 2.11	ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำสุดของหลังคาตามเงื่อนไข LEED .....	36
ตารางที่ 2.12	ส่วนผสมชั้นเคลือบโลหะผสมโดยกรรมวิธีจุ่มร้อน .....	39
ตารางที่ 3.1	ชิ้นงานทดสอบ .....	47
ตารางที่ 3.2	ระดับความหนาแน่นและขนาดสีพองตัว .....	54
ตารางที่ 3.3	ข้อมูลการใช้งานของอาคารร้านค้ากรณีศึกษา .....	62
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลตัวอย่างทดสอบ .....	65
ตารางที่ 4.2	การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว ..	66
ตารางที่ 4.3	การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	67
ตารางที่ 4.4	การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น ...	68
ตารางที่ 4.5	ความหนาชั้นเคลือบสีชั้นทดสอบ .....	69
ตารางที่ 4.6	ระดับสีพองจากการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน .....	70
ตารางที่ 4.7	ลักษณะสีพองและการเกิดสนิมขาวจากการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน .....	71

ตารางที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กชั้นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี ชั้นเดียว.....	72
ตารางที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น.....	73
ตารางที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี สองชั้น .....	73
ตารางที่ 4.11 ลำดับค่าการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กทดสอบที่เวลา 2,000 ชั่วโมง .....	76
ตารางที่ 4.12 ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นงานทดสอบ.....	78
ตารางที่ 4.13 ค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นงานทดสอบจากการคำนวณ.....	80
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศของอาคารกรณีศึกษา.....	82
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบการดูดซับรังสีอาทิตย์.....	83
ตารางที่ 4.16 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเดือนมีนาคม.....	89
ตารางที่ 4.17 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเดือนกันยายน.....	91

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 การกัดกร่อนบนพื้นผิวแผ่นเหล็กเคลือบสีที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อกัดกร่อนแบบการพ่นละอองน้ำเกลือเป็นเวลา 2,000 ชั่วโมง.....	7
ภาพที่ 2.1 ความหนาชั้นเคลือบ .....	17
ภาพที่ 2.2 L-a-b Chart ของ CIE Lab Scale .....	24
ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบการแสดงค่า 3 มิติ ของ Hunter L, a, b และ CIE L*a*b .....	25
ภาพที่ 2.4 กระบวนการพ่นละอองน้ำเกลือ .....	28
ภาพที่ 2.5 กระบวนการสร้างความชื้น (Humidifying Process).....	28
ภาพที่ 2.6 กระบวนการแห้งตัว (Drying Process) .....	29
ภาพที่ 2.7 ความยาวคลื่นหลอด UVA-340 .....	31
ภาพที่ 2.8 ความยาวคลื่นหลอด UVA-313 .....	31
ภาพที่ 2.9 เครื่องทดสอบ QUV แบบวิธีการเร่งสภาวะ .....	32
ภาพที่ 2.10 การสะท้อนรังสีอาทิตย์และการคายความร้อนของหลังคา .....	33
ภาพที่ 2.11 อุณหภูมิบนผิววัสดุที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน.....	35
ภาพที่ 2.12 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงจากการสะสมคราบฝุ่นและความเสื่อมสภาพผิว .....	36
ภาพที่ 2.13 อัตราการกัดกร่อนแผ่นเหล็กเคลือบโลหะ โดยวิธีการ Cyclic Corrosion Test.....	39
ภาพที่ 3.1 หลักการตรีโกณมิติในการคำนวณความหนาชั้นเคลือบสี .....	44
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างการวัดความหนาชั้นเคลือบสีสองชั้นด้วยเครื่องมือวัดความหนาสี.....	45
ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งการเตรียมชิ้นทดสอบ .....	46
ภาพที่ 3.4 ระบบการเคลือบสีชั้นเดียว .....	46
ภาพที่ 3.5 ระบบการเคลือบสีสองชั้น .....	46
ภาพที่ 3.6 แผ่นเหล็กเคลือบสีโพลีเอสเตอร์จำแนกตามโทนสีอ่อน กลาง เข้ม .....	48
ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบความคงทนละอองน้ำเกลือ .....	49

ภาพที่ 3.8 การทดสอบความคงทนละอองน้ำเกลือ.....	50
ภาพที่ 3.9 สีพองหลังการทดสอบละอองน้ำเกลือ 1,000 ชั่วโมง.....	51
ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบ QUV Accelerated Weathering Tester .....	52
ภาพที่ 3.11 แสดงเครื่องมือทดสอบ (Spectrophotometer).....	53
ภาพที่ 3.12 สีพองระดับ 2.....	55
ภาพที่ 3.13 สีพองระดับ 3.....	56
ภาพที่ 3.14 สีพองระดับ 4.....	57
ภาพที่ 3.15 สีพองระดับ 5.....	58
ภาพที่ 3.16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี .....	59
ภาพที่ 3.17 โปรแกรม VisualDOE 4.1 .....	60
ภาพที่ 3.18 รูปแบบอาคารร้านค้าที่สร้างในโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	61
ภาพที่ 3.19 ข้อมูลเปลือกอาคารกรณีศึกษาในโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	62



## สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 3.1 ขั้นตอนระเบียบวิธีวิจัย .....	64
แผนภูมิที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว..	73
แผนภูมิที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	74
แผนภูมิที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	75
แผนภูมิที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทุกตัวอย่างทดสอบ .....	77
แผนภูมิที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์.....	79
แผนภูมิที่ 4.6 ค่าการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นและค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นระบบชั้นเคลือบสีที่แตกต่างกัน .....	84
แผนภูมิที่ 4.7 ค่าการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นและค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นโหนดสีที่แตกต่างกัน .....	84
แผนภูมิที่ 4.8 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว .....	86
แผนภูมิที่ 4.9 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น .....	87
แผนภูมิที่ 4.10 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น.....	88
แผนภูมิที่ 4.11 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศเฉลี่ยเดือนมีนาคมกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว .....	90
แผนภูมิที่ 4.12 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศเฉลี่ยเดือนกันยายนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว .....	92

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

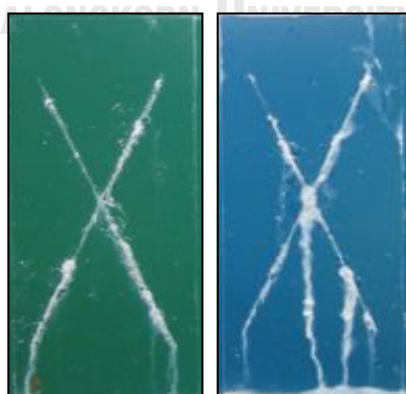
การใช้แผ่นเหล็กเคลือบสีกับงานก่อสร้างทางด้านสถาปัตยกรรมส่วนใหญ่ จะนำมาใช้กับการห่อหุ้มเปลือกอาคารทั้งส่วนของหลังคาและผนัง เทคโนโลยีการผลิตแผ่นเหล็กเคลือบสีได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีสีสันทันและลวดลายให้เลือกอย่างหลากหลาย มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุณภาพสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความคงทนต่ออายุการใช้งาน เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะอากาศที่อยู่ใกล้ทะเลหรือการกัดกร่อนที่สูงกว่าปกติ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในท้องตลาดมีหลายเกรดคุณภาพและผู้เลือกใช้ยังขาดความรู้ความเข้าใจสมบัติของวัสดุทางด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพวัสดุ รวมถึงปัจจัยด้านราคาที่ต้องการลดต้นทุนการก่อสร้าง จนเป็นเหตุทำให้เกิดการใช้วัสดุที่ไม่เหมาะสมกับเปลือกอาคารภายนอกซึ่งอาจส่งผลให้วัสดุเสื่อมสภาพก่อนเวลา

ระบบสีประกอบด้วยผงสี (Pigment) ตัวทำละลาย (Solvent) สารยึดติด (Resin) และสารเติมแต่ง (Additive) การใช้องค์ประกอบของระบบสีที่ต่างกันในการเคลือบจะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติแตกต่างกัน เช่น สารปรับสภาพผิวประเภทอนินทรีย์สาร (Inorganic) จำพวก Zirconium, Cerium, Molybdate และ Titanium ที่ได้มีการพัฒนาเพื่อใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนให้กับผิวเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Gao, Li, & Ma, 2017) หรือสารยึดติดที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการแสดงคุณภาพของสี เช่น โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) อีพ็อกซี (Epoxy) และฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride) เป็นต้น โดยที่ระบบสีฟลูออไรด์จะมีความคงทนต่อรังสี UV A และ B ได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะกับการใช้งานภายนอก (Wood, 2014) แผ่นเหล็กเคลือบสีส่วนใหญ่ที่ใช้ในประเทศไทยจะเป็นระบบสีโพลีเอสเตอร์ที่มีคุณภาพยอมรับได้และราคาไม่สูงจนเกินไป มีระบบสีทั้งชั้นเดียวและสองชั้นเป็นตัวเลือก ระบบสีสองชั้นจะมีสีชั้นแรกเป็นสีรองพื้น (Primer) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกัดกร่อนและปรับสภาพการยึดเกาะที่ดีขึ้นให้กับแผ่นเหล็กกับสีด้านบน (Mariappan, Kamble, & Naik, 2019)

ความคงทนต่อการกัดกร่อนและความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เป็นสิ่งบ่งชี้ด้านประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุ สามารถทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง (Exposure Test) เพื่อตรวจสอบและประเมินระยะเวลาที่วัสดุเสื่อมสภาพในพื้นที่ที่ต้องการ หรือสามารถทำการทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะ (Accelerated Test) ด้วยเครื่องเร่งสภาวะในช่วงระยะเวลาอันสั้น (Wood, 2014) เพื่อใช้ผลทดสอบในห้องปฏิบัติการประเมินเทียบกับค่ามาตรฐาน และคาดคะเนอายุการใช้งานของวัสดุ

เทียบกับอัตราการกัดกร่อนจากสภาวะแวดล้อมได้ (Cocuzzi & Pilcher, 2013) ทั้งนี้การทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมของสีมีหลายรูปแบบ เช่น ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสี ความคงทนต่อสารละลายที่เป็นกรดหรือด่าง ความคงทนต่อความชื้น ความคงทนต่อการกัดกร่อน ความคงทนต่อความร้อน ความคงทนต่อการเป็นผงสี เป็นต้น

การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบการพ่นละอองน้ำเกลือ (Salt Spray) ตามมาตรฐาน ASTM B117 จะดำเนินการในห้องปฏิบัติการ โดยมีการพ่นละอองน้ำเกลืออย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในตู้ทดสอบการกัดกร่อนละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Chamber) ถือเป็นมาตรฐานในการทดสอบวัสดุโดยเฉพาะชิ้นงานโลหะที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและยาวนานมากกว่า 50 กว่าปี (European General Galvanizers Association, 2013) ความคงทนต่อการกัดกร่อนแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งานและสภาวะแวดล้อมตามมาตรฐานกำหนด หรือตามแต่ละหน่วยงานกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ประเมินระยะเวลาการใช้งานของวัสดุว่าจะไม่เสื่อมสภาพก่อนอายุตามที่กำหนดไว้ (Upadhyay, Allahar, & Bierwagen, 2014) ความเสื่อมสภาพของวัสดุยังสามารถตรวจสอบได้จากแรงยึดเหนี่ยวของพันธะด้วยกล้องจุลทรรศน์ เช่น การคำนวณหาน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) ความเงาที่ลดลง (Gloss Loss) การแตกหัก (Cracking) การบวมตัว (Blistering) และการหลุดร่อน (Flaking) ของชั้นเคลือบสี เป็นต้น (Nguyen, Le, Dao, Decker, & Nguyen-Tri, 2018) ความเสื่อมสภาพของวัสดุข้างต้นอาจมีความสัมพันธ์กัน เช่น การพองตัวของสีจะทำให้เกิดพื้นผิวที่ขรุขระเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อความเงาของชั้นเคลือบที่ลดลง (Yang, Tallman, Bierwagen, Croll, & Rohlik, 2002)



ภาพที่ 1.1 การกัดกร่อนบนพื้นผิวแผ่นเหล็กเคลือบสีที่ใช้ทดสอบความคงทนต่อกัดกร่อนแบบการพ่นละอองน้ำเกลือที่เวลา 2,000 ชั่วโมง

แสงแดดเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของวัสดุเสื่อมลง โดยเฉพาะวัสดุที่เคลือบสีที่ได้รับแสงแดดอยู่เป็นประจำ รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) เป็นตัวทำลายชั้นสีและทำให้สมบัติของสีเปลี่ยนแปลงไป ชั้นเคลือบสีคุณภาพสูงจะสามารถทนต่อรังสียูวีได้ดีและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) จะประกอบด้วยรังสียูวีที่มีช่วงคลื่น 295-400 นาโนเมตร ช่วงคลื่นที่ตาคนมองเห็น 400-700 นาโนเมตร และรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation หรือ IR) มากกว่า 700 นาโนเมตร (Cocuzzi & Pilcher, 2013) ทั้งนี้การทดสอบคุณภาพความคงทนต่อรังสียูวีสามารถทดสอบได้ทั้งสภาวะแวดล้อมจริงและการทดสอบแบบการเร่งสภาวะ ผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์นิยมใช้วิธีการทดสอบแบบการเร่งสภาวะด้วยตู้จำลองสภาวะรังสียูวี (QUV Chamber) เพื่อประเมินความเงา (Gloss) ความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสี (Color Change) และความคงทนต่อการเป็นผงสี (Chalking) ของวัสดุ (Wood, 2014)

การวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของสีมีการกำหนดเป็นหน่วย (Unit) ตามมาตรฐานที่นำมาใช้อ้างอิง เช่นค่าการเปลี่ยนแปลงของสีจะเทียบกับสีเริ่มต้นว่าต่างกันกี่หน่วย (Hunter  $\Delta E$  unit) ตามมาตรฐาน ASTM D-2244 วัสดุเปลือกอาคารที่ได้รับผลกระทบจากรังสียูวี จะส่งผลทำให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์บนพื้นผิวลดลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากเปลือกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารนั้นสูงขึ้น เป็นปัจจัยทำให้พลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศสูงขึ้นตาม

ผู้วิจัยเห็นว่าการศึกษาปัจจัยความแตกต่างของระบบการเคลือบสีบนแผ่นเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบเร่งสภาวะจึงน่าจะเป็นกรณีศึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานภายนอกให้เหมาะสมตามอายุการใช้งานของอาคาร และนำมาประกอบในการพิจารณาด้านพลังงานกับอาคารที่มีการใช้ระบบปรับอากาศ เนื่องจากปัจจุบันมีการสนับสนุนให้มีออกแบบอาคารที่มีการอนุรักษ์พลังงานเพิ่มมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาปัจจัยด้านความแตกต่างของชั้นเคลือบโลหะและระบบการเคลือบสีที่ส่งผลต่อความคงทนต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงของสี
- 1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความคงทนต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงของสีบนแผ่นเหล็กเคลือบโลหะเคลือบสีที่ระบบการเคลือบแตกต่างกัน
- 1.2.3 ศึกษาและเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีระบบสีแตกต่างกัน



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาด้วยการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ (Salt Spray) ระยะเวลาของการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง
- 1.3.2 ศึกษาด้วยทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color Difference) ด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (QUV Accelerated Weathering) ระยะเวลาของการทดสอบ 2,000 ชั่วโมง ในห้องปฏิบัติการ
- 1.3.3 ศึกษาด้วยทดสอบค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance) แผ่นเหล็กเคลือบสีที่ผ่านการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม
- 1.3.4 การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 กับอาคารร้านค้าช่วงเวลาเปิดทำการ
- 1.3.5 แผ่นเหล็กเคลือบสีที่ศึกษาเป็นระบบสีโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ชั้นเดียวและสองชั้นที่มีความหนาสีรวม (Dry Film Thickness) ที่แตกต่างกัน

### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Experimental Research) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติความคงทนต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงของสีบนแผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีระบบชั้นเคลือบสีแตกต่างกัน แล้วนำผลการทดลองดังกล่าวมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่
  - 1) เทคโนโลยีและประเภทการเคลือบสีบนแผ่นเหล็กเคลือบโลหะ
  - 2) การทดสอบความต้านทานกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
  - 3) การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM D2244 Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates

- 4) การทดสอบการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E 903 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres และการคำนวณค่าดัชนีสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E1980-11 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces
- 5) มาตรฐานผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กเคลือบสีสำหรับงานก่อสร้างตามมาตรฐาน AS/NZS 2728:2013 Prefinished/prepainted sheet metal products for interior/exterior building application
- 6) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2753-2559 แผ่นเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี
- 7) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2131-2545 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี : แผ่นม้วนและแผ่นตัด (Prepainted Hot-dip Zinc-coated Steel : Coils and Sheets)

#### 1.4.2 การวิจัยเชิงทดลอง

- 1) ทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ (Salt Spray) ระยะเวลาการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง
- 2) ทดสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (Color Difference) ด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (Accelerated Weathering) ระยะเวลาการทดสอบ 2,000 ชั่วโมง

#### 1.4.3 การวิเคราะห์และประเมินผล

- 1) สมบัติทางกายภาพบนแผ่นเหล็กเคลือบสีตัวอย่างจากการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ
- 2) ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีและค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กเคลือบสีตัวอย่างจากการทดสอบด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม
- 3) วิเคราะห์การใช้พลังงานจากค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กเคลือบสีที่เปลี่ยนแปลงไป

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบความสัมพันธ์ของชั้นเคลือบวัสดุและโชนสีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของแผ่นเหล็กเคลือบสีด้านการกัดกร่อนและการซีดจางของสีตามลำดับ
- 1.5.2 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุแผ่นเหล็กเคลือบสีในงานก่อสร้างได้อย่างเหมาะสมกับสถานที่ตั้งและอายุการใช้งานของอาคาร รวมถึงการอนุรักษ์พลังงาน

### 1.6 ข้อจำกัดในการวิจัย

เพื่อลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลการวิจัย การศึกษาขั้นต้นครั้งนี้จึงใช้วิธีการทดสอบแบบเร่งสภาวะด้วยเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการจะนำผลการทดสอบดังกล่าวมาใช้ประเมินสมบัติของวัสดุยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมและเปรียบเทียบกับสภาวะแวดล้อมจริง นอกจากนี้ระบบสีโพลีเอสเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยถือเป็นระบบสีมาตรฐานที่นิยมใช้กัน แต่ในท้องตลาดยังมีระบบสีอีกหลายประเภท

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติของวัสดุด้านความคงทนต่อการกัดกร่อน ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม และการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นเหล็กเคลือบสี แบ่งได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นเหล็กเคลือบสี

2.1.1 แผ่นเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี

2.1.2 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี: แผ่นม้วนและแผ่นตัด

#### 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสี

2.2.1 ประเภทสี

2.2.2 องค์ประกอบสี

2.2.3 การวัดสี

2.2.4 เครื่องมือวัดสี

#### 2.3 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

2.3.1 มาตรฐานทดสอบ

2.3.2 เครื่องมือทดสอบ

2.3.3 การเตรียมวัสดุทดสอบ

2.3.4 การทดสอบวัสดุ

2.3.5 การประเมินผลวัสดุทดสอบ

#### 2.4 การทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะ

2.4.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

2.4.2 การทดสอบและประเมินผลวัสดุทดสอบ

#### 2.5 รังสีอาทิตย์

2.5.1 การสะท้อนรังสีอาทิตย์

2.5.2 การคายความร้อน

## 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแผ่นเหล็กเคลือบสี

แผ่นเหล็กเคลือบสี (Prepainted Steel) คือ วัสดุที่ทำจากแผ่นเหล็กรีดเย็น มีการเคลือบด้วยโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือเกิดสนิมและมีการเคลือบสีทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่น ใช้สำหรับขึ้นรูปรีดลอนสำหรับงานแผ่นหลังคาหรือผนัง พับรางน้ำ ปิดผิวเครื่องใช้ไฟฟ้า หรืองานตกแต่งทั่วไป

### 2.1.1 แผ่นเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี

#### 2.1.1.1 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี” หมายถึง เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นที่นำมาเคลือบผิวด้วยอะลูมิเนียม 50% ถึง 60% ผสมสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนแบบต่อเนื่องตาม มอก. 2228 แล้วผ่านกระบวนการเคลือบสีอย่างสม่ำเสมออย่างน้อย 1 ด้านและอบร้อน (Backing) เพื่อให้สีเกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงเป็นสารพอลิเมอร์โดยสมบูรณ์ (Curing)
- 2) เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี แผ่นม้วน ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “เหล็กแผ่นม้วน” หมายถึง เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีที่ทำเป็นม้วน
- 3) เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี แผ่นตัด ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “เหล็กแผ่นตัด” หมายถึง เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีที่ตัดเป็นแผ่นจากแผ่นม้วน
- 4) ความหนาระบุ หมายถึง ความหนาของเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดเย็นก่อนนำมาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสี (Base Metal Thickness)
- 5) ความหนาก่อนเคลือบสี หรือความหนาของเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสี หมายถึง ความหนารวมชั้นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสี
- 6) ความหนาหลังเคลือบสี หรือความหนารวมของผลิตภัณฑ์ หมายถึง ความหนาของเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีรวมชั้นเคลือบสี
- 7) ความหนาสีระบุ หมายถึง ความหนาของชั้นเคลือบสีที่แสดงโดยผู้ทำเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี
- 8) ความหนาโลหะเคลือบที่เทียบเท่า (Equivalent Coating Thickness) หมายถึง ความหนาเฉลี่ยของโลหะเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสี

## 2.1.1.2 ชนิด

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) เหล็กแผ่นม้วน
- 2) เหล็กแผ่นตัด

## 2.1.1.3 ประเภท

เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี แบ่งประเภทตามลักษณะการเคลือบสีแต่ละด้าน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของลักษณะการเคลือบสีแต่ละด้าน

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

ประเภท	จำนวนชั้นของการเคลือบสี
0	ไม่มีการเคลือบสีหรือเคลือบสีแต่ไม่ประกันคุณภาพ
1	1 ชั้น
2	2 ชั้น
3	ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป

## หมายเหตุ

- 1) การเคลือบสี หมายถึง การก่อตัวเป็นสีเคลือบโดยการเคลือบและโดยการอบร้อน และตัวเลขจะแสดงจำนวนครั้งของการเคลือบและอบร้อน
- 2) ประเภทของลักษณะการเคลือบสีสำหรับด้านหน้าและด้านหลังของเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี จะแสดงเป็นตัวเลขสองหลัก ซึ่งเป็นการรวมสัญลักษณ์ของประเภทของแต่ละด้าน ตัวอย่างเช่น 20 เลข 2 หมายถึง เคลือบสีด้านหน้า 2 ชั้นและเลข 0 หมายถึง ไม่มีการเคลือบสีหรือไม่มีการรับประกันคุณภาพสีด้านหลัง
- 3) บนผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเคลือบสีแล้ว สามารถพิมพ์ลายหรือทำสีเป็นบางส่วนได้ โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพการเคลือบสี
- 4) การไม่รับประกันคุณภาพสี หมายถึง ไม่ต้องผ่านการทดสอบการตัดโค้ง ความทนละอองน้ำเกลือ ความทนแรงกระแทก และการติดยึดของสีที่เคลือบ
- 5) อ้างอิงผลทดสอบความทนละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Test)

2.1.1.4 <sup>๕</sup>ชั้นคุณภาพ

เหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี แบ่งออกเป็น 8 ชั้นคุณภาพตามการใช้งาน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

ลำดับ	ชั้นคุณภาพ	การใช้งาน	สัญลักษณ์ของชั้นคุณภาพก่อนเคลือบสี
1	C01	งานทั่วไป (Commercial Quality)	01
2	C02	งานขึ้นรูป (Drawing Quality)	02
3	C03	งานขึ้นรูปลึก (Deep Drawing Quality)	03
4	C220	งานโครงสร้าง (Structural Quality)	220
5	C250		250
6	C320		320
7	C350		350
8	C550		550

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

ที่มา: บริษัท เอ็นเอส บลูสโคป (ประเทศไทย) จำกัด

หัวข้อ	รายละเอียด
ชั้นเคลือบโลหะ	AZ90
ระบบสี	โพลีเอสเตอร์
ความหนาชั้นเคลือบสีด้านหน้า	12 ไมครอน
ความหนาชั้นเคลือบสีด้านหลัง	5 ไมครอน
เกรดเหล็ก	G300, G550
ความหนาเหล็กรวมชั้นเคลือบโลหะเคลือบสี (มม.)	0.30, 0.35, 0.40, 0.47
ช่วงความกว้าง (มม.)	914, 940
หัวข้อ	รายละเอียด
มาตรฐานอ้างอิง	มอก.2753-2559

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

ที่มา: บริษัท เอ็นเอส บลูสโคป (ประเทศไทย) จำกัด

หัวข้อ	รายละเอียด
ชั้นเคลือบโลหะ	AZ150
ระบบสี	โพลีเอสเตอร์
ความหนาชั้นเคลือบสีด้านหน้า	20 ไมครอน
ความหนาชั้นเคลือบสีรองพื้นด้านบน	5 ไมครอน
ความหนาชั้นเคลือบสีรองพื้นด้านล่าง	5 ไมครอน
ความหนาชั้นเคลือบสีด้านหลัง	5 ไมครอน
ชั้นคุณภาพ	G300, G550
ช่วงความหนาระบุ (มม.)	0.30-1.00
ความกว้างสูงสุด (มม.)	1260
มาตรฐานอ้างอิง	AS/NZS 2728-2013, AS1365-1996

2.1.1.5 ความคงทนละอองน้ำเกลือ

- 1) ชั้นทดสอบต้องไม่พอง ไม่ย่น ไม่อ่อนตัว หรือหลุดล่อน และสนิมแดงจากรอยกรีด โดยรอบแต่ละด้านต้องไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร จากเส้นที่กรีดไว้
- 2) วิธีการทดสอบ ตัดตัวอย่างเหล็กแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีเป็นชั้นทดสอบขนาดกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และใช้มีดกรีดชั้นทดสอบตามแนวเส้นทแยงมุมเป็นรูปกากบาทให้ลึกถึงเนื้อเหล็กและมีความยาว 100 มิลลิเมตร แล้วนำไปวางในตู้ทดสอบโดยให้ทำมุมระหว่าง 15-30 องศา พันด้วยละอองของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 50 g/l  $\pm$  5 g/l โดยควบคุมค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.2 และอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบที่ 35 องศาเซลเซียส  $\pm$  2 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการพ่น 1 มิลลิลิตร ถึง 1.5 มิลลิลิตร  $\pm$  0.5 มิลลิลิตร ต่อ 1 ชั่วโมง ต่อ 80 ตารางเซนติเมตร ระยะเวลาที่พ่นดังตารางที่ 2.5 เมื่อครบตามกำหนดแล้วล้างชั้นทดสอบด้วยน้ำ



ตารางที่ 2.5 ความคงทนของน้ำเกลือแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

ประเภท	ระยะเวลาของการทดสอบ (ชั่วโมง)
0	-
1	200
2	500
3	2,000

2.1.1.6 ความหนาของแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสี



ภาพที่ 2.1 ความหนาชั้นเคลือบ

- คำอธิบาย
- a หมายถึง ความหนาระบุ
  - $b_1 + b_2$  หมายถึง ความหนาโลหะเคลือบที่เทียบเท่า
  - c หมายถึง ความหนาสีระบุด้านหน้า
  - d หมายถึง ความหนาสีระบุด้านหลัง
  - T หมายถึง ความหนาหลังเคลือบสี

2.1.1 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี: แผ่นม้วนและแผ่นตัด

2.1.2.1 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

- 1) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี ซึ่งต่อไปนีในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า “เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี” หมายถึง เหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น นำมาเคลือบผิวด้วยสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนแล้วเคลือบอบด้วยสีเรซินสังเคราะห์ (Durable Synthetic Resin Paint) ทั่บอีกครึ่งหนึ่ง ทำเป็นลักษณะแผ่นม้วนหรือแผ่นตัด

- 2) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีแผ่นม้วน หมายถึง เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีที่ทำเป็นม้วน
- 3) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีแผ่นตัด หมายถึง เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีแผ่นม้วนที่ตัดแบ่งเป็นแผ่น
- 4) มวลสังกะสีที่เคลือบ หมายถึง มวลเป็นกรัมของสังกะสีที่เคลือบต่อพื้นที่เคลือบชิ้นงานทั้ง 2 ด้านใน 1 ตารางเมตร
- 5) ความหนาตะรุ หมายถึง ความหนาของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นก่อนนำมาเคลือบสังกะสี

#### 2.1.2.2 ชนิด

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีแผ่นม้วนและเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีแผ่นตัด

#### 2.1.2.3 ชั้นคุณภาพ

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี แบ่งออกเป็น 8 ชั้นคุณภาพ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

ลำดับ	ชั้นคุณภาพของเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี	การใช้งาน	ความหนา (มิลลิเมตร)	สัญลักษณ์ของชั้นคุณภาพของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีก่อนเคลือบสี
1	CGCC	สำหรับใช้กับงานทั่วไป	0.25 ถึง 1.60	SGCC
2	CGCH	สำหรับใช้กับงานทั่วไปหรืองานที่ต้องการความแข็ง	0.11 ถึง 1.00	SGCH
3	CGCD1	สำหรับใช้กับงานขึ้นรูป	0.40 ถึง 1.60	SGCD1
4	CGC340	สำหรับใช้กับงานโครงสร้าง	0.25 ถึง 1.60	SGC340
5	CGC400	สำหรับใช้กับงานโครงสร้าง	0.25 ถึง 1.60	SGC400
6	CGC440	สำหรับใช้กับงานโครงสร้าง	0.25 ถึง 1.60	SGC440
7	CGC490	สำหรับใช้กับงานโครงสร้าง	0.25 ถึง 1.60	SGC490
8	CGC570	สำหรับใช้กับงานโครงสร้าง	0.25 ถึง 1.60	SGC570

#### 2.1.2.4 ประเภท

เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี แบ่งตามประเภทของสัญลักษณ์ของการเคลือบสี แต่ละด้าน ดังตารางที่ 2.7 เช่น เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสี ประเภท 12 หมายถึงเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีที่ด้านหน้าเคลือบชั้นเดียวด้านหลังเคลือบ 2 ชั้น

#### ตารางที่ 2.7 ประเภทของสัญลักษณ์ของการเคลือบสี

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

สัญลักษณ์ของการเคลือบสี	จำนวนชั้นของการเคลือบสี
0	ไม่เคลือบสี
1	เคลือบสีชั้นเดียว
2	เคลือบสี 2 ชั้น
3	เคลือบสีตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป

#### ตารางที่ 2.8 คุณลักษณะของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

ที่มา: บริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)

หัวข้อ	รายละเอียด
วัสดุ	แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสี
มาตรฐาน	มอก.2131-2545
ความหนาวัสดุก่อนเคลือบ	0.30 มม. (BMT), 0.40 มม. (BMT), 0.50 มม. (BMT)
ค่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance)	+0.05-0.05 มม.
ชนิดของสีเคลือบ (มาตรฐาน)	Polyester Resin (2 Coat, 2 Bake)
ความหนาของสีเคลือบ	(ด้านใช้งาน) สีรองพื้น 5 ไมครอน สีด้านบน 17 ไมครอน (ขึ้นกับชนิดสี) (ด้านล่าง) สีรองพื้น 5 ไมครอน สีด้านล่าง สีเทา (SE 132) 7 ไมครอน
รวมความหนาสีเคลือบ	~0.034-0.037 มม.
ชนิดสี	ตามตัวอย่าง
ปริมาณการเคลือบสังกะสี	Z220 (Min. 220 g/m <sup>2</sup> )
ความหนาของชั้นสังกะสี	0.034 มม.
ลำดับชั้นความคงทน	Class 2
ขนาดความกว้างก่อนขึ้นรูป	914 มม.

### 2.1.2.5 ความคงทนละอองน้ำเกลือ

- 1) เครื่องมือใช้เครื่องทดสอบความคงทนละอองน้ำเกลือ
- 2) การเตรียมชิ้นทดสอบ ทำการตัดเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเคลือบสีขนาดกว้าง 70 มิลลิเมตร และสูง 150 มิลลิเมตร
- 3) ใช้มีดกรีดชิ้นทดสอบตามแนวเส้นทแยงมุมเป็นรูปกากบาทให้ลึกถึงเนื้อเหล็กและมีความยาว 10 เซนติเมตร แล้วนำไปพ่นด้วยละอองของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 50 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ที่อุณหภูมิห้อง อัตราการพ่น 1 ถึง 5 ลูกบาศก์เดซิเมตรต่อ 24 ชั่วโมง ระยะเวลาที่พ่น ดังตารางที่ 2.9 เมื่อครบตามกำหนดแล้วล้างชิ้นงานทดสอบด้วยน้ำธรรมดา

ตารางที่ 2.9 ระยะเวลาของการทดสอบความคงทนของการเคลือบผิว

ที่มา: (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

ประเภทของการเคลือบสี	ความทนละอองน้ำเกลือ (ชั่วโมง)	ความทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะ* (ชั่วโมง)
1	200	-
2	500	-
3	2,000	1,500

หมายเหตุ \*

- 1) ความทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะ ให้ไว้เป็นข้อแนะนำ หมายถึงกรณีพิจารณาความทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะประเภทของการเคลือบสี 3 ให้พิจารณาผลการทดสอบระยะเวลา 1,500 ชั่วโมง
- 2) ประเภทของการเคลือบสีประเภทที่ 1 กรณีความหนาระบุไม่เกิน 0.20 มิลลิเมตร อาจใช้ชั่วโมงความทนละอองน้ำเกลือ 150 ชั่วโมง แทน 200 ชั่วโมง

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสีและสารเคลือบผิว

### 2.2.1 ประเภทสีและสารเคลือบผิว

สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง มีสมบัติของส่วนประกอบและลักษณะที่แตกต่างกัน ปัจจัยในการเลือกจึงอาศัยการพิจารณาจากความรู้พื้นฐานทางด้านเทคนิคและราคาตามคุณภาพที่ต้องการใช้ การจำแนกประเภทของสีจึงสามารถแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ จำนวนชั้นเคลือบสี ส่วนประกอบที่ใช้ในการแห้งตัว ประเภทชั้นเคลือบสี การใช้งาน ระดับการปล่อยสารระเหย และส่วนประกอบของสารยึดติด

### 2.2.1.1 การจำแนกประเภทตามจำนวนชั้นเคลือบสี

- 1) Direct paint คือ สีที่ใช้ทากับวัสดุหรือพื้นผิวโดยตรง สีชนิดนี้มีความต้านทานต่อสภาพอากาศ รังสียูวี และสารประเภทต่างๆ ได้ดี อีกทั้งยังให้สีสวย ความเงาและความสวยงามตามที่ต้องการ
- 2) Monolayer paints คือ สีที่ใช้กันเป็นพื้นฐานทั่วไปจำนวน 2 ชั้น ประกอบด้วยชั้นสีด้านบนและชั้นรองพื้น สีชั้นรองพื้นจะทำหน้าที่ป้องกันวัสดุจากการทำปฏิกิริยากับอากาศ ป้องกันการกัดกร่อน เพิ่มประสิทธิภาพการกัดกร่อนและปรับสภาพการยึดเกาะผิววัสดุกับสีด้านบน (Mariappan et al., 2019) สีด้านบนจะทำหน้าที่เป็นสารเคลือบที่แสดงเฉดสี ความเงา และป้องกันการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อม
- 3) Bilayer คือ ระบบสีที่มีจำนวน 3 ชั้น ประกอบด้วยชั้นรองพื้น สีด้านบนและชั้นเคลือบผิว โดยสีด้านบนจะทำหน้าที่ให้เฉดสีและสมบัติของสี และชั้นเคลือบผิวจะทำหน้าที่ให้ความเงาและป้องกันการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อม
- 4) Trilayer Paint คือ ระบบสีที่มีจำนวน 4 ชั้น ประกอบด้วยชั้นรองพื้น และสีอีก 3 ชั้นทำหน้าที่แสดงสมบัติของสี เช่น ประกายมุกหรือการเคลือบของสีที่สามารถมองเห็นเป็นอีกสีจากสภาพแสงหรือมุมที่เปลี่ยนไปได้ สีชนิดนี้มักจะใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์

### 2.2.1.2 การจำแนกประเภทตามส่วนประกอบที่ใช้ในการแห้งตัว

- 1) สี 1K หรือ สีระบบ 1 องค์ประกอบ (1-Component Paint) คือ ประกอบด้วยส่วนของตัวสีเพียงอย่างเดียว การใช้งานจะผสมกับตัวทำละลาย เช่น ทินเนอร์ สีชนิดนี้จะมีทั้งแบบแห้งเร็วและแห้งช้า สามารถแห้งตัวตามสภาพอากาศปกติที่มีความชื้น รังสีอุลตราไวโอเล็ต หรืออุณหภูมิสูงได้
- 2) สี 2K หรือ สีระบบ 2 องค์ประกอบ (2-Component Paint) คือ ประกอบด้วยส่วนของตัวสีตามองค์ประกอบที่ 1 และตัวเร่งปฏิกิริยา (Hardener หรือ Activator) โดยก่อนการใช้งานต้องนำทั้ง 2 องค์ประกอบมาผสมกันตามอัตราส่วนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี จึงจะทำให้เกิดการแข็งตัว (Chemical Drying)

### 2.2.1.3 การจำแนกประเภทจำนวนชั้นเคลือบสี

- 1) Primer คือ สีรองพื้นชั้นแรกของระบบการเคลือบสีที่ใช้บนพื้นผิว สีรองพื้นมีหน้าที่ปกป้องพื้นผิวจากกระบวนการออกซิเดชันหรือการกัดกร่อน และเพิ่มการยึดเกาะสำหรับชั้นสีที่จะทับอีกชั้น
- 2) Sealant คือ สีที่คั่นอยู่ระหว่างสีรองพื้นและสีด้านบน มีหน้าที่ปิดผนึกและแยกชั้นกับสีที่จะทับอีกชั้น
- 3) Topcoat คือ สีชั้นบนสุดของชั้นเคลือบสี มีหน้าที่ป้องกันรอยขีดข่วน รังสีอุลตราไวโอเล็ต สารเคมี ความชื้น เป็นต้น

#### 2.2.1.4 การจำแนกประเภทตามการใช้งาน

- 1) อุตสาหกรรมยานยนต์ คือ สีที่ใช้เคลือบผิวชิ้นส่วนภายนอกและภายในรถยนต์และรถจักรยานยนต์ ตัวถังและอุปกรณ์ประกอบตัวรถ เป็นต้น
- 2) อุตสาหกรรมทั่วไป คือ สีที่ใช้เคลือบผิวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า กระจกป้องกันรังสี เป็นต้น
- 3) อุตสาหกรรมการก่อสร้าง คือ สีที่ใช้สำหรับเคลือบผิววัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง ใช้สำหรับทาพื้นและผนังอาคาร เป็นต้น

#### 2.2.1.5 การจำแนกประเภทตามส่วนประกอบของสารยึดติด

สารยึดติด (Resin) หรือ (Binder) สามารถจำแนกประเภทตามส่วนประกอบที่มีผลต่อการแสดงสมบัติด้านต่างๆ ของสี

- 1) อีพ็อกซี (Epoxy) คือ สารจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยมีส่วนประกอบของเรซินที่ช่วยทำปฏิกิริยาแข็งตัว มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงทนทานต่อสารเคมี กรด ด่าง สารซักฟอก แต่ไม่ทนต่อแสงยูวีจากแสงแดด จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเป็นฝุ่นผง จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับงานภายนอกที่สัมผัสกับแสงแดดหรือความร้อนโดยตรง นิยมใช้กับพื้น การเคลือบสีกระจก ซีเมนต์กันซึมงานเหล็ก ท่อ ถังน้ำ งานทางทะเล งานที่เกี่ยวข้องกับน้ำมันและแก๊ส อุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น
- 2) โพลียูรีเทน (Polyurethane) คือ โพลีเมอร์ที่มาจากการทำปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์สองชนิดด้วยปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือ ไอโซไซยาเนต (Isocyanate) และกลุ่มไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ (Hydroxyl Alcohol) โพลียูรีเทนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและสารเติมแต่ง (Additive) ที่เติมเข้าไป มีคุณสมบัติทนต่อแรง มีความยืดหยุ่น ทนต่อสารเคมี ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อสภาวะอากาศภายนอกและรังสียูวี มีความเงา สามารถใช้กับงานเหล็ก คอนกรีต ไม้ พลาสติก เป็นต้น นิยมใช้กับงานด้านสถาปัตยกรรม งานอุตสาหกรรมยานยนต์ งานอุตสาหกรรม และป้องกันการกัดกร่อนชิ้นส่วนใกล้ทะเล เป็นต้น
- 3) อะคริลิก (Acrylic) คือ เรซินที่มีคุณสมบัติเด่นด้านสีสรร ความเงา เหมาะกับการใช้งานภายนอกและทนต่อรังสียูวี นิยมใช้กับพื้นอุตสาหกรรม ม้วนเหล็กเคลือบสี เฟอร์นิเจอร์เหล็ก เครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมยานยนต์
- 4) อัลคิเดอ (Alkyd) คือ เรซินที่มีคุณสมบัติการยึดติดที่ดี มีความยืดหยุ่น ทนทานต่อการกัดกร่อน เหมาะกับการทาสีงานไม้ งานโลหะหรือพลาสติก ไม่เหมาะกับงานปูน นิยมใช้กับงานก่อสร้าง งานเฟอร์นิเจอร์ งานอุตสาหกรรมยานยนต์ ม้วนเหล็กเคลือบสี

- 5) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) คือ เรซินที่มีคุณสมบัติทนต่อรังสียูวี และทนการเปลี่ยนแปลงของสภาพลมฟ้าอากาศได้ดี มีความแข็งแรง ทนกรดและสารละลาย ทนต่อการขีดข่วน และความเงาอยู่คงทน

### 2.2.2 องค์ประกอบระบบสีและสารเคลือบผิว

สีมีหน้าที่หลักเพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากสภาวะแวดล้อมและเพื่อตกแต่งให้เกิดสีสันและมีความสวยงาม สีจะมีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ชนิด คือ

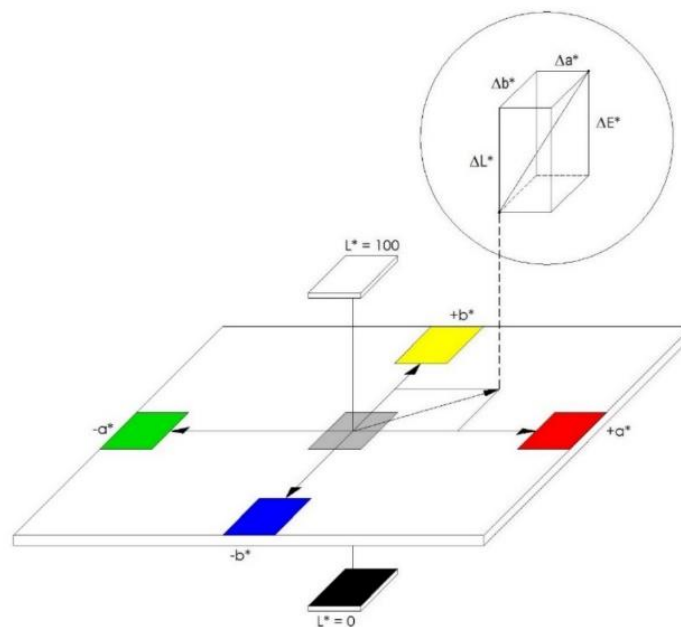
- 1) ผงสี (Pigment) เป็นสารทำหน้าที่ในการปกปิดพื้นผิว และทำให้เกิดเฉดสีต่างๆ ผงสีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ
  - ผงสีจากสารอนินทรีย์ (Inorganic Pigment) คือ เม็ดสีที่ได้จากสารอนินทรีย์ เช่น สีนแร่ มีความคงทนต่อรังสียูวีและสารเคมีได้ดี ให้เฉดสีไม่สด
  - ผงสีจากสารอินทรีย์ (Organic Pigment) คือ เม็ดสีที่ได้จากการสกัดผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม มีความคงทนต่อรังสียูวีและสารเคมีได้ไม่ดี ให้เฉดสีสด ราคาถูก
- 2) ตัวทำละลาย (Solvent) มีหน้าที่ทำละลายผงสีและสารยึดติดให้อยู่ในรูปของเหลวและกระจายตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และทำหน้าที่เจือจางหรือปรับความข้นเหลวของสีเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- 3) สารยึดติด เป็นสารชั้นเหนียวโปร่งใส ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะของส่วนประกอบอื่นๆ ของสี ใช้ในการยึดเกาะสีกับพื้นผิววัสดุที่เคลือบ สารยึดติดจะแสดงสมบัติในการเพิ่มการยึดเกาะ ความแข็งแรง และความคงทนให้กับระบบสี
- 4) สารเติมแต่ง (Additive) เป็นสารที่เติมเข้าไปในระบบสีเพื่อให้สีมีสมบัติที่ดีขึ้นหรือลดข้อด้อยบางประการขอสีตามความต้องการ เช่น สารปรับแต่งให้ผิวเรียบขึ้น สารป้องกันการรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ สารป้องกันการตกตะกอน เป็นต้น

### 2.2.3 การวัดสี (Hunter Associates Laboratory Inc.)

การรับรู้วัตถุที่มีสีของมนุษย์จากการมองเห็นมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป แหล่งกำเนิดและผู้สังเกตการณ์สามารถเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับรู้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสีเพื่อลดความไม่เป็นกลาง องค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานสี คือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือ International Commission on Illumination มีสำนักงานใหญ่ ณ ประเทศฝรั่งเศส องค์กรนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการวิชาการและการวิจัย คือ ระบบ CIE Lab Scale โดยในระยะแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้สีแดง เขียว และน้ำเงิน แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืดและความสว่างของสีได้ ต่อมา CIE จึงได้พัฒนาเป็นระบบ X-Y-L ที่สามารถบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน ทาง CIE จึงได้พัฒนาระบบ  $L^*a^*b^*$  จนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยหน่วยสีนี้เป็นประเภทที่มีสเกลสม่ำเสมอ ระบบ  $L^*a^*b^*$  เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L จะอธิบายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่าสีขาว (+L) จนถึงความมืด (Darkness)

ค่าสีดำ (-L) แกน a จะบรรยายถึงแกนสีเขียว (-a) ไปจนถึงสีแดง (+a) และแกน b จะบรรยายถึงแกนสีน้ำเงิน (-b) ไปจนถึงสีเหลือง (+b) พื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้ (Achromatic) เมื่อค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความอึมตัวของสีก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่าง ๆ ของหน่วยสี  $L^*a^*b^*$  อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ Hunter Lab ในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นอีกองค์กรหนึ่งที่ทำการศึกษาและพัฒนา ระบบการวัดสี คือ ระบบ Hunter Lab Scale โดยบรรยายแกนใน 3 มิติเช่นเดียวกับระบบ CIE ทั้งนี้ Hunter Lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ  $L^*a^*b^*$  ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่างระบบสีของ CIE และ Hunter Lab คือ สูตรการคำนวณค่าสีที่มีพื้นฐานการคำนวณมาจากค่าระบบ X-Y-Z



ภาพที่ 2.2 L-a-b Chart ของ CIE Lab Scale

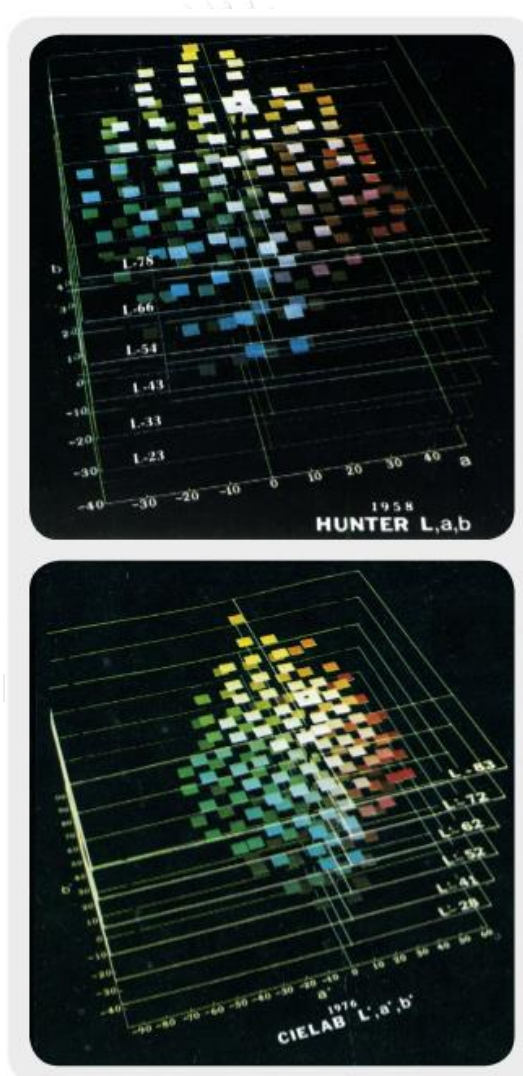
Hunter L, a, b และ CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) เป็นเครื่องเทียบสีตามทฤษฎีของสีตรงข้าม ทฤษฎีนี้ สันนิษฐานว่ามนุษย์สามารถรับรู้ถึงสีที่ตรงกันข้ามได้เมื่อมีการปรับโฟกัสที่สายตา เช่น การเปลี่ยนภาพแบบทันทีทันใด ระบบสายตาของมนุษย์จะมีการปรับระยะโฟกัสใหม่ให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนเหมือนเดิม โดยขณะที่มีการปรับโฟกัสของสายตานั้น ภาพจะถูกปรับให้เห็นชัดเจนขึ้น และในขณะเดียวกันการโฟกัสย้อนขึ้นย้อนลงของสายตามนุษย์เพื่อหาจุดโฟกัสที่ชัดที่สุดจะมีช่วงที่สายตาโฟกัสย้อนหลังกลับไป ทำให้เราสามารถมองเห็นสีที่ตรงกันข้ามได้



CIE ได้กำหนดหน่วยวัดสีที่มีสัญลักษณ์  $L^*a^*b^*$  โดยทั้ง 3 ตัวแปรมีรายละเอียดดังนี้

- 1) แกน L คือ ความมืด มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 50 และความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 51 ถึง 100
- 2) แกน a คือ แกนสีจากสีเขียว (-a) จนถึงสีแดง (+a)
- 3) แกน b คือ แกนสีจากสีน้ำเงิน (-b) จนถึงสีเหลือง (+b)

ดังนั้นค่า L สำหรับแต่ละแกนจะแสดงระดับของความมืดหรือความสว่าง ค่า a สีแดงหรือสีเขียวและค่า b สีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ค่าทั้งสามนี้จำเป็นต้องใช้เพื่ออธิบายสีของวัตถุ ค่าทั้งสามนี้จะต้องอธิบายสีของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ การแสดงค่า 3 มิติ พื้นที่สี (Color space) ของ L, a, b จะแสดงตามรูปภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบการแสดงค่า 3 มิติ ของ Hunter L, a, b และ CIE  $L^*a^*b^*$

ที่มา: (Hunter Associates Laboratory Inc.)

## 2.2.4 เครื่องมือวัดสี

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่าเครื่อง Spectrophotometer ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นค่าตัวเลขได้ วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อเกิดการสะท้อนแสงของสีออกมาจะมีความยาวคลื่นต่างกัน การวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงจาก Reflectance Curve โดยที่วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี Reflectance Curve ต่างกัน

- สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร
- สีเขียว มีความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร
- สีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร

ระบบการวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer มีอยู่หลายระบบด้วยกัน คือ ระบบ Munsell ระบบ Tristimulus Value ระบบ Chromaticity Coordinate และระบบ CIE L\*a\*b\*

- 1) ระบบ Tristimulus Value คือ ระบบการวัดสีที่สามารถหาค่าได้ออกมาเป็น X, Y, Z โดยค่านี้อาจระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างกันของสีที่มองเห็น
- 2) ระบบ Chromaticity Coordinate คือ วิธีการที่สามารถระบุความหมายของสีได้ชัดเจนขึ้น โดยค่าที่ได้ตามสมการ ดังนี้

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (3)$$

โดยที่ค่า x และ y เป็นค่าที่ระบุความเป็นสี ส่วนความสว่างของสีเป็นค่า Y แต่วิธีการวัดสีวิธีการนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบอกค่าความแตกต่างของสีได้ดี

- 3) ระบบ CIE L\*a\*b\* เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ Color Space

ในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.2 จะพบว่าตำแหน่งใน Space นั้น เป็น L\*a\*b\* และเมื่อสีมีการเปลี่ยนแปลงไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น L\*a\*b\* ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space โดยจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีตามสมการดังนี้

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (4)$$

### 2.3 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

การทดสอบด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ เป็นวิธีการทดสอบแบบเร่งให้เกิดผลเพื่อเป็นการประเมินความสามารถในด้านความคงทนต่อการกัดกร่อนของวัสดุเปรียบเทียบกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมจริง การทดสอบจะจำลองสภาวะการใช้งานเสมือนในภาคสนามมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ วิธีการนี้นักวิทยาศาสตร์จะได้ผลลัพธ์จากการพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ใหม่ในระยะเวลาอันสั้น

การทดสอบละอองน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางเพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินความเหมาะสม หรือระดับของการป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุและผิวเคลือบ การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นกับวัสดุ เช่น สนิมขาว สนิมแดงที่เกิดออกซิเดชันกับวัสดุ หรือลักษณะการลอก การพองตัวหรือการเกิดฝุ่นผงของสีเคลือบ อาจมีการทำรอยกรีดกากบาท (X-Cut) กลางแผ่นเพื่อประเมินการเกิดของสนิมจากรอยกรีด หรือการกรีดผิวขึ้นตัวอย่างวัสดุเป็นร่างแห (Crosshatch) กรณีนี้ใช้ประเมินการยึดติดของสีโดยใช้เทปกาชชนิด Cellophane ติดทับรอยกรีดแล้วดึงลอกเพื่อดูการยึดติดของสีว่ายังคงเกาะแน่นกับพื้นผิวของตัวอย่างหรือไม่ การทดสอบโดยทั่วไปจะใช้ทดสอบกับโลหะเป็นส่วนใหญ่ หรือวัสดุจำพวกเซรามิกและโพลีเมอร์ทั้งในสภาวะแวดล้อมปกติกับสภาพแวดล้อมใกล้เคียงที่มีการกัดกร่อนสูง ระยะเวลาการทดสอบขึ้นอยู่กับข้อมูลจำเพาะหรือความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารเคลือบผิวบนวัสดุแต่ละชนิด การทดสอบละอองน้ำเกลือเป็นการทดสอบการกัดกร่อนที่แพร่หลายและยาวนานที่สุด โดยที่ ASTM B117 ถือเป็นมาตรฐานการทดสอบที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลและมีการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี 1939 นอกจากนั้นยังมีมาตรฐานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ISO9227 ASTM G85 และ JIS Z 2371

การทดสอบละอองน้ำเกลือได้นำมาใช้กับงานหลายประเภท เช่น

- 1) ความคงทนต่อการกัดกร่อนของโลหะหรือพื้นผิวชนิดต่าง ๆ
- 2) วัดค่าแนวโน้มการกัดกร่อนที่เกิดจากรอยกรีดบนผิวโลหะหรือวัสดุเคลือบผิว
- 3) ตรวจสอบการยึดเกาะของชั้นเคลือบและการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิว
- 4) ประเมินความคงทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมใกล้เคียงที่มีความชื้น อุณหภูมิ และไอเกลือทะเลเป็นตัวเร่งสภาวะการกัดกร่อน

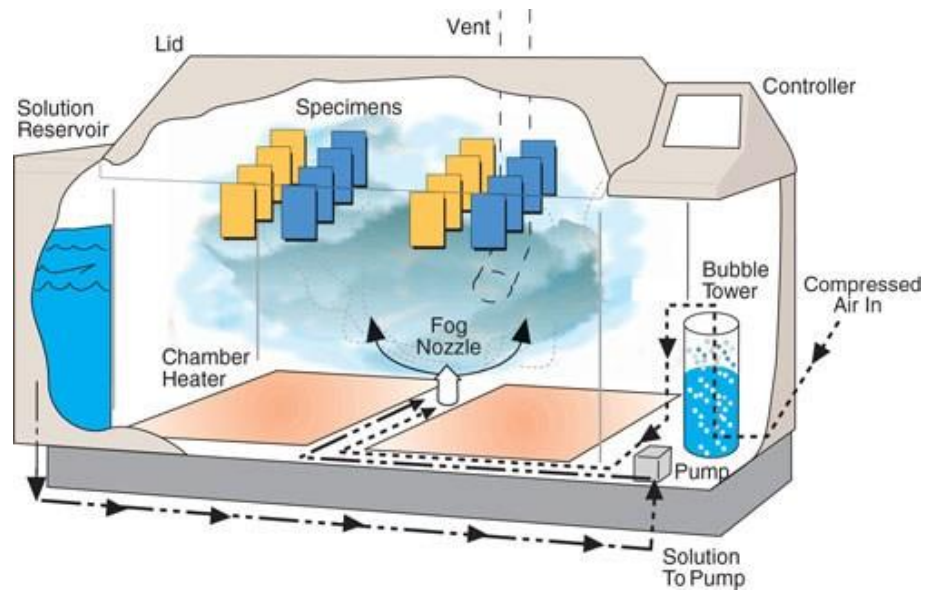
การทดสอบละอองน้ำเกลือถือเป็นวิธีที่ได้มาตรฐานและเป็นที่ยอมรับ การทดสอบนี้จึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อประเมินความคงทนต่อการกัดกร่อนของชิ้นส่วนหรือพื้นผิวสำเร็จรูปในภาคอุตสาหกรรมดังต่อไปนี้

- 1) อุตสาหกรรม
- 2) เรือเดินทะเล
- 3) ยานยนต์
- 4) อากาศยานและอุปกรณ์ทางทหาร

### 2.3.1 มาตรฐานการทดสอบ

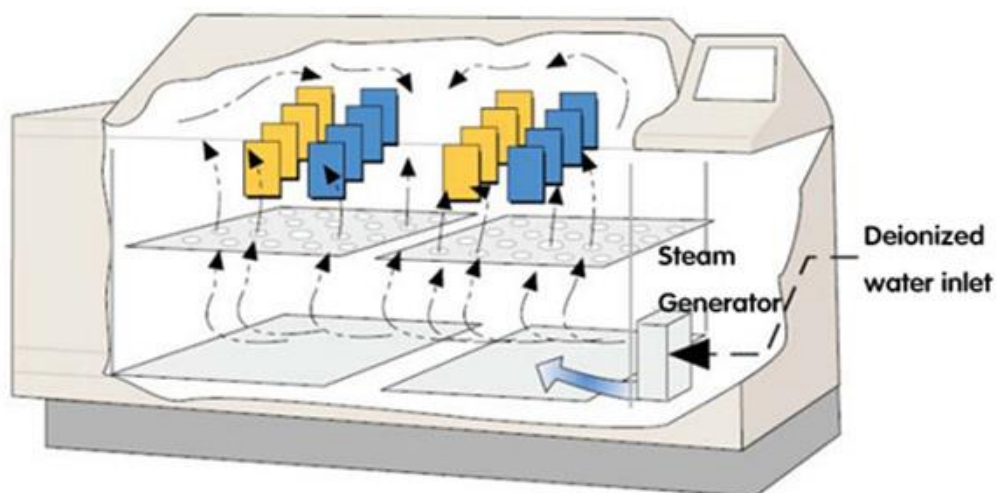
มาตรฐานการทดสอบละอองน้ำเกลือนิยมใช้กันอยู่ 3 วิธี เช่น

- 1) Salt Spray Test (SST)
- 2) Copper Chloride Acetic Acid Salt Spray Test (CASS Test)
- 3) Corrodokote Test



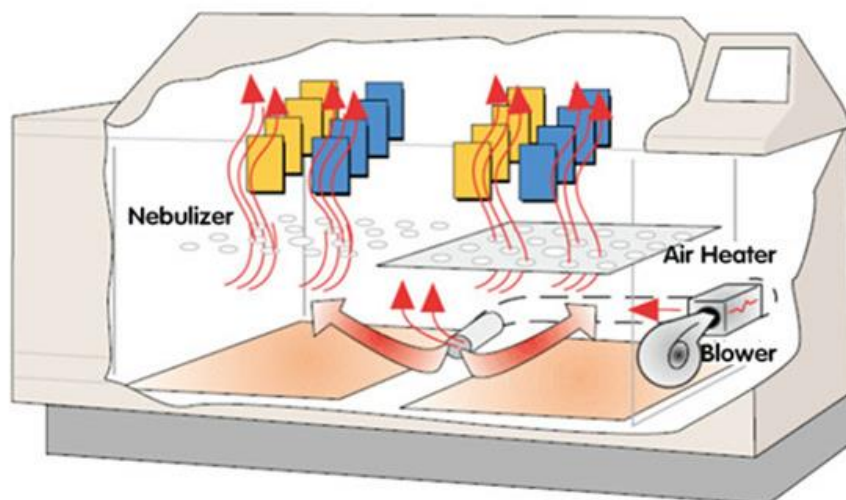
ภาพที่ 2.4 กระบวนการพ่นละอองน้ำเกลือ

ที่มา: <https://www.climatictestchambers.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562



ภาพที่ 2.5 กระบวนการสร้างความชื้น (Humidifying Process)

ที่มา: <https://www.climatictestchambers.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562



ภาพที่ 2.6 กระบวนการแห้งตัว (Drying Process)

ที่มา: <https://www.climatictestchambers.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

### 2.3.2 เครื่องมือทดสอบ

ในระหว่างการทดสอบการปนละอองน้ำเกลือ ขึ้นตัวอย่างจะถูกวางไว้ในตู้ทดสอบละอองน้ำเกลือหรือห้องที่สร้างขึ้นตามข้อกำหนด ASTM B117 และการทดสอบต้องมีการพ่นสารละลายน้ำเกลือ (5% NaCl) ที่ถูกทำให้เป็นละอองด้วยหัวฉีดและพ่นโดยใช้แรงดันอากาศอย่างต่อเนื่อง จนทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนจากไอสารละลายน้ำเกลือที่มีความหนาแน่นสูงในตู้ทดสอบหรือห้องทดสอบ วัสดุทดสอบจะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่อยู่ภายใต้สภาวะที่มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรงอยู่ตลอดระยะเวลาของการทดสอบ

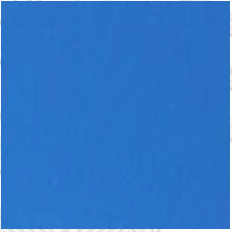
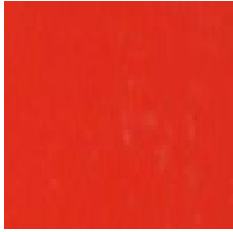


ตู้ทดสอบจะเป็นตู้มีฝาปิดทำจากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำเกลือ เช่น แผ่นพีวีซี เป็นต้น โดยภายในจะมีหอกระจายไอเกลือหรือหมอกเกลือ (Mist Tower) ทำหน้าที่พ่นละอองน้ำเกลือให้กระจายภายในตู้ทดสอบอย่างทั่วถึงเพื่อให้วัสดุทดสอบสัมผัสกับละอองน้ำเกลือ และฝาปิดตู้ทดสอบมีลักษณะเป็นทรงจั่วเพื่อป้องกันการสะสมของละอองน้ำเกลือไม่ให้หยดลงบนวัสดุตัวอย่างโดยตรง

## 2.4 การทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะ

ผลิตภัณฑ์ในยุคปัจจุบันได้ถูกออกแบบและผลิตขึ้นมาจากวัสดุชนิดใหม่อย่างหลากหลาย การเคลื่อนผิวและการเคลือบสีเป็นกระบวนการยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดจากผลกระทบของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความชื้นและความผันผวนของอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดความเสียหายในวัสดุประเภทโลหะและพอลิเมอร์ถูกสัมผัสโดยตรง โดยปกติวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นผิววัสดุจะมีผลต่ออายุการใช้งานของวัสดุ (Berdahl, Akbari, Levinson, & Miller, 2008)

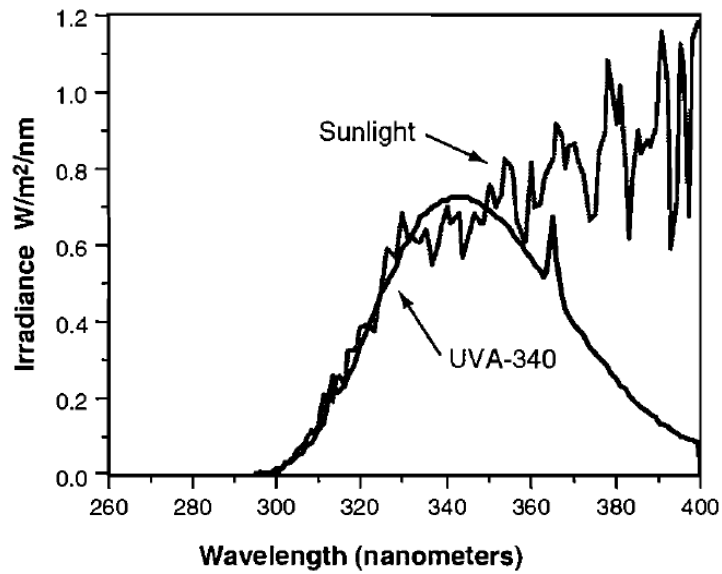
มีการทดสอบหลายวิธีที่ใช้ประเมินระยะเวลาการใช้งานของวัสดุที่ออกแบบสำหรับการใช้งานภายนอก การทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะแวดล้อม (Accelerated Weathering Test) ถูกออกแบบมาเพื่อจำลองสภาวะแวดล้อมกลางแจ้งที่สามารถสร้างความเสียหายในระยะยาวกับวัสดุที่อยู่ภายนอก การทดสอบจะอยู่ภายใต้การจำลองสภาพอากาศที่รุนแรง ประกอบไปด้วยรังสียูวี ความชื้น และความร้อน เครื่องทดสอบ QUV (Q-panel Laboratory Ultraviolet Test) จะใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์เพื่อให้รังสีสเปกตรัมซึ่งอยู่กึ่งกลางช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต การควบแน่นและอุณหภูมิจะมีการควบคุมจากเครื่องทำความร้อนเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เช่น การเกิดฝุ่นผงสี (Chalking) การลดลงของความเงา (Gloss loss) และการซีดจาง (Color change) เป็นต้น (Cocuzzi & Pilcher, 2013) หากระยะเวลาการทดสอบใช้เวลานานเพียงใด ก็จะสามารถจำลองและประเมินเวลาเปรียบเทียบการทดสอบกับสภาวะการใช้งานจริงได้มากเท่านั้น

ตารางที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของสีหลังการทดสอบ 2,000 ชั่วโมง

	ตัวอย่างสีน้ำเงิน	ตัวอย่างสีแดง
ก่อนทำการทดสอบ		
หลังทำการทดสอบ 2,000 ชั่วโมง		

ประเภทการทดสอบ QUV จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

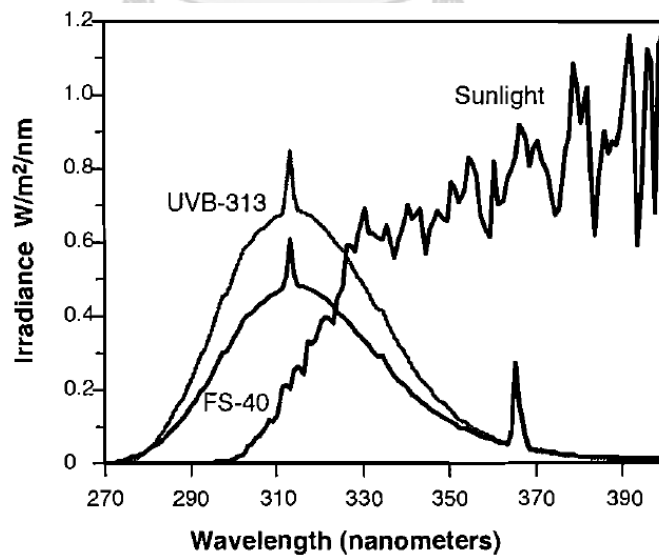
- 1) QUV A คือ การจำลองผลกระทบของแสงแดดจริงด้วยหลอด UVA-340 ซึ่งเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ การจำลองจะให้แสงช่วงความยาวคลื่นสั้นตั้งแต่ 295 ถึง 365 นาโนเมตร หลอดไฟชนิดนี้สามารถใช้กับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G154 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบชั้นเคลือบผิวของวัสดุ



ภาพที่ 2.7 ความยาวคลื่นหลอด UVA-340

ที่มา: (Cocuzzi & Pilcher, 2013)

- 2) QUV B คือ การทดสอบแบบเร่งสภาวะโดยใช้หลอด UVB-313 ซึ่งสามารถปล่อยแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นสั้นอื่นๆ ที่พบบนผิวโลกได้ที่สามารถให้ผลการทดสอบที่ผิดปกติจากธรรมชาติ แสง UVB สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่จะเกิดขึ้นกับผิววัสดุภายใต้สภาวะไม่ปกติเหมือนสัมผัสกับแสงแดดตามธรรมชาติ การทดสอบนี้รุนแรงกว่าการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง

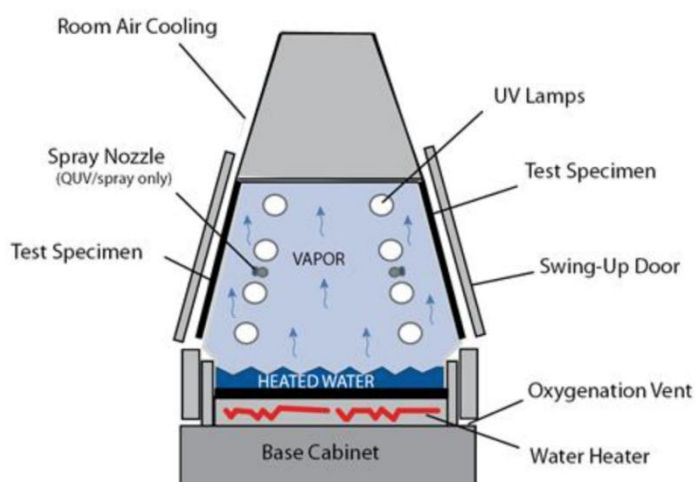


ภาพที่ 2.8 ความยาวคลื่นหลอด UVA-313

ที่มา: (Cocuzzi & Pilcher, 2013)



ในทางปฏิบัติการทดสอบวัสดุด้วยวิธีการเร่งสภาวะแวดล้อมมีความสัมพันธ์สอดคล้องค่อนข้างน้อยกับการทดสอบในสภาวะอากาศที่เกิดขึ้นจริง (Berdahl et al., 2008) และไม่สามารถนำผลการทดสอบมาคาดคะเนประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของวัสดุในระยะยาวอย่างแม่นยำได้ แต่การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในระยะยาวกับวัสดุอย่างรุนแรงได้หลากหลายรูปแบบ (Zhang et al., 2013)



ภาพที่ 2.9 เครื่องทดสอบ QUV แบบวิธีการเร่งสภาวะ

ที่มา: <https://www.impact-solutions.co.uk> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

## 2.5 รังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อวัสดุ

ความร้อนจากดวงอาทิตย์เป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญที่ทำให้อาคารร้อนขึ้นจากพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านทางเปลือกอาคาร กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) และการระเหย (Evaporation) การออกแบบเพื่อป้องกันหรือลดความร้อนผ่านเปลือกอาคารมีหลายวิธีการ เช่น การใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการนำความร้อน การใช้ช่องเปิดอาคารเพื่อเพิ่มการพาความร้อนออกจากตัวอาคาร การเลือกใช้วัสดุที่มีผิวมันวาวหรือสีอ่อนเพื่อลดการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ หรือการเลือกใช้วัสดุที่มีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงจะช่วยเพิ่มการป้องกันการแผ่รังสีความร้อนสู่ตัวอาคาร และยังช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารอย่างมีประสิทธิภาพได้อีกด้วย (Ichinose, Inoue, & Sakamoto, 2009)

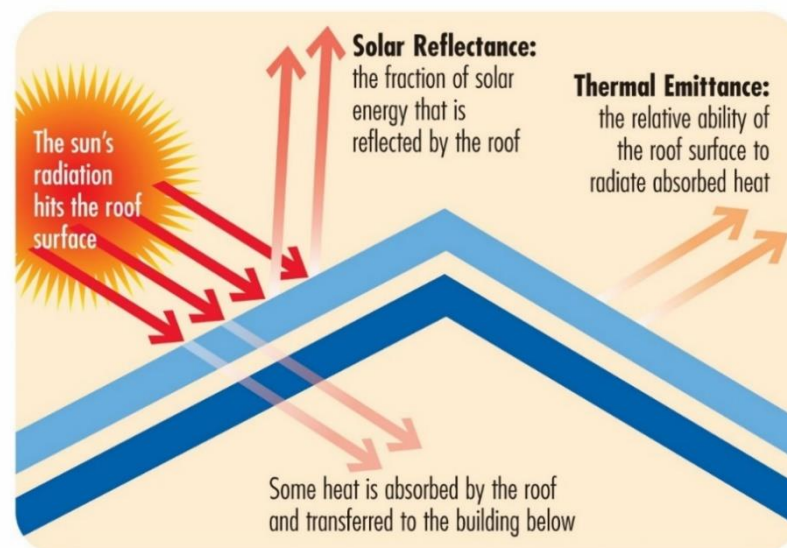
### 2.5.1 การสะท้อนรังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์มีลักษณะเป็นรังสีคลื่นยาวและมีพลังงานต่ำ เมื่อเกิดการกระทบวัสดุใดๆ แล้วจะมีการสะท้อนบนผิววัสดุ จากนั้นจะมีการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีไว้ในวัสดุนั้นๆ ผลรวมของการสะท้อนการส่งผ่าน และการดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะเท่ากับร้อยละ 100 ของพลังงานที่ตกกระทบลงมายังบนวัสดุทึบตัน (Opaque) (พงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์, 2554) กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้



- 1) การสะท้อนรังสี (Reflectivity) คือ การสะท้อนบนพื้นผิวของวัสดุ วัสดุสีอ่อนจะมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าวัสดุสีเข้ม และวัสดุโลหะผิวมันวาวจะมีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ออกไปได้มากกว่าการดูดกลืนที่ผิว วัสดุที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงจะมีค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ต่ำ การสะท้อนบนพื้นผิวแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ การสะท้อนแสงที่สมบูรณ์หรือแสงจ้า (Specular Reflection) และการสะท้อนแสงที่ไม่สมบูรณ์หรือแสงพร่า (Diffuse Reflection)
- 2) การส่งผ่านรังสี (Transmissivity) วัสดุโปร่งใส (Transparent) หรือโปร่งแสง (Translucent) การเลือกใช้วัสดุทั้งสองชนิดนี้ควรคำนึงถึงค่าส่งผ่านรังสีความร้อนและปริมาณการใช้งาน เนื่องจากมีผลต่อการส่งผ่านความร้อนเข้ามาสู่ตัวอาคารสูง
- 3) การดูดกลืนรังสี (Absorptivity) วัสดุมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานความร้อนของผิววัสดุ วัสดุสีอ่อนจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้น้อยกว่าวัสดุสีเข้ม

การสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance) คือ ส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิววัสดุและเกิดการสะท้อน ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า 0 บ่งบอกถึงการดูดกลืนพลังงานจากรังสีอาทิตย์ของวัสดุ ส่วนค่า 1 บ่งบอกถึงค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์



ภาพที่ 2.10 การสะท้อนรังสีอาทิตย์และการคายความร้อนของหลังคา

ที่มา: <https://coolroofs.org> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

ค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance Index) หรือ SRI เป็นการวัดค่าความสามารถการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance) บนวัสดุและการคายความร้อน (Emissivity) ของวัสดุ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานบนวัสดุผิวสีดำ คือ 0 (ค่าการสะท้อนเท่ากับ 0.05 และค่าการคายความร้อนเท่ากับ 0.90) และวัสดุผิวสีขาว คือ 100 (ค่าการสะท้อนเท่ากับ 0.80 และค่าการคายความร้อนเท่ากับ 0.90) (The US Department of

Energy) วัสดุที่มีค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำจะมีอุณหภูมิสูงเมื่อได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในทางกลับกันวัสดุที่มีค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า

ค่าดัชนีรังสีอาทิตย์สามารถคำนวณจากความลาดชันหลังคา น้ำหนัก การสะท้อนรังสีอาทิตย์ การคายความร้อน และอายุการใช้งาน (Cool Roof Rating Council) วิธีการคำนวณตามมาตรฐาน ASTM E 1980 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces มี 2 วิธี คือ

- (1) การคำนวณจากอุณหภูมิสถานะคงที่ (The Steady-state Surface Temperature) บนผิววัสดุอ้างอิงสีดำและสีขาว เมื่อผิววัสดุได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ การนำพาความร้อนจะเท่ากับศูนย์ อุณหภูมิที่สถานะคงที่บนผิววัสดุสามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha I = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c (T_s - T_a) \quad (5)$$

หรือ

$$T_s = 309.07 + \frac{(1066.07\alpha - 31.98\varepsilon)}{(6.78\varepsilon + h_c)} - \frac{(890.94\alpha^2 + 2153.86\alpha\varepsilon)}{(6.78\varepsilon + h_c)^2} \quad (6)$$

โดยที่	$\alpha$	คือ ค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ หรือ (1 - ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์)
	$I$	คือ Solar flux หน่วย $W.m^{-2}$
	$\varepsilon$	คือ ค่าการคายความร้อน
	$\sigma$	คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzmann ( $5.66961 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ )
	$T_s$	คือ อุณหภูมิที่สถานะคงที่บนผิววัสดุ หน่วยเคลวิน
	$T_{sky}$	คือ อุณหภูมิท้องฟ้า หน่วยเคลวิน
	$h_c$	คือ Convective Coefficient หน่วย $W.m^{-2}.K^{-1}$
	$T_a$	คือ อุณหภูมิอากาศ หน่วยเคลวิน

ค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์คำนวณได้ดังนี้

$$SRI = 100 \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w} \quad (7)$$

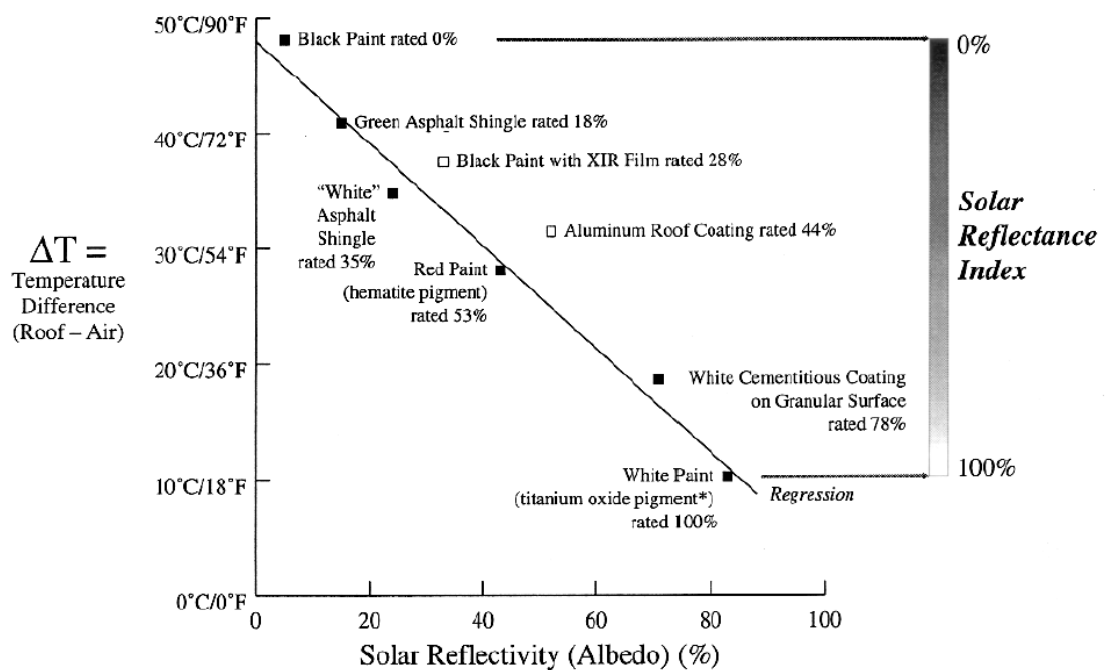
โดยที่	$T_b$	คือ ค่าอุณหภูมิสถานะคงที่บนผิววัสดุสีดำ
	$T_w$	คือ ค่าอุณหภูมิสถานะคงที่บนผิววัสดุสีขาว

- (2) การคำนวณภายใต้รังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโดยรอบ

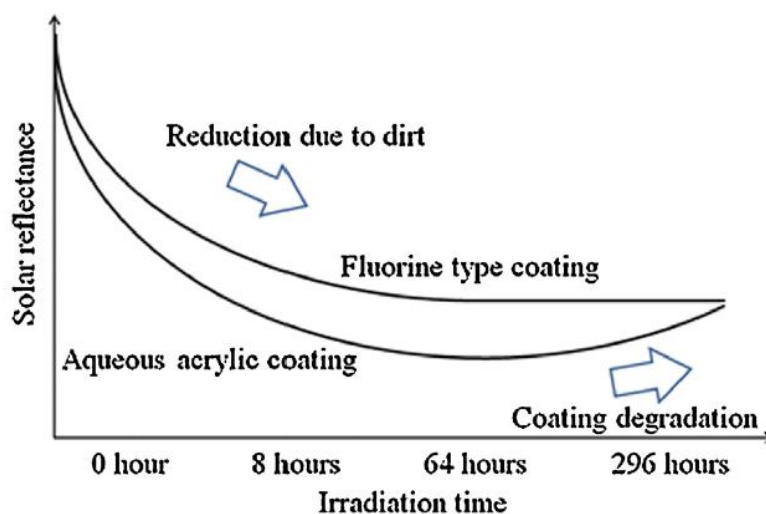
$$SRI = 123.97 - 141.35X + 9.655X^2 \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } X = \frac{(\alpha - 0.029\varepsilon)(8.797 + h_c)}{9.5205\varepsilon + h_c} \quad (9)$$

การเลือกใช้วัสดุที่มีค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูง สามารถลดอัตราการรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ทางอ้อมสู่ตัวอาคารได้ เช่น การเลือกใช้แผ่นหลังคาโลหะรีดลอนเคลือบสีที่มีค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายใต้สภาวะที่มีแดดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นหลังคาโลหะที่ไม่เคลือบ หรือเลือกใช้วัสดุสีอ่อนจะมีสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดีกว่าสีเข้ม เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 อุณหภูมิบนผิววัสดุที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน  
ที่มา: (Akbari, Berdahl, & Levinson, 1996)



ภาพที่ 2.12 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงจากการสะสมคราบฝุ่นและความเสื่อมสภาพผิว  
ที่มา: (Takebayashi et al., 2016)

ค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีโอกาสที่จะมีค่าลดลง ดังภาพที่ 2.12 เนื่องจากผิววัสดุที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานานจนทำให้ส่วนประกอบทางเคมีและกายภาพของผิวเคลือบเปลี่ยนไป (Zhang et al., 2013) เป็นสาเหตุทำให้เกิดฝุ่นขอลค์บนชั้นเคลือบสีได้ (Takebayashi et al., 2016) นอกจากนั้นการยึดเกาะของฝุ่นบนผิวเคลือบวัสดุ การสัมผัสกับอุณหภูมิหรือความร้อนที่สูง และความชื้น สามารถทำให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์บนผิววัสดุลดลงได้เช่นกัน (Ichinose et al., 2009)

นอกจากนั้นค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังมีความเกี่ยวข้องกับเกณฑ์การให้คะแนนอาคารเขียว หรือ Green Building โดยหากอ้างอิงตามระบบการให้คะแนนของ LEED หรือ Leadership in Energy and Environmental Design ที่เป็นหน่วยงานที่ได้รับความนิยมทั่วโลกแล้ว การพิจารณาคะแนนหัวข้อ Heat Island Reduction มีการระบุค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของหลังคาตามเงื่อนไขตารางที่ 2.11 โดยมีการคำนึงถึงความลาดชันหลังคาและค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการใช้งานเป็นระยะเวลา 3 ปี

ตารางที่ 2.11 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำสุดของหลังคาตามเงื่อนไข LEED

ที่มา: (U.S. Green Building Council, 2018)

Roof type	Slope	Initial SRI	3-year aged SRI
Low-sloped roof	$\leq 2:12$	82	64
Steep-slope roof	$\geq 2:12$	39	32

## 2.5.2 การคายรังสี

การคายรังสี (Emissivity) แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการปล่อยรังสีคลื่นยาวของพื้นผิว วัสดุโลหะผิวมันวาวจะมีการคายรังสีต่ำกว่าวัสดุผิวหยาบ การคายความร้อน (Thermal Emittance) คือ การแสดงสมบัติของผิววัสดุในการแผ่รังสีความร้อนออกจากวัสดุ ปริมาณที่ใช้ในการวัดค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า 0 บ่งบอกถึงการสะท้อนที่ดี ส่วนค่า 1 บ่งบอกถึงการคายความร้อนที่ดี วัสดุส่วนใหญ่จะมีค่าการคายความร้อนอยู่ช่วงนี้ วัสดุที่มีลักษณะทึบแสงและแผ่รังสีความร้อนสูงจะมีสมบัติการคายความร้อนที่ดี

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.6.1 Long-term performance of high-reflectivity exterior panels โดย Masayuki Ichinose, Takashi Inoue และ Yoshihito Sakamoto

การวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบต่อความเสื่อมของสีและการสะท้อนแสงที่ลดลงบนพื้นผิววัสดุ ภายหลังจากทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นการประเมินด้านคุณภาพของประสิทธิภาพสีที่นำมาใช้เคลือบวัสดุ การศึกษาจะคำนึงถึงวิธีการบำรุงรักษาประสิทธิภาพการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีให้สามารถใช้งานได้ยาวนานด้วยวิธีการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากตัวอย่าง 2 กลุ่มที่มีการเคลือบสีตามกระบวนการผลิตปกติและอีกกลุ่มที่มีการเคลือบสีที่มีค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นร่วมกับสารโฟโตคาตาไลสต์ที่เป็นทำให้เกิดปฏิกิริยาด้วยแสง ทั้งนี้พอลิเมอร์ที่ใช้ในประกอบกับการเคลือบสีเป็นระบบโพลีเอสเตอร์ และแบ่งตัวอย่างทดสอบเป็น 4 ชนิด ประกอบด้วยสีขาว สีเบจ สีเทา และสีดำ มีการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงในระยะยาวและวิธีการเร่งสภาวะด้วยเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของสีบนแผ่นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมในสภาวะอากาศจริงมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการใช้งานที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมจากทั้งฝนตกและแสงอาทิตย์ รวมถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนทางอากาศ เมื่อระยะเวลาการใช้งานหรือการทดสอบมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการสะท้อนลดลง ทั้งนี้สีขาวจะเป็นสีที่มีค่าการสะท้อนสูงสุด ตามด้วยสีเบจ สีเทา และสีดำตามลำดับ โดยสาเหตุหลักที่ทำให้ผิวชั้นเคลือบสีเสื่อมลงมาจากการปนเปื้อนทางอากาศ การเคลือบผิวด้วยสีที่มีการสะท้อนสูงร่วมกับโฟโตคาตาไลสต์บนพื้นผิววัสดุจะสามารถรักษาสมบัติการสะท้อนแสงได้ดี และทำให้เกิดผลกระทบจากความร้อนได้ยาวนานกว่าแผ่นเคลือบปกติ การใช้วัสดุที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนพื้นผิวสูง ถือเป็นวิธีการป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ประหยัดพลังงานจากการใช้วัสดุกับเปลือกหุ้มอาคารภายนอก

2.6.2 Effect of anti-corrosive performance, roughness and chemical composition of pre-treatment layer on the overall performance of the paint system on cold-rolled steel โดย Xiany Gao, Weihua Li และ Houyi Ma

การวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสีของสารก่อนชั้นเคลือบผิวระหว่างผิวโลหะและชั้นเคลือบสี เช่น ประสิทธิภาพความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความเรียบของผิว และส่วนประกอบของสารเคมีที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสี เนื่องจากสภาวะอากาศเป็นสาเหตุหลักทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนและชั้นเคลือบสีเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวได้ ระบบการเคลือบสีปกติจะประกอบด้วยสารเคลือบผิวและชั้นเคลือบสีภายนอก ทำหน้าที่เพื่อป้องกันโลหะจากการกัดกร่อนระหว่างกระบวนการเคลือบสี และเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างผิวเหล็กกับชั้นเคลือบสีภายนอก รวมถึงประสิทธิภาพของระบบสีโดยรวม มีการทดลองบนผิวของแผ่นเหล็กกรดเย็นกับสารเคมี 3 ชนิด คือ พอลิอะคริลิกแอซิดความเจือจางร้อยละ 50 (Polyacrylic acid, PAA) สารพอลิเมอร์ชนิดนี้มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารโมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และสารเจือปนพอลิอะคริลิกแอซิดกับโมลิบดีนัม ด้วยการนำแผ่นเหล็กกรดเย็น 2 ขนาด คือ กว้าง 10 ยาว 10 มม. 10 มิลลิเมตร และกว้าง 70 ยาว 40 มม. 1 มิลลิเมตร ไปจุ่มแช่ในสารละลายดังกล่าวเพื่อให้สารละลายเคลือบผิวเหล็ก ตรวจสอบความขรุขระและนำไปทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบพ่นละอองน้ำเกลือ แล้วทำการวัดผลการกัดกร่อนของวัสดุทดสอบด้วยวิธีการไฟฟ้าเคมี

พบว่า การตรวจสอบสมบัติของสารเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปี (Spectroscopy) บนพื้นผิวแผ่นเหล็กที่ทดสอบด้วยพอลิอะคริลิกแอซิดและสารเจือปนพอลิอะคริลิกแอซิดกับโมลิบดีนัมมีการเคลือบผิวได้อย่างเพียงพอ ประสิทธิภาพของพอลิอะคริลิกแอซิดสามารถเพิ่มปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างชั้นเคลือบสารกับชั้นเคลือบสีภายนอก ส่วนสารเจือปนระหว่างพอลิอะคริลิกแอซิดกับโมลิบดีนัมสามารถเพิ่มปฏิกิริยาทางเคมีและค่าความขรุขระ Root-mean-square ของผิวที่สามารถปรับปรุงสมบัติของระบบสีได้เช่นกัน ผลการทดสอบการรับแรงกระแทกและการพ่นละอองน้ำเกลือพบว่าตัวอย่างทดสอบมีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นหากเปรียบเทียบกับกรณีเคลือบผิว สารเจือปนระหว่างพอลิอะคริลิกแอซิดกับโมลิบดีนัมมีประสิทธิภาพดีที่สุด ส่วนพอลิอะคริลิกแอซิด และโมลิบดีนัม จะมีประสิทธิภาพลดลงตามลำดับ สรุปคือความคงทนต่อการกัดกร่อน ความขรุขระของผิววัสดุ และส่วนประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลของสารก่อนชั้นเคลือบผิวมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสี

2.6.3 Corrosion resistance of painted zinc alloy coated steels โดย Rajiv P. Edavan และ Richard Kopinski

การวิจัยนี้ศึกษาถึงชั้นเคลือบสารอินทรีย์ มีสารเคลือบโลหะที่มีสมบัติเสียสละตัวเองในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก ชั้นเคลือบผิวประกอบด้วยโลหะมากกว่า 1 ชนิด จะมีสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าโดยเฉพาะกับธุรกิจการผลิตม้วนเหล็ก โดยหลักการดังกล่าวจะอ้างอิงถึงหลักการไฟฟ้าเคมีที่สังกะสีจะทำหน้าที่เสียสละตัวเอง ร่วมกับโลหะชนิดอื่นที่ป้องกันส่วนผิวเหล็ก การทดสอบได้นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กเคลือบโลหะต่างชนิดกัน ประกอบด้วยชั้นเคลือบสังกะสี

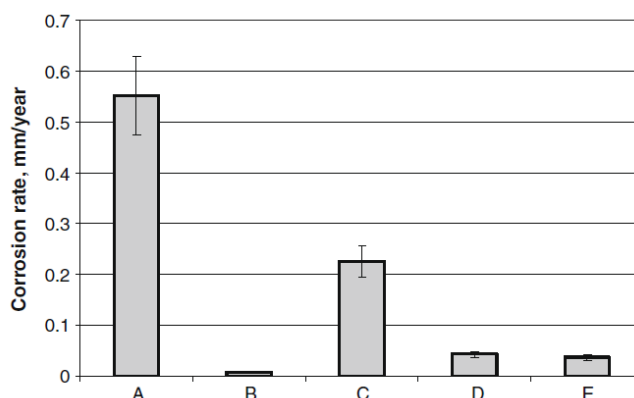
หรือ Zn, Galvalume<sup>®</sup>, Galfan<sup>®</sup>, Zam<sup>®</sup> และ SuperDyma<sup>®</sup> ที่แต่ละชนิดมีคุณลักษณะและส่วนประกอบเคลือบผิวทางโลหะวิทยาแตกต่างกันออกไป การทดสอบจะใช้แผ่นเหล็กขนาดความกว้าง 120 และความยาว 300 มิลลิเมตร ความหนาวัสดุอยู่ในช่วง 0.45-0.6 มิลลิเมตร มีการทดสอบหาปริมาณสารเคลือบโลหะทั้งสองด้าน ตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบโลหะ ทดสอบการแตกหักของผิวและการหลุดลอกของผิวโลหะด้วยการทดสอบการพับ 180 องศา รวมถึงการทดสอบด้วยแรงกระแทกกับผิววัสดุ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมและด้วยวิธีการเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการและมีการวัดผลทุก ๆ 500 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.12 ส่วนผสมชั้นเคลือบโลหะผสมโดยกรรมวิธีจุ่มร้อน

ที่มา: (Edavan & Kopinski, 2009)

Types	Metal Coating	Alloy composition, % by weight				
		Al	Pb	Si	Mg	Zn
A	Zn Coating	0.2	0.3	-	-	99.5
B	Galvalume <sup>®</sup>	55	-	1.6	-	43.4
C	Galfan <sup>®</sup>	5	-	-	0.12	94.5
D	ZAM <sup>®</sup>	6	-	-	3	91.0
E	SuperDyma <sup>®</sup>	11	-	0.2	3	85.8

ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุทั้งในสภาวะแวดล้อมจริงและแบบเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการได้ผลลัพธ์สอดคล้องกัน การเคลือบโลหะอะลูมิเนียมผสมสังกะสีมีความคงทนมากกว่าการเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 2.14 การเคลือบโลหะผสมสังกะสี-อะลูมิเนียม-แมกนีเซียม สามารถช่วยป้องกันการพองตัวชั้นเคลือบบนผิวและป้องกันการกัดกร่อนตำแหน่งขอบตัดได้ดี โดยการทดสอบแบบเร่งสภาวะ (Cyclic corrosion test) เป็นวิธีการจำลองการทดสอบเหมือนสภาวะแวดล้อมจริงได้ดีกว่าวิธีการทดสอบแบบพ่นละอองน้ำเกลือ



ภาพที่ 2.13 อัตราการกัดกร่อนแผ่นเหล็กเคลือบโลหะ โดยวิธีการ Cyclic Corrosion Test

ที่มา: (Edavan & Kopinski, 2009)

2.6.4 Study on aging of solar reflectance of the self-cleaning high reflectance coating โดย Taizo Aoyama, Takeshi Sonoda, Yasushi Nakanishi, Junichiro Tanabe และ Hideki Takebayashi

การวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการชะล้างทำความสะอาดของระบบการเคลือบสีที่มีส่วนประกอบ 2 อย่าง คือ อะคริลิกซิลิโคน (Acrylic silicon polymer) และอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkyl silicate) ทั้งสองสารมีสมบัติในการชะล้างผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบการชะล้างผิวนั้นมีประโยชน์ต่อรูปแบบการทำความสะอาดผิวของชั้นเคลือบด้านบนสุด เพื่อให้สามารถคงประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่อง การทดสอบได้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการและอาคารจำลองภายนอกเพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบที่หลากหลาย โดยในห้องปฏิบัติการได้มีการทดสอบคราบน้ำ (Raindrops) บนผิววัสดุ การทดสอบค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์รายวันช่วงเวลา 10:00 น.-14:00 น. การวัดค่าอุณหภูมิบนพื้นผิววัสดุ รวมถึงการคำนวณการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม EnergyPlus

พบว่า การเปรียบเทียบผลการทดสอบคราบน้ำ ตัวอย่างที่มีสารช่วยการชะล้างผิวเคลือบไม่มีคราบน้ำบนพื้นผิวการทดสอบ แต่ตัวอย่างที่ไม่มีสารเคลือบพบคราบน้ำบนพื้นผิวการทดสอบ การทดสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์พบว่าตัวอย่างที่มีสารเคลือบมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงร้อยละ 5-10 ในช่วงระยะเวลาการทดสอบ 3-6 เดือน ส่วนตัวอย่างที่ไม่มีสารเคลือบมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงร้อยละ 20-23 ทั้งนี้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเกิดมาจากคราบฝุ่นที่สะสมบนผิววัสดุ โดยตัวอย่างที่มีสารเคลือบสามารถชะล้างคราบฝุ่นให้ผิวสะอาดได้ดีกว่า แต่หลังจากการทดสอบกับสภาวะจริงเป็นระยะเวลา 1 ปี 4 เดือน พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมเนื่องจากชั้นเคลือบสีเกิดปฏิกิริยาเป็นฝุ่นชอล์ก (Chalking) เกิดจากชั้นเคลือบผิวถูกทำลายและเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นสีขาว ส่งผลทำให้ค่าการสะท้อนสูงขึ้นตาม การวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวของตัวอย่างที่มีสารเคลือบจะต่ำกว่า 1-2 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับตัวอย่างแผ่นที่ไม่มีสารเคลือบ ส่วนการศึกษาการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานพบว่าอาคารที่ใช้ในการจำลองในประเทศญี่ปุ่น มาเลเซีย และประเทศไทย ล้วนมีการใช้พลังงานที่ลดลงโดยเฉพาะในมาเลเซีย และกรุงเทพมหานครที่ได้ผลลัพธ์การประหยัดพลังงานจากการใช้แผ่นหลังคาที่มีการชะล้างผิวเคลือบและมีประสิทธิภาพการสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า สภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยหลักทำให้แผ่นเหล็กเกิดการกัดกร่อน ระบบการเคลือบสีบนผิววัสดุจะประกอบด้วยสารเคลือบผิวและชั้นเคลือบสีภายนอก หากกระบวนการเคลือบสีมีประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างผิวเหล็กกับชั้นเคลือบสีที่ดี จะช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้มากขึ้น นอกจากนี้การเคลือบผิวด้วยโลหะที่มีสมบัติเสียสละตัวเองในการป้องกันการกัดกร่อนให้ของเหล็ก การเคลือบโลหะที่มีอะลูมิเนียมผสมด้วยจะมีความคงทนมากกว่าการเคลือบผิวด้วยสังกะสีเพียงอย่างเดียว จึงเป็นที่มาของการวิจัยในการศึกษาประสิทธิภาพระหว่างชั้นเคลือบสังกะสีและชั้นเคลือบโลหะผสมอะลูมิเนียมและสังกะสี พร้อมทั้งปัจจัยจำนวนชั้นเคลือบสีที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน



หากพิจารณาเรื่องการสะท้อนรังสีอาทิตย์ วัสดุผิวเคลือบสีขาวจะมีค่าการสะท้อนที่ดีกว่าสีดำ ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามสภาวะแวดล้อมอาจส่งผลต่อการเสื่อมของผิววัสดุ แสงแดดเป็นปัจจัยทำให้ค่าการสะท้อนลดลงตามระยะเวลาการใช้งาน หรือค่าการสะท้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเป็นฝุ่นซอล์ ปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร หากมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ภายหลังการใช้งานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้แล้ว จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุกับอาคารได้เป็นอย่างดี



### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาสมบัติการเคลือบสีของวัสดุด้านความคงทนต่อการกัดกร่อน และความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมของแผ่นเหล็กเคลือบสี ใช้วิธีการทดสอบแบบเร่งสภาวะและทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับประเภทชั้นเคลือบสีและความหนาชั้นเคลือบสีบนแผ่นเหล็กเคลือบโลหะเป็นสำคัญ วิธีการศึกษาและทดสอบจะอ้างอิงมาตรฐานผลิตภัณฑ์และมาตรฐานการทดสอบ ดังนี้

- 3.1.1 ประเภทการเคลือบสีบนแผ่นเหล็กโลหะ
- 3.1.2 วิธีการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือตามมาตรฐาน ASTM B117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus (ASTM International, 2011)
- 3.1.3 วิธีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM D2244 Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates (ASTM International, 2016)
- 3.1.4 ศึกษาวิธีการทดสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E903 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres (ASTM International, 2012) และการคำนวณค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E1980-11 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces (ASTM International, 2019)
- 3.1.5 มาตรฐานผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กเคลือบสีสำหรับงานก่อสร้างตามมาตรฐาน AS/NZS 2728:2013 Prefinished/prepainted Sheet Metal Products for Interior/exterior Building Application (Australian/New Zealand Standard, 2013)
- 3.1.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.2753-2559) เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)
- 3.1.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.2131-2545) เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2545)

### 3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

#### 3.2.1 ตัวแปรต้น

การกำหนดตัวแปรต้นในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ชนิดชั้นเคลือบสี ประกอบด้วย การเคลือบสีชั้นเดียว และการเคลือบสีสองชั้นซึ่งประกอบด้วยสีรองพื้นและสีด้านบน นอกจากนี้ยังมีโทนสีที่แบ่งออกเป็นสีโทนอ่อน กลาง และเข้ม

##### 3.2.1.1 ชนิดชั้นเคลือบสี

- 1) ชั้นเคลือบสีชั้นเดียว
- 2) ชั้นเคลือบสีสองชั้น

##### 3.2.1.2 โทนสี

- 1) สีโทนอ่อน
- 2) สีโทนกลาง
- 3) สีโทนเข้ม

#### 3.2.2 ตัวแปรตาม

##### 3.2.2.1 ความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

- 1) ความหนาแน่นการพองตัวของสี (Rating for Density of Blistering)
- 2) ขนาดการพองตัวของสี (Rating for Size of Blister)

##### 3.2.2.2 ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

- 1) ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี ( $\Delta E$ )
- 2) ค่าสะท้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ (Solar Reflectance)

#### 3.2.3 ตัวแปรควบคุม

##### 3.2.3.1 จำนวนชั่วโมงการทดสอบ

- 1) จำนวนชั่วโมงทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ
- 2) จำนวนชั่วโมงทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

### 3.3 ขั้นตอนการวิจัย

#### 3.3.1 เตรียมแผ่นเหล็กเคลือบสี

กำหนดใช้แผ่นเหล็กเคลือบสีโพลีเอสเตอร์ ขนาดกว้าง 75 และยาว 150 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ มอก.2753-2559 โดยแบ่งออกเป็นจำนวน 3 กลุ่มตัวอย่าง แบ่งแยกด้วยจำนวนชั้นเคลือบสีและโทนสี ทั้งนี้ชั้นเคลือบสีประกอบด้วยเคลือบสีชั้นเดียวและสองชั้น และโทนสีประกอบด้วยโทนสีอ่อน สีกลาง และสีเข้ม และกรีดกากบาทด้วยมีดตัดเตอร์กลางแผ่นเหล็กเคลือบสีตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

##### 3.3.1.1 ความหนาแผ่นเหล็กเคลือบสี

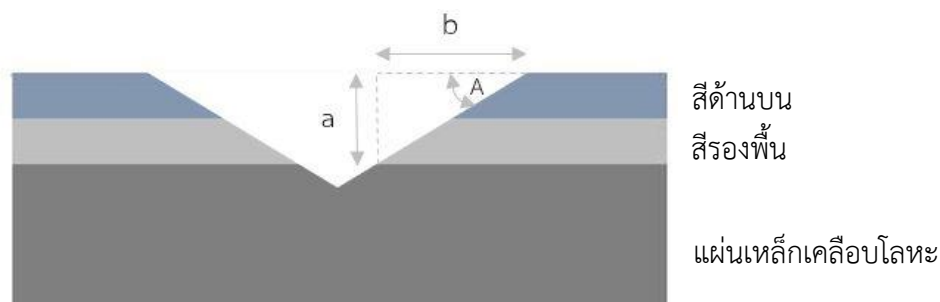
ความหนาชั้นเคลือบสีประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วน คือ ความหนาระบุ (Nominal Thickness) อ้างอิงตามข้อมูลผลิตภัณฑ์ของบริษัทฯ ผู้ผลิต และความหนาของชั้นเคลือบสีจากการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาสี (Dry Film Thickness Measurement Tool) ตามมาตรฐาน ASTM 5796 และการวัดค่าแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ สีรองพื้น (Primer) และสีด้านบน (Top Coat) การวัดความหนาของชั้นเคลือบสีแผ่นเหล็กในหน่วยไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) จะพิจารณาเฉพาะสีด้านบน โดยระบบการเคลือบสีชั้นเดียวจะมีสีด้านบนเพียงชั้นเดียว ชั้นเคลือบสีจะถัดจากชั้นเคลือบโลหะ ส่วนแผ่นเหล็กทดสอบระบบการเคลือบสีสองชั้นจะประกอบด้วยสีรองพื้นและสีด้านบน สีด้านบนจะอยู่ผิวนอกสุด ถัดจากสีรองพื้นและชั้นเคลือบโลหะตามลำดับ ความหนาสีรองพื้นและสีด้านบนเป็นความหนารวม ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการวัดจะเป็นค่าเฉลี่ยที่ทำการวัด 2 ตำแหน่งบนแผ่นเหล็กเคลือบสีที่ตัดห่างจากขอบแผ่นทั้ง 2 ด้านเข้ามาด้านละ 25 มิลลิเมตรจากขอบแผ่นที่มีหน้ากว้างมาตรฐานตามผู้ผลิตสินค้า ทั้งนี้การวัดค่าความหนาชั้นเคลือบสีจะให้หลักการของตรีโกณมิติในการคำนวณ

$$\tan A = a/b$$

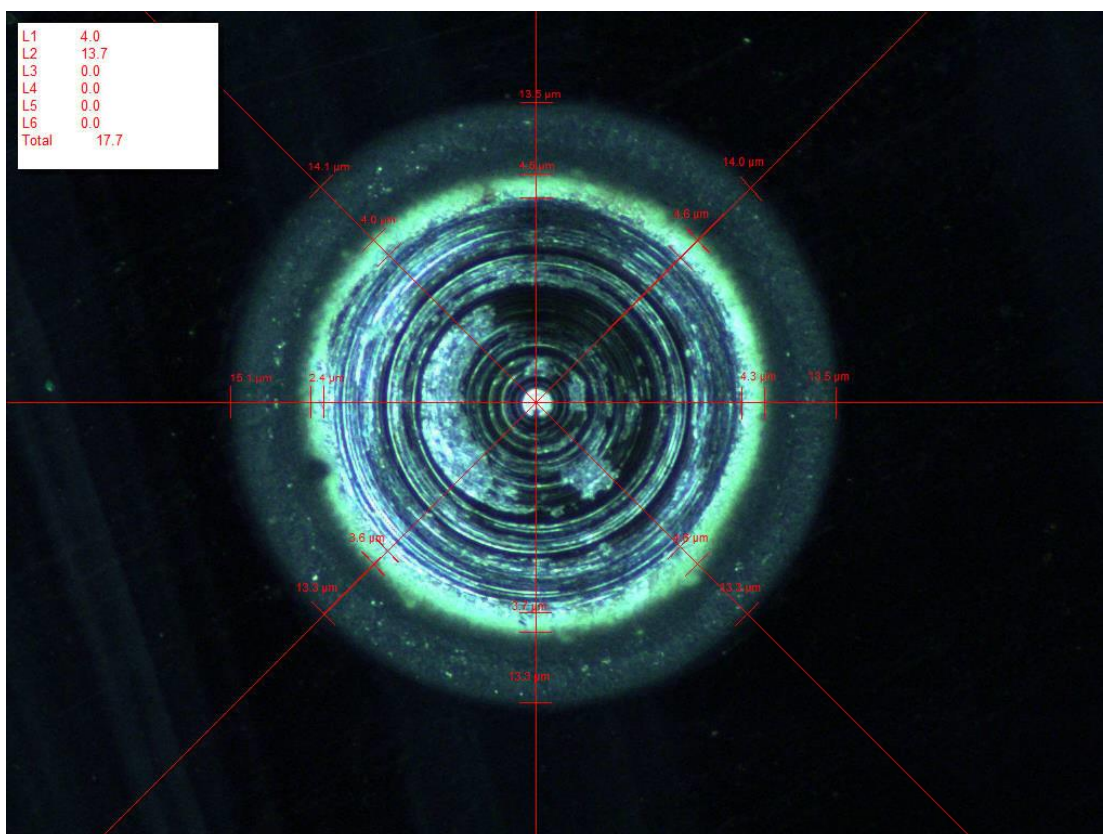
โดยที่ a คือ ความหนาชั้นเคลือบสี

b คือ รัศมีวงกลมของหลุมเจาะ

A คือ มุมเจาะ



ภาพที่ 3.1 หลักการตรีโกณมิติในการคำนวณความหนาชั้นเคลือบสี



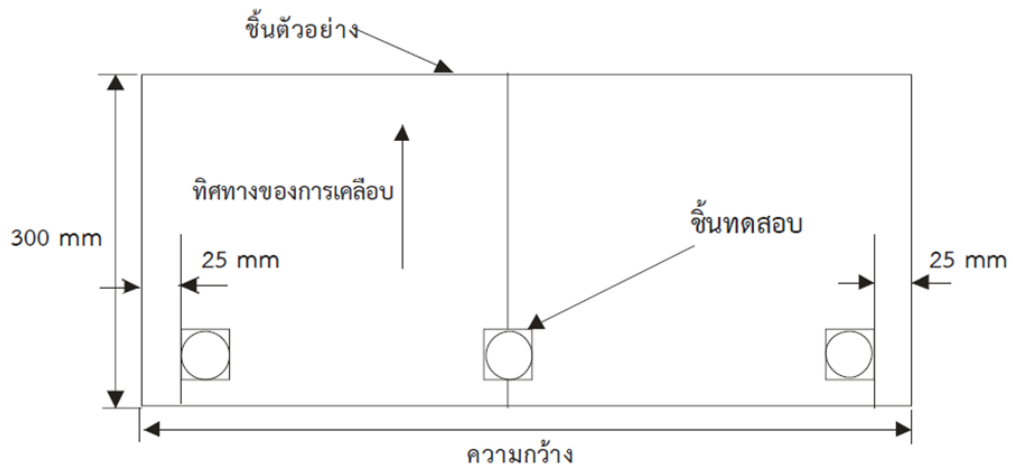
ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างการวัดความหนาชั้นเคลือบสีสองชั้นด้วยเครื่องมือวัดความหนาสี  
ที่มา: ถ่ายโดยผู้วิจัย วันที่ 9 มกราคม 2562

#### 1) ความหนาระบุ

- วิธีวัดเหล็กแผ่นเหล็กเคลือบสี (แผ่นม้วน) ให้วัดห่างจากขอบเป็นระยะไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร จากขอบด้านข้างทั้งสองโดยให้วัดอย่างน้อยขอบละ 3 จุด
- การรายงานผลให้รายงานผลทุกค่า
- ใช้เครื่องมือวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.001 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่อง DJH Dry Film Thickness ตามมาตรฐาน ASTM 5796 (ASTM International, 2020)

#### 2) ความหนาสีระบุ

- การทดสอบความหนาสีบนเหล็กแผ่นเหล็กเคลือบสีเป็นการหาค่าเฉลี่ยความหนาของสีบนชั้นทดสอบ 3 ชั้นมารวมกันแล้วหาร 3 ต้องไม่น้อยกว่า 80% ของค่าความหนาสีระบุไว้และความหนาสีของแต่ละชั้นทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 90% ของค่าเฉลี่ยความหนาสีบนชั้นทดสอบ 3 ชั้น
- การรายงานผลให้รายงานผลทุกค่าและรายงานค่าเฉลี่ยของความหนาสี
- ใช้เครื่องมือวัดที่วัดได้ละเอียดถึง 0.5 ไมครอน

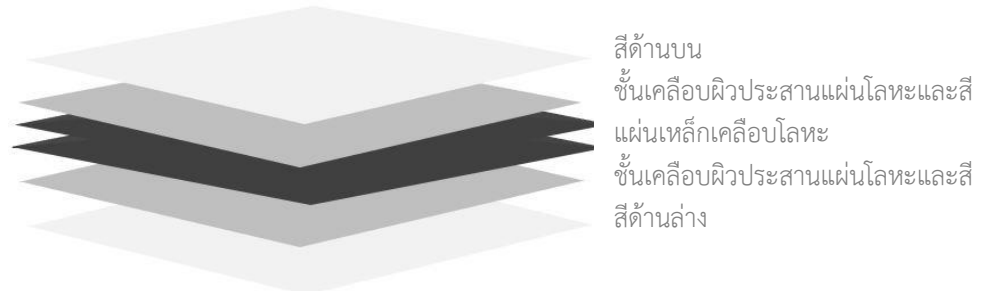


ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งการเตรียมชั้นทดสอบ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2753-2559

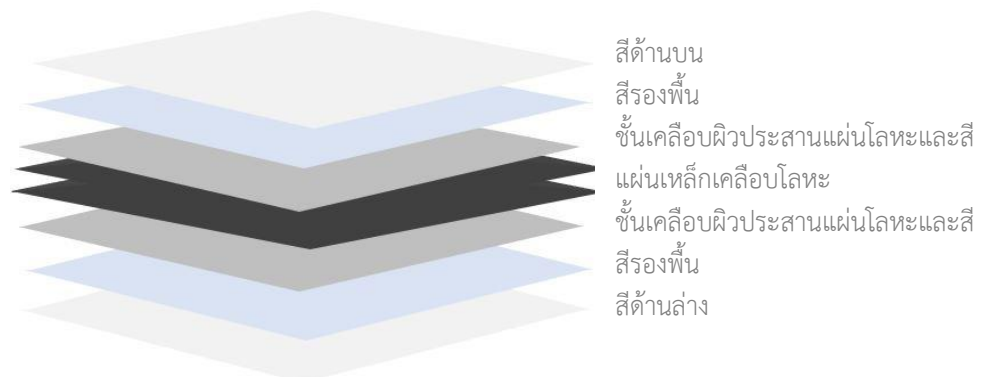
### 3.3.1.2 จำแนกชั้นเคลือบสี

#### 1) สีชั้นเดียว



ภาพที่ 3.4 ระบบการเคลือบสีชั้นเดียว

#### 2) สีสองชั้น



ภาพที่ 3.5 ระบบการเคลือบสีสองชั้น

### 3.3.1.3 จำแนกโทนสีแผ่นเหล็กเคลือบสี

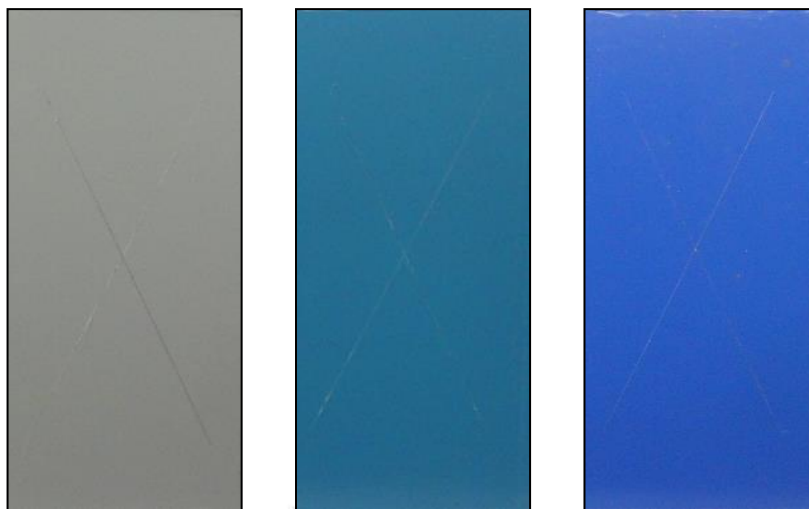
การจำแนกโทนสีด้วยวิธีการวัดค่าสีบนแผ่นเหล็กเคลือบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่แสดงออกมาในรูปของสมการ DL, Da, Db และ DE ค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดบนแผ่นทดสอบจำนวน 3 ครั้ง และจำแนกโทนสีเป็นสีโทนอ่อน สีโทนกลาง และสีโทนเข้ม จากค่า HunterLab L ตามมาตรฐาน AS/NZS 2728:2013 (Prefinished/prepainted Sheet Metal Products for Interior/exterior Building Application) ดังนี้

- 1) สีโทนอ่อน มีค่า HunterLab L มากกว่า 70
- 2) สีโทนกลาง มีค่า HunterLab L ระหว่าง 40 – 70
- 3) สีโทนเข้ม มีค่า HunterLab L น้อยกว่า 40

ทั้งนี้แผ่นทดสอบสีชั้นเดียว (Single Painted System) จะแทนด้วย S สำหรับตัวอย่าง S1 S2 และ S3 ส่วนแผ่นทดสอบสีสองชั้น (Double Painted System) จะแทนด้วย D สำหรับตัวอย่าง D1 D2 และ D3 เป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2131-2545 และ D4 D5 และ D6 เป็นแผ่นเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มอก. 2753-2559 การทดสอบประกอบด้วยความคงทนต่อการกัดกร่อน ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม และการทดสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนจะใช้อย่างกลุ่มละ 1 ตัวอย่างทดสอบ คือ S1 D2 และ D5 มาพิจารณา

ตารางที่ 3.1 ชั้นงานทดสอบ

ตัวอย่าง	1	2	3	4	5	6	7	8	9
สัญลักษณ์	S1	S2	S3	D1	D2	D3	D4	D5	D6
ชั้นเคลือบโลหะ	อะลูมิเนียม-สังกะสี			สังกะสี			อะลูมิเนียม-สังกะสี		
ระบบการเคลือบสี	สีชั้นเดียว			สีสองชั้น					
โทนสี	สีโทนอ่อน	สีโทนกลาง	สีโทนเข้ม	สีโทนอ่อน	สีโทนกลาง	สีโทนเข้ม	สีโทนอ่อน	สีโทนกลาง	สีโทนเข้ม
การทดสอบ	ความคงทนต่อการกัดกร่อน								
	ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม								
	การสะท้อนรังสีอาทิตย์								



ภาพที่ 3.6 แผ่นเหล็กเคลือบสีโพลีเอสเตอร์จำแนกตามโทนสีอ่อน กลาง เข้ม  
ที่มา: ถ่ายโดยผู้วิจัย วันที่ 9 มกราคม 2562

### 3.3.2 ทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

การทดสอบแบบการพ่นละอองน้ำเกลือ (Salt Spray) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM B117 การทดสอบมีขั้นตอนเริ่มต้นโดยการนำชิ้นงานทดสอบเข้าไปไว้ในตู้ทดสอบ ใช้สารละลายเกลือความเข้มข้น 5% ซึ่งเตรียมโดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำ แล้วเติมใส่เข้าไปในระบบตู้ทดสอบ ภายในตู้ทดสอบจะมีการปรับสภาพภายในก่อนที่จะทำการทดสอบจริง อุณหภูมิภายในประมาณ 35 องศาเซลเซียส และพ่นละอองน้ำเกลือ 5% ด้วยอัตราเฉลี่ย 12 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง การสะสมของปริมาณละอองน้ำเกลือที่พ่นในตู้ทดสอบจะควบคุมอยู่ในอัตราอย่างน้อย 80 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้กระบอกตวงภายในตู้ทดสอบวัดปริมาณ กระบอกแรกจะเก็บไว้ใกล้กับหัวฉีดพ่น และอีกกระบอกจะอยู่ห่างที่สุดจากกระบอกฉีด ชิ้นงานตัวอย่างที่วางในตู้ทดสอบจะวางทำมุม 15-30 องศากับแนวตั้ง การจัดเรียงชิ้นงานต้องทำให้ละอองน้ำเกลือเกิดการไหลเวียนได้อย่างอิสระและเกิดทั่วผิวหน้าชิ้นงานทดสอบอย่างสม่ำเสมอ และหลีกเลี่ยงการวางชิ้นงานในตำแหน่งที่หยดน้ำสามารถหยดลงบนอีกแผ่นหนึ่งได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบจะดำเนินการจนถึง 1,000 ชั่วโมง โดยเริ่มเก็บข้อมูลด้วยการถ่ายภาพและการสังเกตลักษณะการกัดกร่อน เช่น การเกิดสนิมขาว การเกิดสนิมแดง สีพอง การหลุดล่อนของชั้นเคลือบสี เป็นต้น ที่เกิดบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบที่ 250 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นทุก 250 ชั่วโมงจนครบเวลาการทดสอบตามมาตรฐานกำหนด





ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบความคงทนละอองน้ำเกลือ

ที่มา: <http://www.climate-chambers.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

#### 3.3.2.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

- 1) วัสดุทดสอบควรผ่านกระบวนการเคลือบผิวหรือชุบผิวชั้นเคลือบไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หากใช้วัสดุทดสอบที่เป็นชิ้นงานสำเร็จ ต้องตัดวัสดุทดสอบให้มีขนาดที่สามารถใส่ลงในตู้เพื่อทำการทดสอบได้
- 2) วัสดุทดสอบต้องมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นงานสำเร็จมากที่สุด ปิดขอบรอยตัดด้วยเทปกาวหรือซ่อมด้วยสีเพื่อไม่ให้มีรอยเปิดของผิวเคลือบ
- 3) การใช้วัสดุทดสอบที่เตรียมไว้โดยเฉพาะ วัสดุพื้น (Substrate) และผิวเคลือบควรเหมือนกันกับชิ้นงานสำเร็จทั้งชนิดของวัสดุพื้นและความหนาของผิวเคลือบ โดยเตรียมเป็นแผ่นเรียบกว้าง 70 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร
- 4) การใช้วัสดุทดสอบที่มีการพ่นสี มาตรฐานอาจมีการระบุให้กรีดชิ้นงานทดสอบเป็นรูปกากบาทหรือร่างแห



ภาพที่ 3.8 การทดสอบความคงทนของน้ำเกลือ

ที่มา: <https://www.imrtest.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

#### 3.3.2.2 การทดสอบวัสดุ

- 1) อุณหภูมิภายในตู้ทดสอบจะควบคุมอุณหภูมิคงที่ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการพ่นที่ 1.025-1.031 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง
- 2) การวางวัสดุทดสอบแผ่นเรียบในตู้ทดสอบให้ติดตั้งวัสดุทดสอบทำมุมเอียง 18 องศากับแนวตั้ง หันด้านที่ต้องการประเมินการทดสอบอยู่ด้านบนให้สัมผัสกับไอเกลือให้เต็มพื้นที่ผิวโดยไม่มีวัสดุอื่นบดบัง
- 3) การวางวัสดุทดสอบควรวางให้ห่างกันเรียงกันตามช่องวางวัสดุทดสอบ ไม่ควรให้วัสดุทดสอบสัมผัสกันเนื่องจากอาจเกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าหรือมีการขังของละอองน้ำเกลืออันเป็นการทำให้ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนได้
- 4) ระยะเวลาการทดสอบให้อ้างอิงตามสมบัติเฉพาะของวัสดุทดสอบหรือตามมาตรฐานกำหนด โดยระยะเวลาที่ใช้ทดสอบมักขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน หรือลักษณะผิวเคลือบ เช่น วัสดุเคลือบผิวสังกะสี หนา 5 ไมครอน มาตรฐานกำหนดให้มีการทดสอบเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง และ 120 ชั่วโมง และวัสดุทดสอบต้องไม่เกิดสนิมขาวที่เวลาทดสอบ 48 ชั่วโมง และสนิมแดงที่ 120 ชั่วโมง

### 3.3.2.3 การประเมินผลวัสดุทดสอบ

- 1) ภายหลังจากการทดสอบจนครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วให้นำวัสดุตัวอย่างออกจากตู้ทดสอบแล้วทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด
- 2) หากวัสดุทดสอบเกิดสนิมปกคลุมมากจนยากที่จะประเมินผล อาจใช้แปรงขนอ่อนขัดเบาๆ ให้คราบสนิมที่ปกคลุมอยู่หลุดออกจนเห็นลักษณะของการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบได้อย่างชัดเจน
- 3) ควรทำวัสดุทดสอบให้แห้งทันทีด้วยตู้อบหรืออุปกรณ์ที่ให้ความร้อน หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพวัสดุทดสอบและประเมินผลการทดสอบ
- 4) มาตรฐานการทดสอบของวัสดุชิ้นส่วนยานยนต์ส่วนใหญ่กำหนดเกณฑ์การรายงานผลไว้ 2 วิธี คือ
  - รายงานพื้นที่ที่เกิดสนิมและลักษณะของสนิมที่เกิดขึ้น
  - รายงานลักษณะปรากฏ เช่น หากวัสดุทดสอบเป็นผลิตภัณฑ์เคลือบสี ต้องตรวจสอบดูว่าสีนั้นยังคงสภาพดีอยู่หรือไม่ มีการหลุดร่อน บวมพอง หรือฝุ่นผง ลักษณะเหล่านี้มักเกิดจากปริมาณความชื้นที่สูงมากในเครื่องทดสอบ



ภาพที่ 3.9 สีพองหลังการทดสอบละอองน้ำเกลือ 1,000 ชั่วโมง

ที่มา: ถ่ายโดยผู้วิจัย วันที่ 9 มกราคม 2562

- 5) หากวัสดุทดสอบได้มีการกรีดรอยกากบาทไว้ต้องรายงานระยะที่สนิมลุกลามจากรอยกรีดที่มากที่สุด
- 6) หากวัสดุทดสอบได้มีการกรีดรอยแบบร่างแห เมื่อตัวอย่างแห้งสนิทแล้วให้นำเทปใสหรือเทปชนิดอื่นตามที่วิธีทดสอบระบุติดลงบนรอยกรีดแล้วดึงออกเพื่อหาค่าการยึดติดของสีหลังจากผ่านการทดสอบ

### 3.3.3 ทดสอบความคงทนต่อการสภาวะแวดล้อม

การทดสอบการเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการนี้เรียกว่า QUV Accelerated Weathering โดยเริ่มเก็บข้อมูลที่ 1,000 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นทุก 500 ชั่วโมง จนถึง 2,000 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาวัดค่าความแตกต่างของสี (Delta E) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแผ่นเหล็กเคลือบสีทดสอบกับข้อมูลสีมาตรฐาน ผลการทดสอบจะรายงานเป็นค่า DL, Da, Db และ DE และเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจากแผ่นทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ตามมาตรฐาน AS/NSZ 1530.601.2 หรือ ASTM D2244 คำนวณจากสมการดังนี้

$$DE = [(DL)^2 + (Da)^2 + (Db)^2]^{1/2}$$



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบ QUV Accelerated Weathering Tester

ที่มา: <https://www.impact-solutions.co.uk> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562



ภาพที่ 3.11 แสดงเครื่องมือทดสอบ (Spectrophotometer)

ที่มา: <https://www.perkinelmer.com> วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2562

#### 3.3.3.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

ตัดตัวอย่างแผ่นเหล็กเคลือบสีที่เป็นชั้นทดสอบตามรายการ โดยตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีขนาดกว้าง 70 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร

#### 3.3.3.2 การทดสอบและประเมินผลทดสอบวัสดุ

- 1) การทดสอบแต่ละครั้งสามารถติดตั้งวัสดุทดสอบในตู้ทดสอบได้สูงสุด 20 ชิ้นตัวอย่าง
- 2) วัสดุทดสอบที่ถูกติดตั้งในตู้ทดสอบจะอยู่ภายใต้วัฏจักรการสัมผัสด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่รุนแรง และสัมผัสความชื้นโดยการควบแน่น เช่น อุปกรณ์ที่ใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์จะมีการสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตามด้วยการควบแน่นด้วยความชื้น 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- 3) ระยะเวลาการทดสอบให้อ้างอิงตามสมบัติเฉพาะของวัสดุทดสอบหรือตามมาตรฐานกำหนด โดยระยะเวลาที่ใช้ทดสอบมักขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน หรือลักษณะผิวเคลือบ การเก็บข้อมูลวัสดุทดสอบจะเริ่มตั้งแต่ 500 ชั่วโมง 1,000 ชั่วโมง 1,500 ชั่วโมง และ 2,000 ชั่วโมง ตามลำดับ แล้วจึงนำผลการทดสอบที่เก็บข้อมูลไว้มาเปรียบเทียบกัน การเปรียบเทียบดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับความพร้อมว การส่องผ่านของแสง ดัชนีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลือง การซีดจางของสีหรือสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ส่งผลกับความคงทนของผลิตภัณฑ์

### 3.3.4 ทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

ทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กเคลือบสีแต่ละตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM E903 (Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres) และการคำนวณค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E1980-11 (Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces) แล้วทำการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ก่อนและภายหลังทำการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะ

## 3.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

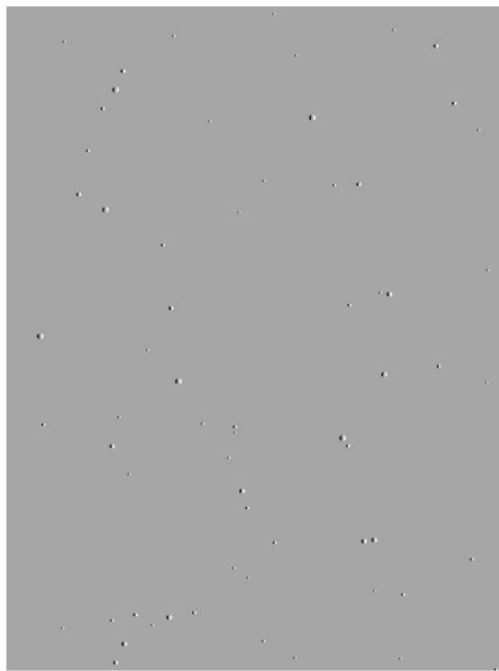
### 3.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือ

- 1) เปรียบเทียบความหนาแน่นสีฟอง
- 2) เปรียบเทียบขนาดสีฟอง

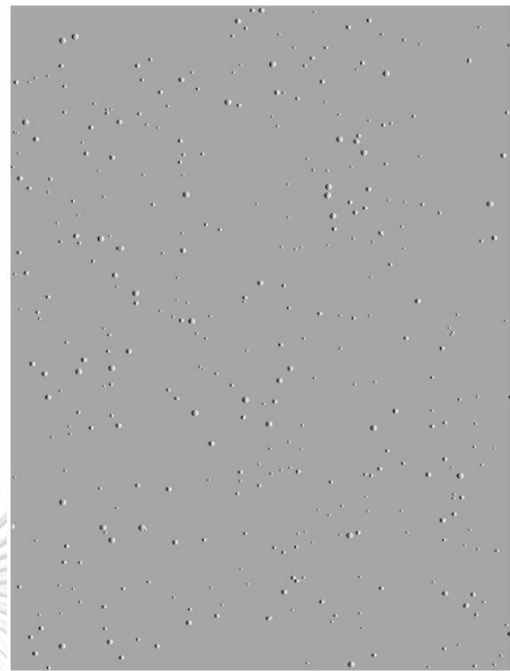
การทดสอบการพ่นละอองน้ำเกลือ (Salt Spray) เพื่อประเมินความทนทานต่อการกัดกร่อนของสี โดยเริ่มเก็บข้อมูลที่ 250 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นทุก 250 ชั่วโมง จนถึง 1,000 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาประเมินลักษณะทางกายภาพของผิวหน้าวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยสายตา ได้แก่ การเกิดสนิมและสีฟอง การวัดค่าเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ AS/NZS 1580.481.1.9 การพองตัวของสี (Blistering) ผลการทดสอบต้องมีความหนาแน่นไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับระดับ 2 และขนาดการพองตัวต้องไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับระดับ S2

ตารางที่ 3.2 ระดับความหนาแน่นและขนาดสีฟองตัว

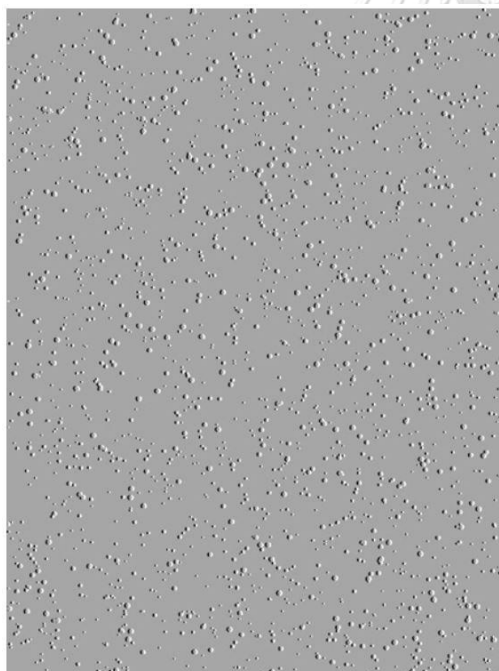
ระดับ	ความหนาแน่น	ขนาด
0	ไม่มี	-
1	น้อยมาก	ขนาดเล็กกว่ารูปภาพที่ 1
2	น้อย	รูปภาพที่ 3.12
3	ปานกลาง	รูปภาพที่ 3.13
4	หนาแน่นปานกลาง	รูปภาพที่ 3.14
5	หนาแน่นมาก	รูปภาพที่ 3.15



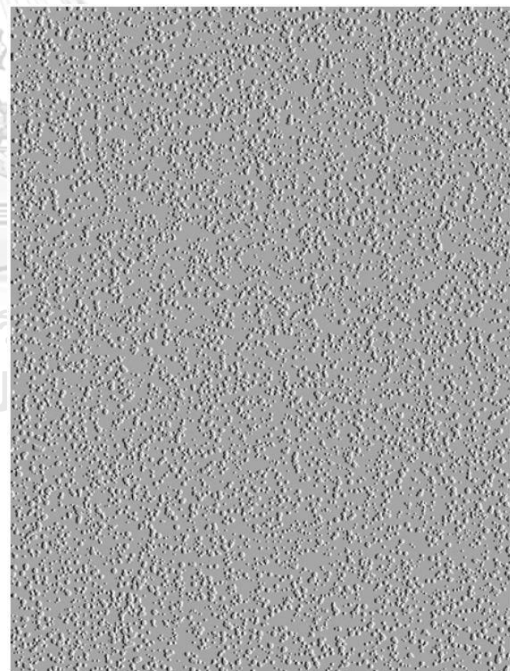
Quantity (density) 2 – 2(S2)



Quantity (density) 3 – 3(S2)



Quantity (density) 4 – 4(S2)

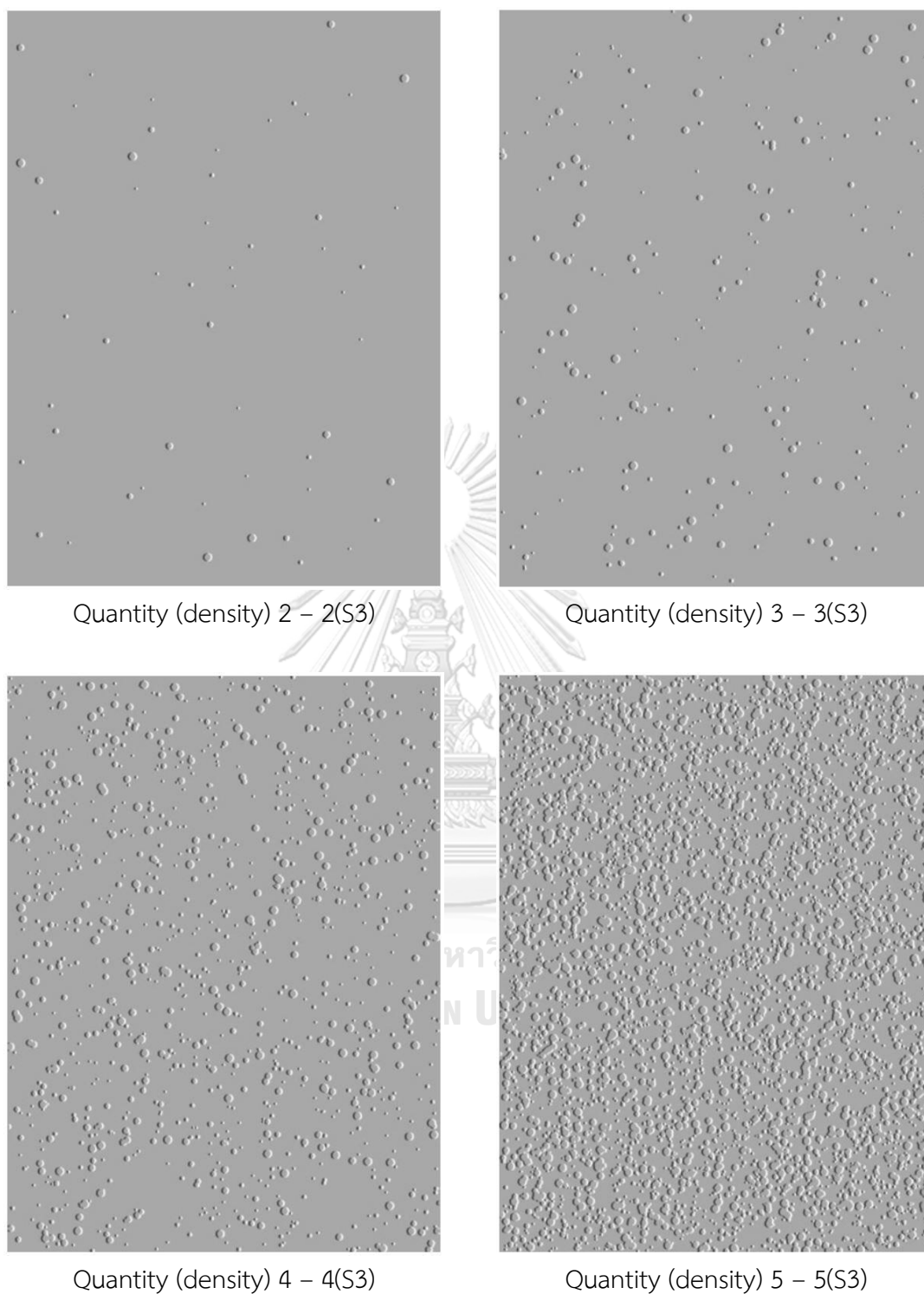


Quantity (density) 5 – 5(S2)

ภาพที่ 3.12 สีพองระดับ 2

ที่มา: (Australian/New Zealand Standard, 1998)

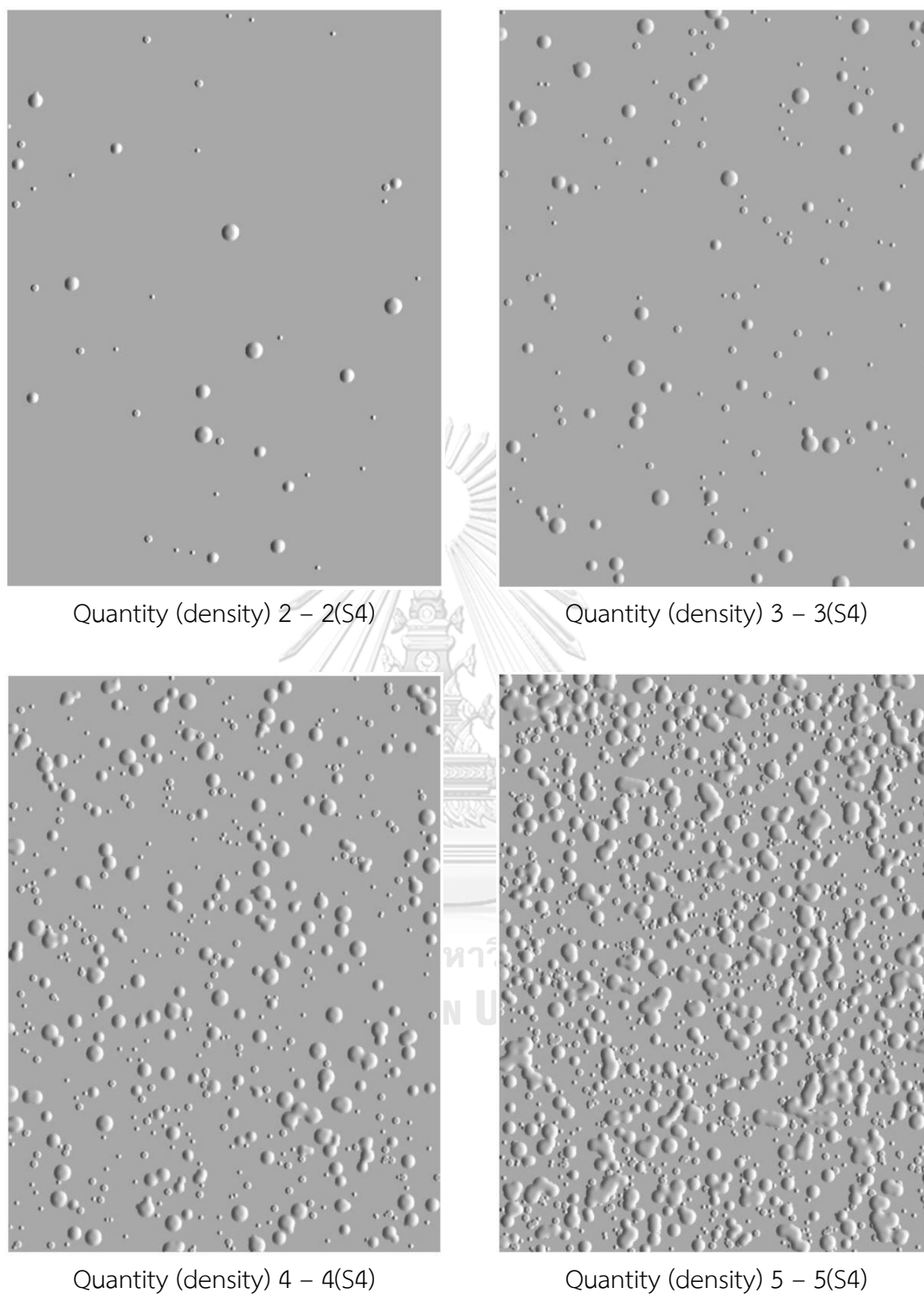




ภาพที่ 3.13 สีพองระดับ 3

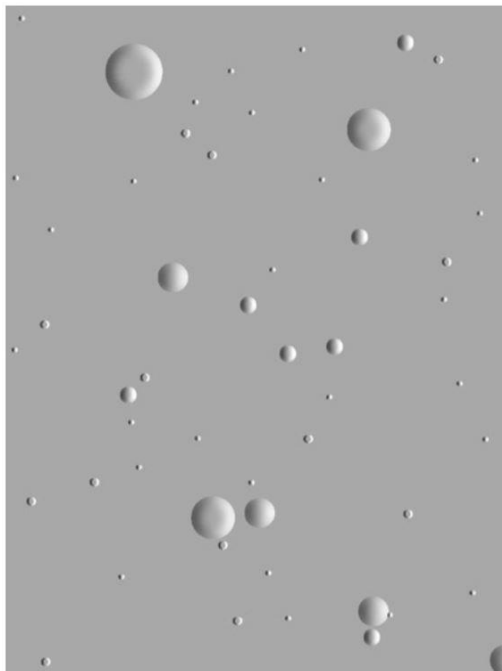
ที่มา: (Australian/New Zealand Standard, 1998)



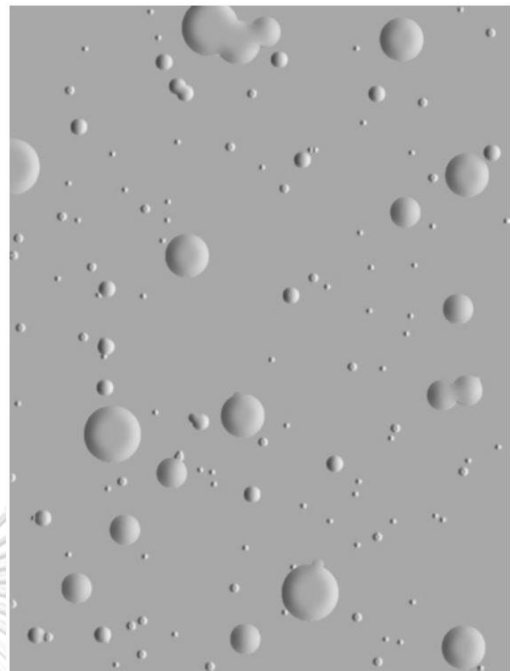


ภาพที่ 3.14 สีพองระดับ 4

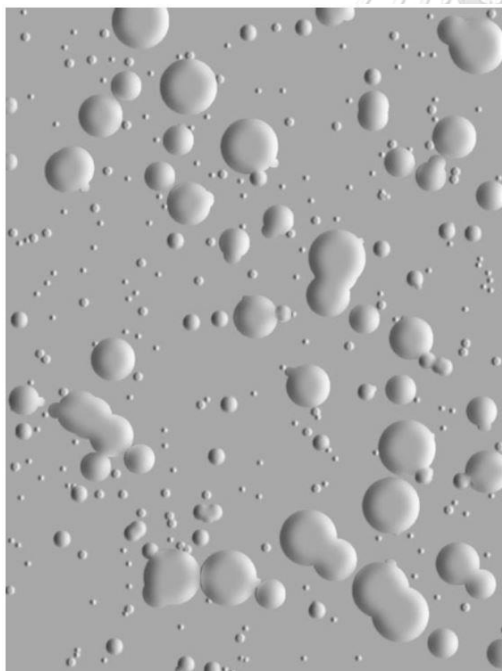
ที่มา: (Australian/New Zealand Standard, 1998)



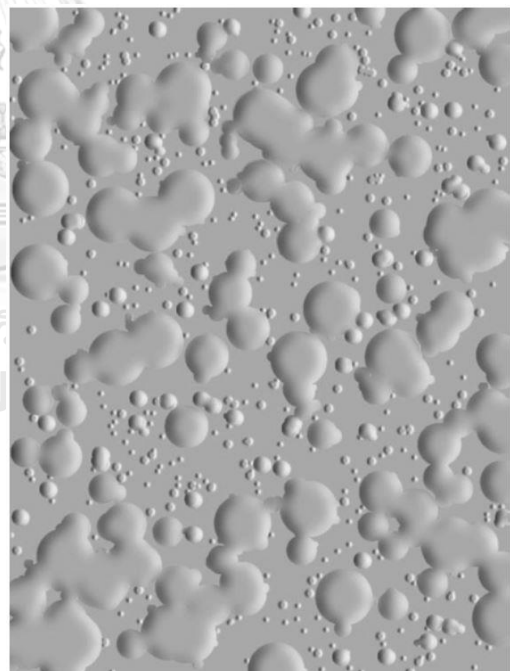
Quantity (density) 2 – 2(S5)



Quantity (density) 3 – 3(S5)



Quantity (density) 4 – 4(S5)



Quantity (density) 5 – 5(S5)

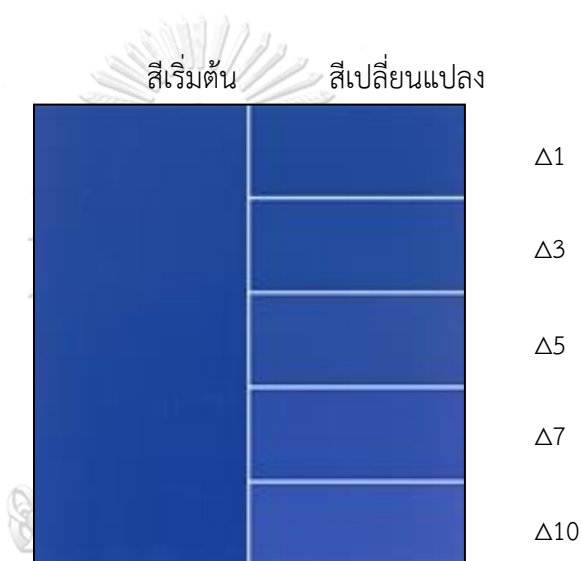
ภาพที่ 3.15 สีพองระดับ 5

ที่มา: (Australian/New Zealand Standard, 1998)

### 3.4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

- 1) เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงสี
- 2) เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

การทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะหรือ QUV Accelerated Weathering เพื่อประเมินความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงสี โดยเริ่มเก็บข้อมูลที่ 1,000 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นทุก 500 ชั่วโมง จนถึง 2,000 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสี ( $\Delta E$ ) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น การวัดค่าเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ AS/NZS 1580.601.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีต้องไม่เกิน 5 หน่วย (HunterLab)



ภาพที่ 3.16 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี

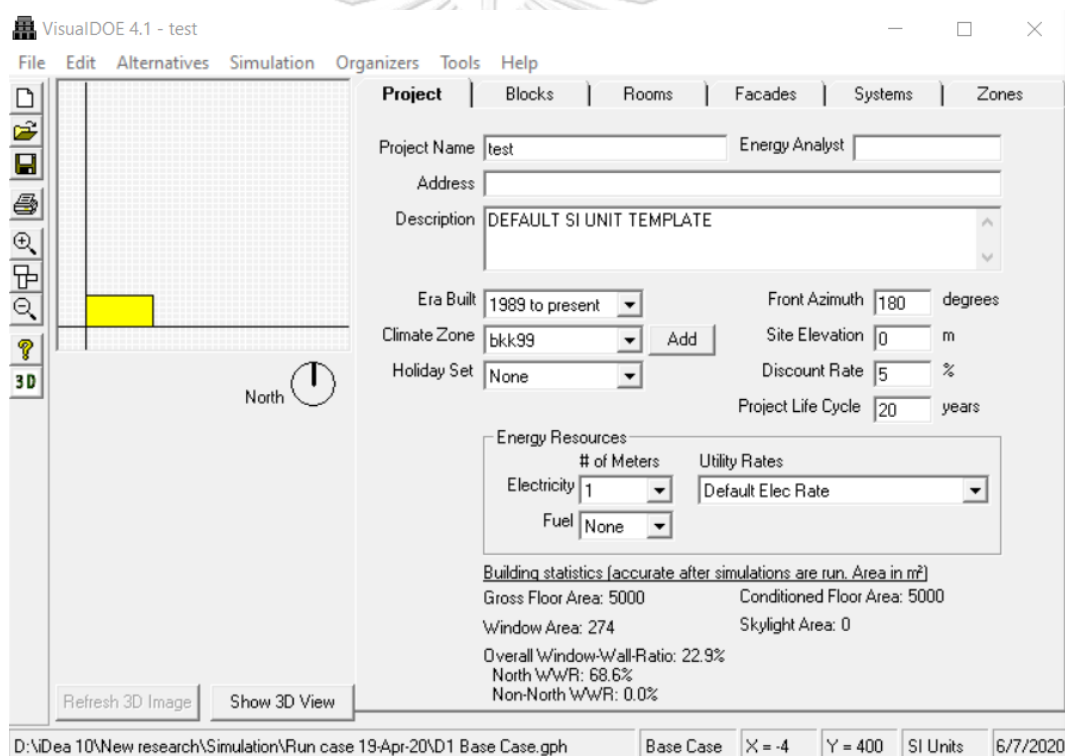
### 3.5 การจำลองการใช้พลังงานระบบปรับอากาศของอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

#### 3.5.1 โปรแกรม VisualDOE 4.1

โปรแกรม VisualDOE 4.1 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาโดย Lawrence Berkley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รับการยอมรับจากนักวิจัยและใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกฎหมายในการอนุรักษ์พลังงานในหลายประเทศทั่วโลก (อภิชนา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555) โปรแกรมสามารถใช้ในการคำนวณเพื่อประเมินการใช้พลังงานและภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศภายในอาคารที่มีผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่เปลือกอาคาร เป็นต้น ส่วนปัจจัยภายใน เช่น ความร้อนที่เกิดจากระบบเครื่องใช้ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าแสงสว่างภายในอาคาร ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร เป็นต้น ข้อมูลการสำรวจที่นำมาระบุในการจำลองโปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลการใช้พลังงานภายในอาคารออกมา แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้ากับ

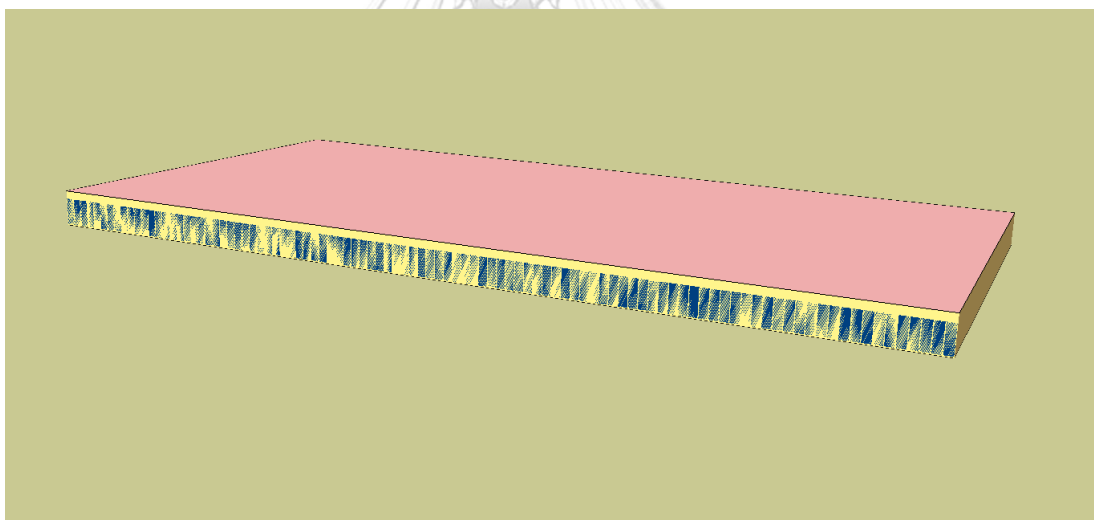
อาคารจริง เพื่อพิจารณาและศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารต่อไปได้ ทั้งนี้ข้อมูลสภาพอากาศที่ใช้ในการจำลองจะมีให้เลือกแตกต่างกันออกไปตามแต่ละพื้นที่ตามที่โปรแกรมระบุ

การใช้งานโปรแกรม VisualDOE 4.1 สามารถกำหนดรูปแบบและป้อนข้อมูลอาคารกรณีศึกษา ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของอาคาร สถานที่ตั้งอาคาร สภาพภูมิอากาศ ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุเปลือกอาคาร เช่น ผนัง หลังคา ฉนวนกันความร้อน แผ่นกันซึม เป็นต้น โปรแกรมสามารถระบุชนิดและขนาดช่องเปิดที่ของประตูและหน้าต่าง ข้อมูลงานระบบทั้งระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้า แสงสว่าง และระบบเครื่องใช้ไฟฟ้า รวมถึงข้อมูลจำนวนผู้ใช้งาน ลักษณะการใช้งานและช่วงเวลาการใช้งานในพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารได้ เพื่อให้คำนวณและแสดงผลการจำลองการใช้พลังงานได้อย่างละเอียดใกล้เคียงความเป็นจริงในรูปแบบตัวเลข หรือแสดงเป็นกราฟ ผลการจำลองสามารถแสดงเป็นรายชั่วโมง รายเดือน รายปีตามที่ผู้ใช้โปรแกรมกำหนดข้อมูล

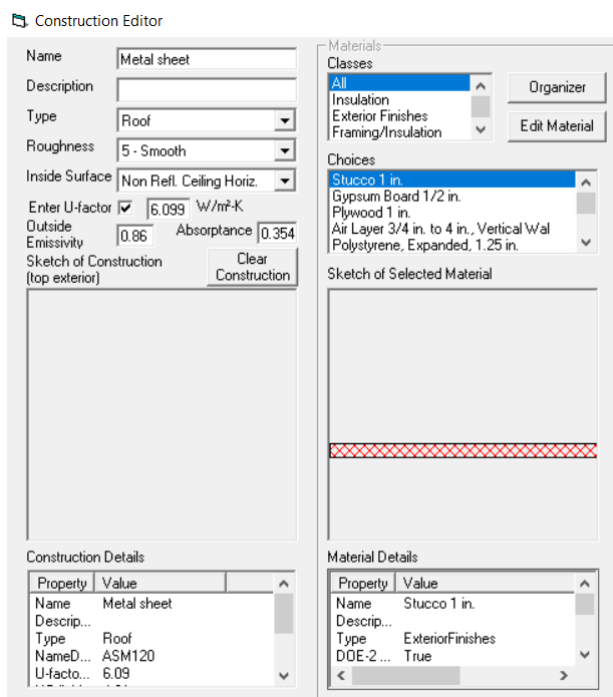


ภาพที่ 3.17 โปรแกรม VisualDOE 4.1

งานวิจัยนี้ได้สมมุติฐานอาคารร้านค้าหรือห้างค้าปลีกเป็นกรณีศึกษา เพื่อเปรียบเทียบทำการประสิทธิภาพการใช้พลังงานระบบปรับอากาศ เนื่องจากอาคารประเภทนี้มีการใช้ระบบปรับอากาศเป็นอาคารขนาดใหญ่ และวัสดุผนังหลังคาเป็นแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสี ประกอบกับอัตราการก่อสร้างอาคารประเภทนี้ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัด จึงเหมาะกับการศึกษา และสามารถเสนอแนะข้อมูลเพื่อเป็นประโยชน์กับเจ้าของโครงการ นักลงทุน สถาปนิกและผู้รับเหมาที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 อาคารมีการติดตั้งแผ่นหลังคาเหล็กที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เป็นอาคารร้านค้าชั้นเดียว มีการป้อนข้อมูลเปลือกอาคารทั้งผนังและหลังคา โดยป้อนค่าคุณสมบัติของแผ่นหลังคาเหล็กแต่ละชนิดที่นำมาศึกษา และอ้างอิงค่าการคำนวณตามหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2542 (กระทรวงพลังงาน, 2542) เช่น การนำความร้อนของวัสดุ (U value) ค่าการคายความร้อน (Emissivity) และค่าการดูดกลืนรังสี (Absorptivity) เป็นต้น ทั้งนี้การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบหลังคาไม่มีฉนวนกันความร้อนและฝ้าเพดาน สถานที่จำลองตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร โดยใช้ไฟล์ bkk99.bin เขียนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 (วัศพล อีรวนพันธุ์, 2558)



ภาพที่ 3.18 รูปแบบอาคารร้านค้าที่สร้างในโปรแกรม VisualDOE 4.1



ภาพที่ 3.19 ข้อมูลเลือกอาคารกรณีศึกษาในโปรแกรม VisualDOE 4.1

การจำลองการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 ในอาคารร้านค้ากรณีศึกษาขนาดพื้นที่ใช้งาน 5,000 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.18 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานของแผ่นหลังคาเหล็กกริดลอนก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ชุด ตามจำนวนชนิดแผ่นเหล็ก คือ ประเภทชั้นเคลือบสีชั้นเดียวและสองชั้น และประเภทการเคลือบโลหะอะลูมิเนียม-สังกะสี และสังกะสีเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.5.2 การตั้งค่าสภาวะการใช้งานของอาคารกรณีศึกษาในโปรแกรม VisualDOE 4.1

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการใช้งานของอาคารร้านค้ากรณีศึกษา

รายละเอียด	จำนวน
จำนวนชั้น	1
พื้นที่ใช้งานรวม (ตารางเมตร)	5,000
พื้นที่ปรับอากาศรวม (ตารางเมตร)	5,000
พื้นที่หลังคารวม (ตารางเมตร)	5,000
ระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศ	7.00-21.00 น.
WWR (Window to Wall Ratio)	22.9%
WWR ในทิศเหนือ	68.6%

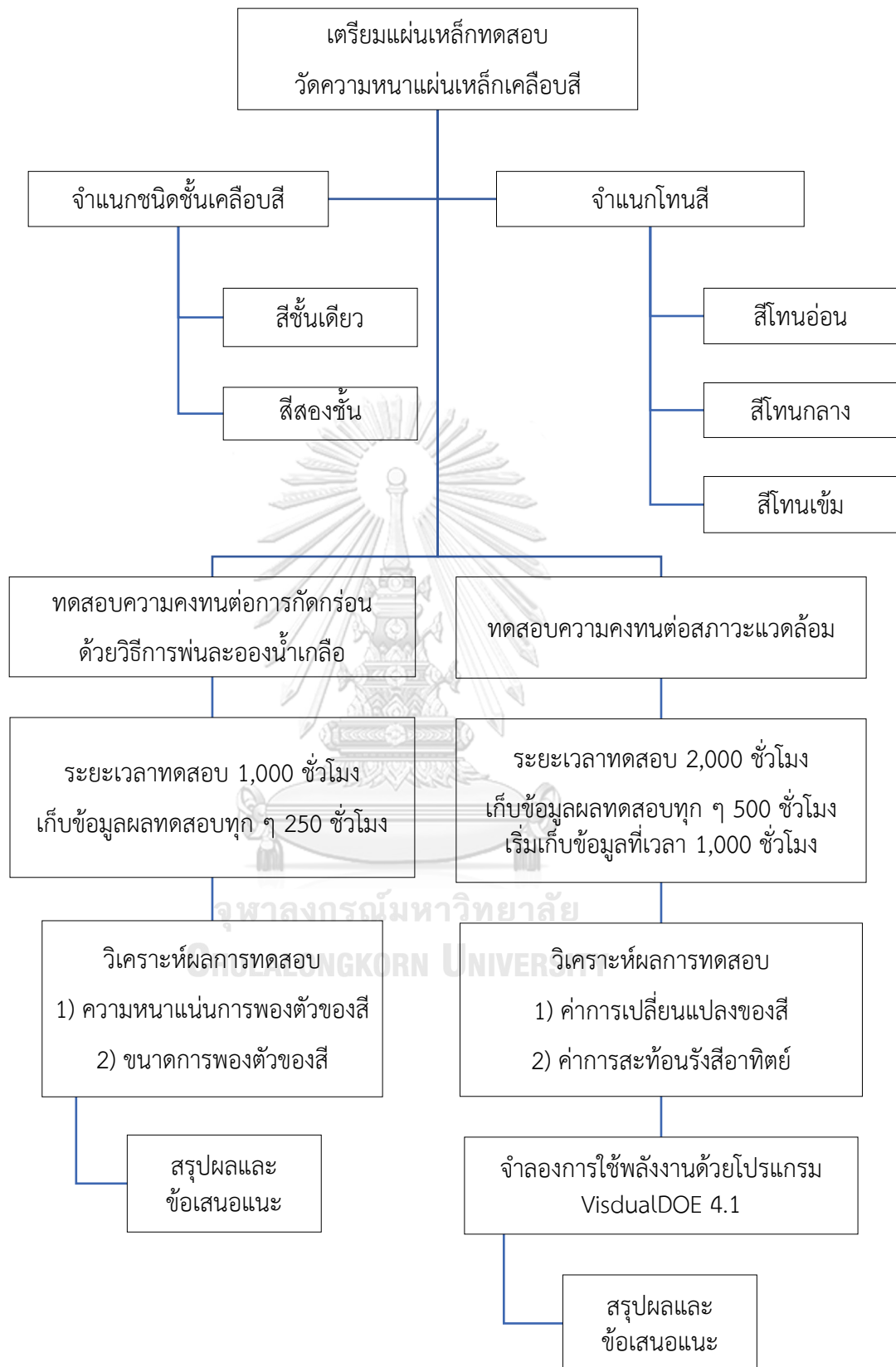
รายละเอียด	จำนวน
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตารางเมตร)	274
ค่า Shading Coefficient ของกระจก	0.95
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ (ตารางเมตร)	926
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตารางเมตร/คน)	27.87
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (w/m <sup>2</sup> )	2.69
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (w/m <sup>2</sup> )	29.06
ระบบปรับอากาศ	Constant air volume system

### 3.5.3 การวิเคราะห์การใช้พลังงาน

พิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศ (Cooling Electrical Use) ในแต่ละเดือนในระยะเวลาการใช้งานหนึ่งปี และเฉลี่ยรายชั่วโมงในหนึ่งวันของเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน การศึกษาจะเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบแผ่นเหล็กตัวอย่าง และแยกชนิดแผ่นเหล็กตามกลุ่มที่ระบุในระเบียบวิธีวิจัย

### 3.6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดสอบทั้งหมดรวมทั้งวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ เพื่อประเมินลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุ การเปลี่ยนแปลงของสี และการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการจำลองการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและเสนอแนวทางการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานก่อสร้างต่อไป



แผนภูมิที่ 3.1 ขั้นตอนระเบียบวิธีวิจัย



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดลองได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

1. การทดสอบหาความหนาชั้นเคลือบ
2. การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบการพ่นละอองน้ำเกลือ
3. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม
4. การทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์
5. การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ

#### 4.1 การทดสอบหาความหนาชั้นเคลือบสี

แผ่นเหล็กทดสอบระบบการเคลือบสีชั้นเดียวมีจำนวน 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย S1 S2 และ S3 มีความหนาตามขนาดระบุ 13 ไมครอน ส่วนระบบการเคลือบสีสองชั้น แผ่นเหล็กทดสอบมีจำนวน 6 ตัวอย่าง ประกอบด้วย D1 D2 D3 D4 D5 และ D6 แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 D2 และ D3 มีความหนาตามขนาดระบุ 22 ไมครอน ส่วนแผ่นเหล็กตัวอย่าง D4 D5 และ D6 มีความหนาตามขนาดระบุ 25 ไมครอน ดังแสดงตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ชั้นเคลือบ	ระบบเคลือบสี	ชื่อสี	ความหนาระบุ (มิลลิเมตร)
S1	อะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี	สีชั้นเดียว	Asian White	13
S2			Peanut Butter	13
S3			Natural Brown	13
D1	สังกะสี	สีสองชั้น	Ivory	22
D2			Blue 340	22
D3			Blue 349	22
D4	อะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี	สีสองชั้น	Off White	25
D5			Alloy Grey	25
D6			Bangkok Red	25

ตารางที่ 4.2 การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

	การวัดตำแหน่งที่ 1	การวัดตำแหน่งที่ 2
S1		
S2		
S3		

ตารางที่ 4.3 การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

	การวัดตำแหน่งที่ 1	การวัดตำแหน่งที่ 2
D1		
D2		
D3		



ตารางที่ 4.4 การวัดค่าความหนาแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

	การวัดตำแหน่งที่ 1	การวัดตำแหน่งที่ 2
D4		
D5		
D6		

การวัดความหนาแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นโดยใช้หลักการตรีโกณมิติ ทั้งนี้เครื่องมือและโปรแกรมวัดความหนาที่ใช้วัดจะแสดงค่า L1 คือ ความหนาสีรองพื้น และค่า L2 คือ ความหนาสีด้านบน และความหนารวมในหน่วยไมครอน หากเปรียบเทียบการแยกชั้นเคลือบสีจะพบว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 สีโทนกลางและ D3 สีโทนเข้มจะเห็นได้ชัดเจนกว่า D1 สีโทนอ่อน

การวัดความหนาระบุของแผ่นเหล็กทดสอบตามตารางที่ 4.4 จำนวนทั้งหมด 9 ตัวอย่างแผ่นทดสอบ จะระบุด้วยสัญลักษณ์ S คือ แผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว และ D คือ แผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น โดยลำดับ S1 ถึง S3 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว มีสีโทนอ่อน สีโทนกลางและสีโทนเข้ม ตามลำดับ ลำดับ D1 ถึง D3 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น มีสีโทนอ่อน สีโทนกลางและสีโทนเข้ม ตามลำดับ และลำดับ D4 ถึง D6 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น มีสีโทนอ่อน สีโทนกลาง และสีโทนเข้ม ตามลำดับ

ความหนาที่วัดได้คือ ความหนาเฉลี่ยจากการวัดชั้นเคลือบสีแผ่นเหล็กทดสอบ ส่วนความหนาระบุ (Nominal Thickness) เป็นความหนาที่ระบุในเอกสารผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.5 ความหนาชั้นเคลือบสีชั้นทดสอบ

รายละเอียด	ความหนาชั้นเคลือบสี (ไมครอน)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
สัญลักษณ์	S1	S2	S3	D1	D2	D3	D4	D5	D6
สีรองพื้น									
การวัดตำแหน่งที่ 1	-	-	-	5.30	6.60	5.00	3.20	4.00	4.60
การวัดตำแหน่งที่ 2	-	-	-	5.40	6.70	5.20	3.10	4.10	4.60
ค่าเฉลี่ย	-	-	-	5.35	6.65	5.10	3.15	4.05	4.60
สีด้านบน									
การวัดตำแหน่งที่ 1	13.40	18.20	13.30	18.40	16.30	17.30	18.70	17.80	18.40
การวัดตำแหน่งที่ 2	13.20	18.30	13.30	18.40	16.50	17.30	19.00	17.40	18.60
ค่าเฉลี่ย	13.30	18.25	13.30	18.40	16.40	17.30	18.85	17.60	18.50
การวัด (Measured Thickness)	13.30	18.25	13.30	23.75	23.05	22.40	22.00	21.65	23.10
ขนาดระบุ (Nominal Thickness)	13.00	13.00	13.00	22.00	22.00	22.00	25.00	25.00	25.00









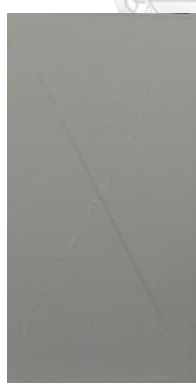



#### 4.2 การทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบการพ่นละอองน้ำเกลือ

การศึกษาความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีการเร่งสภาวะแบบการพ่นละอองน้ำเกลือเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง การทดสอบใช้แผ่นเหล็กทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ แผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว สีโทนอ่อน (ตัวอย่าง S1) และแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น สีโทนกลาง (ตัวอย่าง D2 และ D5) ผลการทดสอบเกิดการกัดกร่อนและสีฟองบนผิวหน้าแผ่นเหล็กเคลือบสีแตกต่างกันออกไป กลุ่มที่ 1 คือ การทดสอบแผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 มีความหนาสีที่วัดได้ 13.30 ไมครอน เกิดสนิมขาวตลอดแนวกริดกลางแผ่นและมีสีฟองเกิดขึ้นที่ผิวเคลือบสีความหนาแน่นระดับ 4 และขนาดระดับ 3 โดยเทียบผลทดสอบดังกล่าวกับระดับความหนาแน่นและการขนาดสีฟองตัวตามตารางที่ 3.13 การเก็บข้อมูลที่ระยะเวลา 750 ชั่วโมง พบว่าเกิดสีฟองเพิ่มขึ้นที่มุมบนซ้ายแผ่นเหล็กทดสอบ และมีความหนาแน่นและขนาดสูงขึ้นไปเวลา 1,000 ชั่วโมง กลุ่มที่ 2 คือ การทดสอบแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 มีความหนาสีรวมที่วัดได้ 23.05 ไมครอน ประกอบด้วยสีรองพื้น 6.65 ไมครอน และสีด้านบน 16.40 ไมครอน เกิดสนิมขาวตามแนวรอยกริดกลางแผ่นและไหลเป็นคราบและมีสีฟองที่ผิวเคลือบสีความหนาแน่นระดับ 1 ขึ้นงานทดสอบตัวอย่าง D5 มีความหนาสีรวมที่วัดได้ 21.65 ไมครอน ประกอบด้วยสีรองพื้น 4.05 ไมครอน และสีด้านบน 17.6 ไมครอน เกิดสนิมขาวตามแนวรอยกริดกลางแผ่นและมีสีฟองที่ผิวเคลือบสีความหนาแน่นระดับ 1 เช่นกัน ดังแสดงตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4. 6 ระดับสีฟองจากการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน

ชนิดแผ่นเหล็ก	ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)			
	250	500	750	1,000
S1	2 (S2) รอยกริด	3 (S2) รอยกริด	3 (S3) รอยกริด 4 (S5) มุมบนซ้าย	4 (S3) รอยกริด 5 (S5) มุมบนซ้าย
D2	0	0	1	1
D5	0	1	1	1

ตารางที่ 4.7 ลักษณะสีฟองและการเกิดสนิมขาวจากการทดสอบความคงทนต่อการกัดกร่อน

ชนิดแผ่นเหล็ก	ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)			
	250	500	750	1,000
S1				
D2				
D5				

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM B117 ระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง ผลการทดสอบจะต้องมีความหนาแน่นไม่เกินระดับ 2 และขนาดไม่เกินระดับ 3 ตามมาตรฐาน AS/NZS 1580.481.1.9 (Blister) กำหนด หากพิจารณาแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 ผลการทดสอบมีสีฟองที่ผิวหน้าความหนาแน่นระดับ 4 และขนาดระดับ 3 มีค่าเกินมาตรฐาน แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 และ D5 มีค่าผลทดสอบอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด แต่หากเปรียบเทียบจากลักษณะสีฟองและการเกิดสนิมขาวบนผิวเคลือบแผ่นเหล็กทดสอบตามตารางที่ 4.5 แล้ว แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 มีอัตราการกัด

กร่อนสูงกว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D5 เนื่องจากมีการเกิดสนิมขาวตามแนวรอยกริดและไหลเป็นคราบบนแผ่นที่ระยะเวลาทดสอบ 500 ชั่วโมง และเกิดสีฟองช่วงกลางรอยกริดที่ระยะเวลาทดสอบ 1,000 ชั่วโมง

หากพิจารณาประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโลหะกลุ่มที่ 2 คือ การทดสอบแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D5 ผลิตจากเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี มีความคงทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 ผลิตจากเหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสีที่มีการเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียวบนผิวเหล็กก่อนกระบวนการเคลือบสี

#### 4.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการเร่งความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีมีการทดสอบแผ่นเหล็กเคลือบสี 9 ตัวอย่าง จำแนกการทดสอบตามระบบการเคลือบสี โทนสี และความหนาตะรุ ทั้งนี้ระบบการเคลือบสีแบ่งออกเป็นการเคลือบสีชั้นเดียวและการเคลือบสีสองชั้น โทนสีแบ่งออกเป็นสีโทนอ่อน สีโทนกลาง และสีโทนเข้ม นอกจากนี้ระบบการเคลือบสีสองชั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ความหนาตะรุ 22 ไมครอน และกลุ่มที่ 2 ความหนาตะรุ 25 ไมครอน ตามข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

หากค่าการเปลี่ยนแปลงของสีหรือ  $\Delta E$  มีค่าสูงขึ้น แสดงถึงคุณภาพของสีที่ลดลง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G154-16 และ ASTM D2244-16 (Colour) กำหนดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโทนกลางที่ทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีค่าไม่เกิน 5 หน่วย

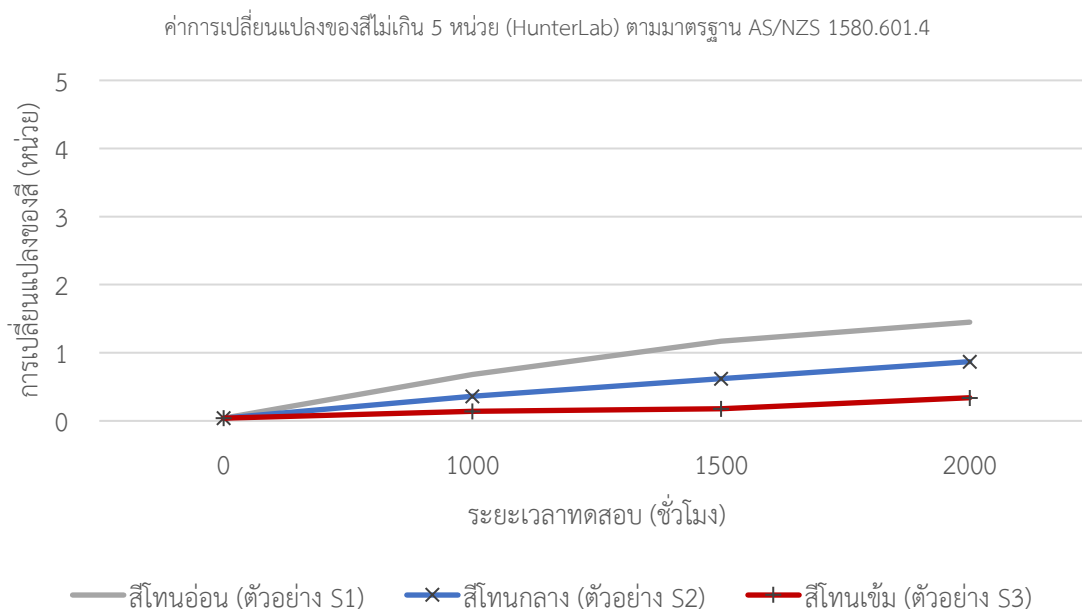
ตารางที่ 4.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กชั้นเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

ชนิดแผ่นเหล็ก		ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)		
สัญลักษณ์	โทนสี	1,000	1,500	2,000
S1	โทนอ่อน	0.68	1.17	1.45
S2	โทนกลาง	0.36	0.62	0.87
S3	โทนเข้ม	0.14	0.18	0.34

ผลของการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะเป็นระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 สีโทนอ่อน ระบบสีชั้นเดียว มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.45 หน่วย รองลงมาเป็นแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S2 สีโทนกลาง 0.87 หน่วย และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S3 สีโทนเข้ม มีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุด 0.34 หน่วย ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.1 หากพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีช่วงระยะเวลาทดสอบที่เพิ่มขึ้นทุก 500 ชั่วโมง พบว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 สีโทนอ่อน มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.49 หน่วย และ 0.28 หน่วย ตามลำดับ แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S2 สีโทนกลาง มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.26



หน่วย และ 0.25 หน่วย ตามลำดับ และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S3 สีโทนเข้ม มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.04 หน่วย และ 0.16 หน่วย ตามลำดับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีโทนอ่อนมีค่าสูงสุด ส่วนสีโทนเข้มมีค่าน้อยสุด



แผนภูมิที่ 4.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

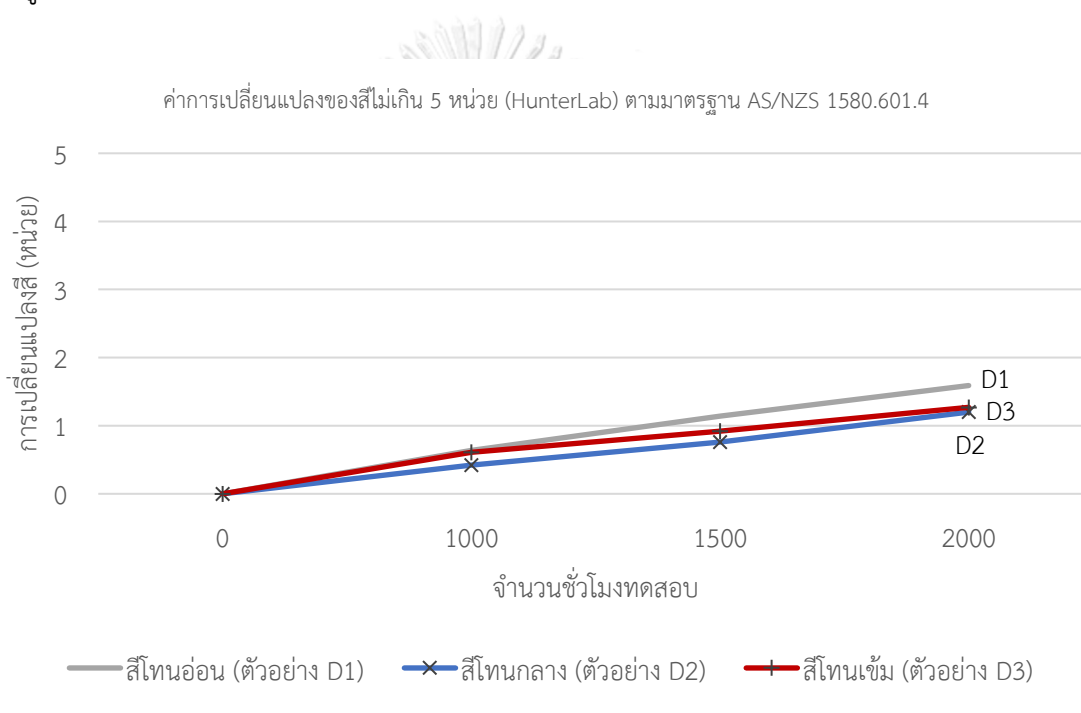
ตารางที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

ชนิดแผ่นเหล็ก		ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)			
กลุ่ม	สัญลักษณ์	โทนสี	1,000	1,500	2,000
1	D1	โทนอ่อน	0.64	1.14	1.59
	D2	โทนกลาง	0.42	0.76	1.20
	D3	โทนเข้ม	0.61	0.92	1.27

ตารางที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย) แผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

ชนิดแผ่นเหล็ก		ระยะเวลาทดสอบ (ชั่วโมง)			
กลุ่ม	สัญลักษณ์	โทนสี	1,000	1,500	2,000
2	D4	โทนอ่อน	0.46	0.87	1.17
	D5	โทนกลาง	0.15	0.20	0.31
	D6	โทนเข้ม	0.15	0.26	0.37

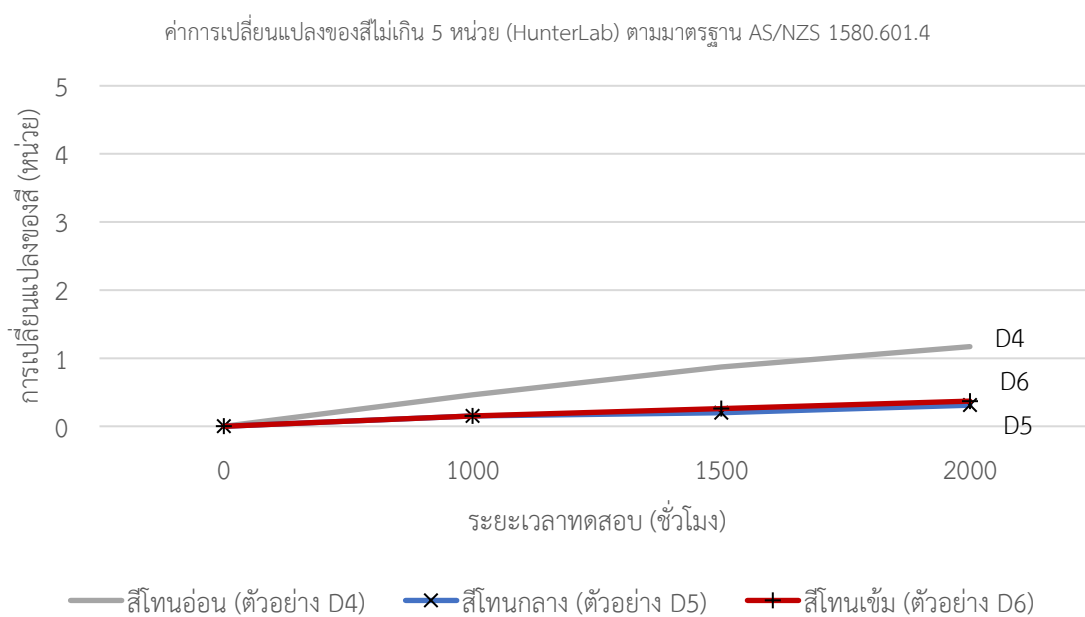
ระบบการเคลือบสีสองชั้นแบ่งเป็น 2 กลุ่มตัวอย่างตามความหนาชั้นเคลือบสี (ขนาดความหนาสีระบุ 22 ไมครอน) และชั้นเคลือบโลหะ โดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 ถึง D3 แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 สีโทนอ่อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.59 หน่วย รองลงมาคือแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D3 สีโทนเข้ม 1.27 หน่วย และน้อยสุดคือแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 สีโทนกลาง 1.20 หน่วย ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.2 ส่วนกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 ถึง D6 (ขนาดความหนาสีระบุ 25 ไมครอน) แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 สีโทนอ่อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.17 หน่วย รองลงมาคือแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D6 สีโทนเข้ม 0.37 หน่วย น้อยสุดคือแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D5 สีโทนกลาง 0.31 หน่วย ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.3



แผนภูมิที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

หากพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีช่วงระยะเวลาทดสอบที่เพิ่มขึ้นทุก 500 ชั่วโมง แผ่นเหล็กตัวอย่างกลุ่มที่ 1 พบว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 สีโทนอ่อน มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.50 หน่วย และ 0.45 หน่วย ตามลำดับ แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 สีโทนกลาง มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.34 หน่วย และ 0.44 หน่วย ตามลำดับ และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D3 สีโทนเข้ม มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.31 หน่วย และ 0.35 หน่วย ตามลำดับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีโทนอ่อนมีค่าสูงสุด ส่วนสีโทนเข้มมีค่าน้อยสุดเช่นเดียวกับผลทดสอบแผ่นเหล็กตัวอย่างระบบการเคลือบสีชั้นเดียว การเปลี่ยนแปลงของสีจะแปรผันตามระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเกาะกลุ่มกัน ส่วนกลุ่มที่ 2 แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 สีโทนอ่อน มีค่าการ

เปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.41 หน่วย และ 0.30 หน่วย ตามลำดับ แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 สีโทนกลาง มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.05 หน่วย และ 0.11 หน่วย ตามลำดับ และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D6 สีโทนเข้ม มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น 0.11 หน่วย และ 0.26 หน่วย ตามลำดับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีโทนอ่อนมีค่าสูงสุด ส่วนสีกลางมีค่าน้อยสุด การเปลี่ยนแปลงของสีโทนกลางและสีโทนเข้มจะเกาะกลุ่มกันแปรผันตามระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้น แต่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยหากเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโทนอ่อนที่แตกต่างกัน ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.3



แผนภูมิที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

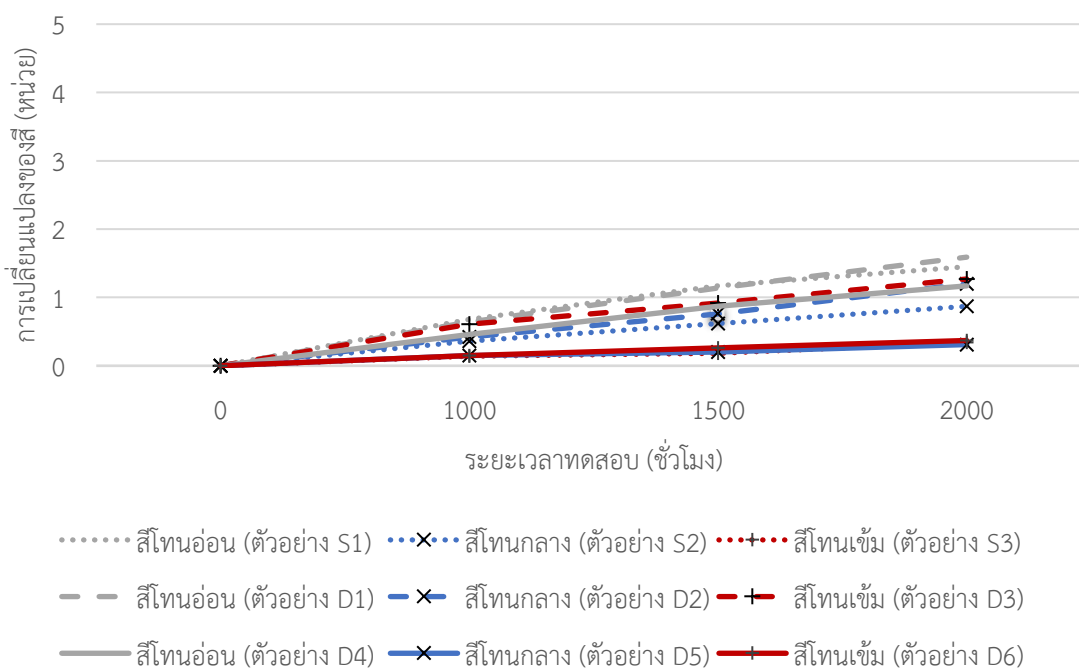
ตารางที่ 4.11 ลำดับค่าการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กทดสอบที่เวลา 2,000 ชั่วโมง

ลำดับ	ชนิดแผ่นเหล็ก		การเปลี่ยนแปลงของสี (หน่วย)
	สัญลักษณ์	โทนสี	
1	D1	อ่อน	1.59
2	S1	อ่อน	1.45
3	D3	เข้ม	1.27
4	D2	กลาง	1.20
5	D4	อ่อน	1.17
6	S2	กลาง	0.87
7	D6	เข้ม	0.37
8	S3	เข้ม	0.34
9	D5	กลาง	0.31

จากตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมด พบว่าแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 สีโทนอ่อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.59 หน่วย และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D5 สีโทนกลางมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยสุด 0.31 หน่วย หากเปรียบเทียบจากโทนสี สีโทนอ่อน แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.59 หน่วย แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีรองลงมา 1.45 หน่วย และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยสุด 1.17 หน่วย สีโทนกลาง แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.20 หน่วย แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีรองลงมา 0.87 หน่วย และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D5 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยสุด 0.31 หน่วย สีโทนเข้ม แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D3 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด 1.27 หน่วย แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D6 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีรองลงมา 0.37 หน่วย และแผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S3 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยสุด 0.34 หน่วย

โทนสีอ่อนจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด หากเทียบกับค่าของสีโทนกลางและสีโทนเข้ม นอกจากนั้นหากพิจารณาระบบการเคลือบสี ตัวอย่างระบบการเคลือบสีสองชั้น กลุ่มที่ 1 (แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 D2 และ D3) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุดทุกสีเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.4

ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีไม่เกิน 5 หน่วย (HunterLab) ตามมาตรฐาน AS/NZS 1580.601.4



แผนภูมิที่ 4.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทุกตัวอย่างทดสอบ

ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีตามมาตรฐาน ASTM G154 และ ASTM D2244 มีการกำหนดให้หาค่า  $\Delta E$  สีโทนกลาง (Intermediate Color) ไม่เกิน 5 หน่วย (HunterLab) สำหรับการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีการเร่งสภาวะเป็นระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง ทั้งนี้ผลการทดสอบสีโทนกลางมีค่าไม่เกินกำหนด หากพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีเร่งสภาวะกับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง สามารถประเมินการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมระยะเวลา 250 ชั่วโมงเทียบเท่ากับสภาวะแวดล้อมจริงได้ประมาณ 1 ปี (Takebayashi et al., 2016) มาตรฐาน AS/NZS 1580.457.1 และ ASTM D2244 สำหรับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงเป็นเวลา 10 ปี มีการกำหนดค่า  $\Delta E$  สีโทนอ่อนไม่เกิน 4 หน่วย สีโทนกลางไม่เกิน 6 หน่วย และสีโทนเข้มไม่เกิน 10 หน่วย หากพิจารณาประเมินค่าเปรียบเทียบผลการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมแล้ว ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของชิ้นงานทดสอบทั้งหมดมีแนวโน้มไม่เกินกำหนด

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ D.A. Cocuzzi และ G.R. Pilcher ในปี 2013 ได้มีการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสีแผ่นเหล็กเคลือบสีเปรียบเทียบกันระหว่างการทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะและการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงที่มีการติดตั้งแผ่นเหล็กเคลือบสีทดสอบให้มีการชะล้างน้ำฝนและตากแดดตามสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาทำการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสีหรือ  $\Delta E$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดสอบที่เพิ่มขึ้น การทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโทนอ่อนน้อยสุด โดยสีโทนกลางและสีโทน

เข้มจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ สอดคล้องตามมาตรฐาน AS/NZS 1580.457.1 และ ASTM 2244 การทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีเช่นเดียวกัน แต่ผลการทดสอบมีค่าแตกต่างและไม่สัมพันธ์กันกับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง ดังนั้นหากต้องการประเมินความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมควรทำการทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการควบคุมการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงเพื่อสามารถนำผลมาประเมินเปรียบเทียบกันได้ หากสามารถดำเนินการทดสอบขึ้นงานได้รวดเร็ว จะทำให้มีผลการทดสอบเพื่อใช้ประกอบในการประเมินความคงทนของวัสดุที่เที่ยงตรงและแม่นยำได้มากขึ้น

#### 4.4 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์

การทดสอบค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์จะดำเนินการหลังทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม ประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเคลือบสีจำนวน 9 ตัวอย่าง จำแนกการทดสอบตามระบบการเคลือบสี โทนสี และความหนาของสี ทั้งนี้ระบบการเคลือบสีแบ่งออกเป็นการเคลือบสีชั้นเดียวและการเคลือบสีสองชั้น โทนสีแบ่งออกเป็นสีโทนอ่อน สีโทนกลาง และสีโทนเข้ม นอกจากนั้นระบบการเคลือบสีสองชั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ความหนาของสี 22 ไมครอน และกลุ่มที่ 2 ความหนาของสี 25 ไมครอน ตามข้อมูลผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

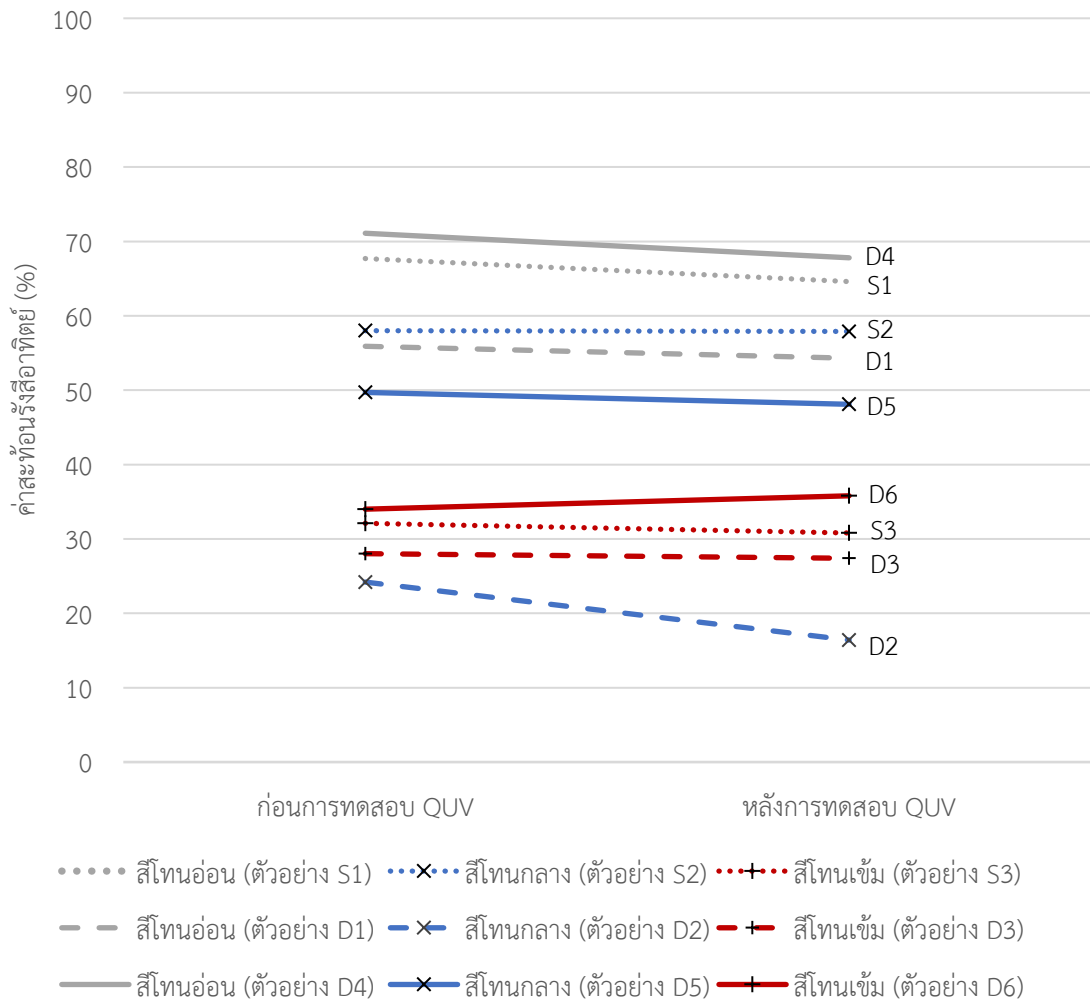
ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบวัดค่าด้วยเครื่อง Shimadzu SolidSpec-3700 (UV-VIS-NIR Spectrophotometer) และนำมาคำนวณหาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASTM E903-8 โดยสำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตารางที่ 4.12 ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นงานทดสอบ

รายละเอียด	ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ (%)								
	S1	S2	S3	D1	D2	D3	D4	D5	D6
ก่อนการทดสอบ	67.70	58.00	32.10	55.90	24.20	28.02	71.10	49.70	34.00
หลังการทดสอบ	64.60	57.90	30.80	54.30	16.40	27.40	67.80	48.10	35.80
ค่าลดลง %	-3.10	-0.10	-1.30	-1.60	-7.80	-0.62	-3.30	-1.60	+1.80

จากตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ก่อนการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (Base Case) กับหลังการทดสอบมีแนวโน้มลดลง แผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง S1 สีโทนอ่อน มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุด คือ มีค่าลดลง 3.10% โดยก่อนการทดสอบวัดค่าได้ 67.70% และหลังการทดสอบวัดค่าได้ 64.60% กรณีแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น กลุ่มที่ 1 (แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D1 ถึง D3) แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D2 สีโทนกลาง มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุด คือ มีค่าลดลง 7.80%

ก่อนการทดสอบวัดค่าได้ 24.20% และหลังการทดสอบวัดค่าได้ 16.40% และกลุ่มที่ 2 (แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 ถึง D6) แผ่นเหล็กทดสอบตัวอย่าง D4 สีโทนอ่อน มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุด คือ มีค่าลดลง 3.30% ก่อนการทดสอบวัดค่าได้ 71.10% และหลังการทดสอบวัดค่าได้ 67.80%



แผนภูมิที่ 4.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์

อย่างไรก็ตามมีแผ่นเหล็กตัวอย่าง D6 ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์แตกต่างจากตัวอย่างอื่น คือ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ก่อนการทดสอบต่ำกว่าหลังการทดสอบ ก่อนการทดสอบวัดค่าได้ 34% และหลังการทดสอบวัดค่าได้ 35.8% ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น 1.8% ทั้งนี้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ที่ชั้นเคลือบสารยึดติดเสื่อมลงจากการทดสอบ และทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) เกิดขึ้นบนผิวเคลือบโดยมี

สีขาเป็นส่วนประกอบ (Aoyama, Sonoda, Nakanishi, Tanabe, & Takebayashi, 2017) จึงมีผลทำให้ค่าสะท้อนแสงอาทิตย์ที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

หากเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ แผ่นเหล็กทดสอบสีโทนอ่อนมีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูง และสีโทนเข้มมีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำ และเกาะกลุ่มกัน ดังแผนภูมิที่ 4.5 ส่วนสีโทนกลางมีค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์กระจายตัวกันเนื่องจากชิ้นงานทดสอบมีค่า HunterLab L ที่วัดได้จากเฉดสีแตกต่างกัน

ค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ลดลงสอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุเปลือกผิวภายนอกอาคาร ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุจะเสีลดลงเนื่องจากการใช้งานภายนอกในสภาวะแวดล้อมที่มีรังสีอัลตราไวโอเล็ต มีการปนเปื้อนของฝุ่นบนผิววัสดุ การสัมผัสกับอุณหภูมิหรือความร้อนสูง หรือความชื้น (Ichinose et al., 2009) และ (Takebayashi et al., 2016)

ตารางที่ 4.13 ค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ชิ้นงานทดสอบจากการคำนวณ

รายละเอียด	ค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์								
	S1	S2	S3	D1	D2	D3	D4	D5	D6
ก่อนการทดสอบ	81.45	68.01	33.06	65.12	22.68	27.68	86.21	56.66	35.58
หลังการทดสอบ	77.14	67.87	31.34	62.93	12.55	26.87	81.59	54.49	37.97
ค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลง	-4.31	-0.14	-1.72	-2.19	-10.13	-0.81	-4.62	-2.17	+2.39
% ค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลง	-5.29	-0.20	-5.20	-3.36	-44.66	-2.93	-5.36	-3.83	+6.72

นอกจากนั้นหากมีการพิจารณาเลือกใช้วัสดุในสิ่งก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์ตามข้อกำหนดของ LEED ในหัวข้อ Heat Island Reduction การเลือกใช้วัสดุผนังหลังคาที่มีค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์เท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดดังตารางที่ 2.8 จะมีเงื่อนไขที่กำหนดค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการใช้งาน 3 ปี หรือค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์เริ่มต้นต้องไม่ต่ำกว่าค่าดัชนีรังสีอาทิตย์ที่กำหนด

การคำนวณค่าดัชนีรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง ดังแสดงตามตารางที่ 4.13 อ้างอิงการเปรียบเทียบผลการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีเร่งสภาวะกับการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง โดยการประเมินการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมระยะเวลา 250 ชั่วโมงเทียบเท่ากับสภาวะแวดล้อมจริงได้ประมาณ 1 ปี (Takebayashi et al., 2016) กรณีหลังคาลาดชันต่ำหรือความลาดชันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 ต่อ 12 ค่า SRI เริ่มต้นกำหนด 82 และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ปี ค่าดัชนีการสะท้อนรังสีอาทิตย์ SRI (Solar Reflectance Index) มีค่าไม่ต่ำกว่า 64 พบว่ามีเพียงชิ้นงานทดสอบตัวอย่าง D4 สีโทนอ่อน ที่มีค่า



SRI เริ่มต้นตรงตามข้อกำหนด คือ 86.21 และค่า SRI หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม คือ 81.59 มีค่าไม่เกินตามข้อกำหนดเช่นกัน กรณีหลังกาลาดชั้นสูงหรือความลาดชันมากกว่า 2 ต่อ 12 ค่า SRI เริ่มต้นกำหนด 39 และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ปี ค่า SRI มีค่าไม่ต่ำกว่า 32 พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ผ่านตามข้อกำหนดประกอบด้วย S1 S2 D1 D4 และ D5 ซึ่งประกอบไปด้วยสีโทนอ่อนและ โทนกลาง การลดลงของค่าดัชนีสะท้อนรังสีอาทิตย์โดยรวมมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.20-5.36 มีเพียงแผ่นเหล็กตัวอย่าง D2 ที่มีค่าลดลงสูงสุด 10.13 หรือร้อยละ 44.66 แตกต่างจากแผ่นเหล็กทดสอบอื่น ๆ

#### 4.5 การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ

ภายหลังจากผลการทดสอบแผ่นเหล็กตัวอย่างไปจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 พบว่าอาคารร้านค้าที่ใช้แผ่นหลังคาที่ผ่านการทดสอบแล้ว มีการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศตลอดปีมากกว่าแผ่นหลังคาที่ยังไม่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (Base Case) เนื่องจากค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นหลังคาที่ผ่านการทดสอบมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศกับอาคารที่มีการแผ่นหลังคาเหล็กแตกต่างกันมีค่าแตกต่างกัน และผลการคำนวณเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีค่าแตกต่างกัน โดยการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจะมีหน่วยการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดแผ่นเหล็ก ยกเว้นแผ่นเหล็กตัวอย่าง D6 ที่มีความแตกต่างเนื่องจากภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมแล้ว การทดสอบค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุเปลือกอาคารที่ลดลงส่งผลให้มีการส่งผ่านความร้อนสู่ตัวอาคารนั้นสูงขึ้น ทำให้มีพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นตาม

#### 4.5.1 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศตลอดปี

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศของอาคารกรณีศึกษา ตั้งแต่เวลา 7:00 น.-21.00 น.ตลอดปี

ชนิดแผ่นเหล็ก	พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศ (kWh)			
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	หน่วยการใช้ไฟฟ้าสูงขึ้น	(ร้อยละ)
D2	921,506	985,639	64,133	6.51
D4	516,412	547,892	31,480	5.75
S1	548,593	577,214	28,621	4.96
D5	711,767	725,027	13,260	1.83
S3	855,828	866,811	10,983	1.27
D1	659,294	666,054	6,760	1.01
D3	890,272	895,225	4,953	0.55
S2	637,396	638,286	890	0.14
D6	839,755	824,538	-15,217	-1.85

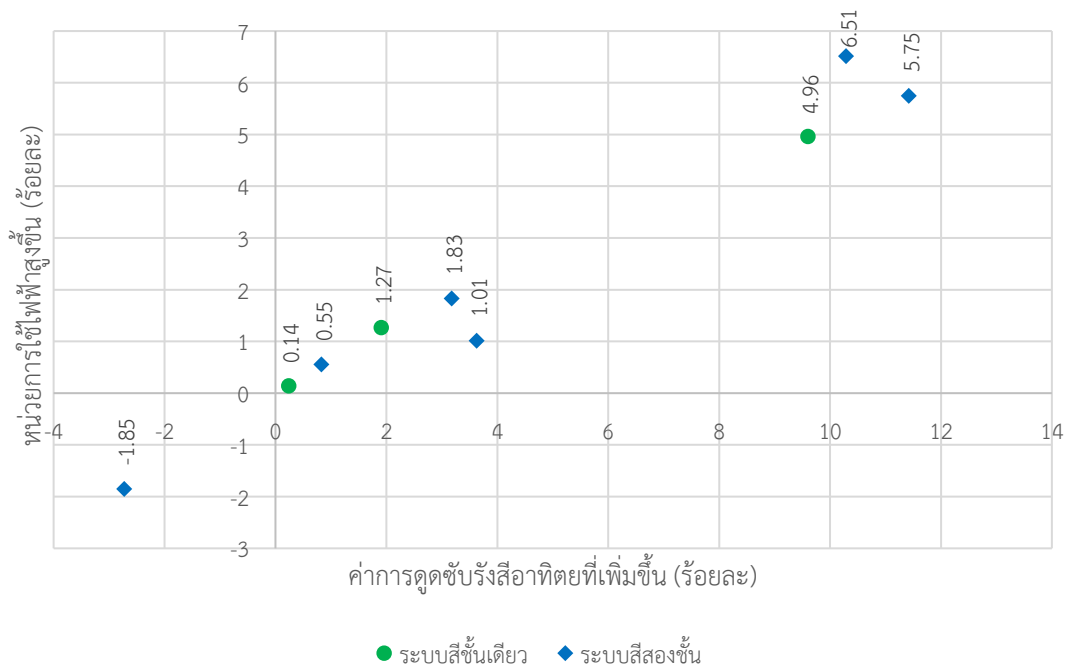
แผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น (สีโทนกลาง) หรือแผ่นเหล็ก D2 มีการใช้พลังงานในการปรับอากาศสูงสุดเนื่องจากค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กทดสอบลดลงมากที่สุด จึงส่งผลต่อการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารมากขึ้น แผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว (สีโทนกลาง) หรือแผ่นเหล็ก S2 มีการใช้พลังงานในการปรับอากาศน้อยสุด คือ มีการใช้หน่วยไฟฟ้าสูงขึ้นเพียง 890 กิโลวัตต์ ชั่วโมง ถือว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สอดคล้องกับค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์บนแผ่นเหล็กทดสอบที่ลดลงน้อยที่สุด เพียงร้อยละ 0.2 หลังการทดสอบแผ่นเหล็กด้วยการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมเป็นระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง นอกจากนั้นแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้น (สีโทนเข้ม) หรือแผ่นเหล็ก D6 มีการใช้พลังงานในการปรับอากาศลดลงเนื่องจาก แผ่นเหล็กที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงขึ้น จึงส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง เพราะการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารลดลง

การจำลองการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 ต้องวัดค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ และค่าการคายความร้อนของวัสดุทดสอบ เพื่อป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมเพื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศ แผ่นเหล็กตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์สูงขึ้น สอดคล้องกับค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ลดลง ยกเว้นแผ่นเหล็กตัวอย่าง D6 ที่มีค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.15

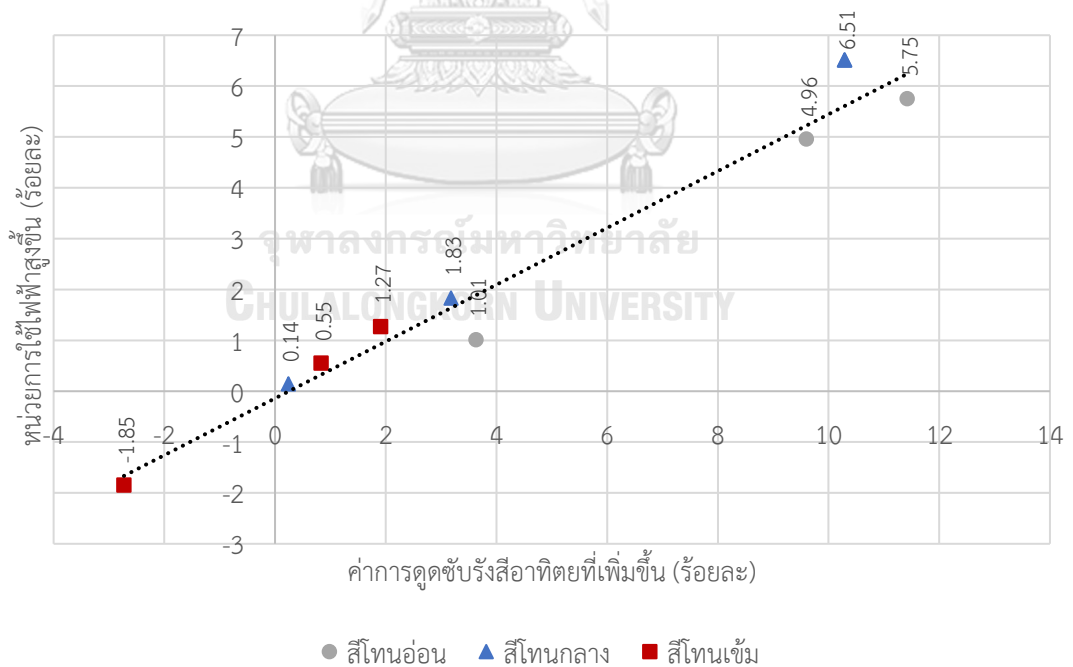
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบการดูดซับรังสีอาทิตย์

ชนิดแผ่นเหล็ก	การดูดซับรังสีอาทิตย์ (หน่วย)			
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	ค่าการดูดซับรังสี อาทิตย์สูงขึ้น	(ร้อยละ)
S1	0.323	0.354	0.031	9.60
S2	0.420	0.421	0.001	0.24
S3	0.679	0.692	0.013	1.91
D1	0.441	0.457	0.016	3.63
D2	0.758	0.836	0.078	10.29
D3	0.720	0.726	0.006	0.83
D4	0.289	0.322	0.033	11.42
D5	0.503	0.519	0.016	3.18
D6	0.660	0.642	-0.018	-2.73

หากพิจารณาการดูดซับรังสีอาทิตย์จากระบบการเคลือบสี ค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์แผ่นเหล็กระบบสีชั้นเดียวและสองชั้นจะกระจายตัว ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.6 จำนวนชั้นเคลือบสีไม่มีผลต่อค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ แต่หากพิจารณาตามโทนสีแล้ว พบว่ากลุ่มตัวอย่างแผ่นเหล็กสีโทนอ่อนมีค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นสูง สอดคล้องกับการเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พลังงานในระบบปรับอากาศสูงหากเปรียบเทียบกับสีโทนอื่น ถัดมาเป็นสีโทนกลาง และสุดท้ายกลุ่มตัวอย่างแผ่นเหล็กสีโทนเข้มที่มีค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ต่ำ ส่งผลให้การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศน้อยสุดและค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน ไม่กระจายเหมือนสีโทนอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง (Linear) ดังแสดงตามแผนภูมิที่ 4.7 เพราะหากแผ่นเหล็กมีการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทสู่อาคารเพิ่มขึ้น เครื่องปรับอากาศจะทำงานหนักขึ้นแปรผันตามการใช้พลังงานไฟฟ้ากับระบบปรับอากาศที่เพิ่มขึ้น



แผนภูมิที่ 4.6 ค่าการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นและค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นระบบชั้นเคลือบสีที่แตกต่างกัน

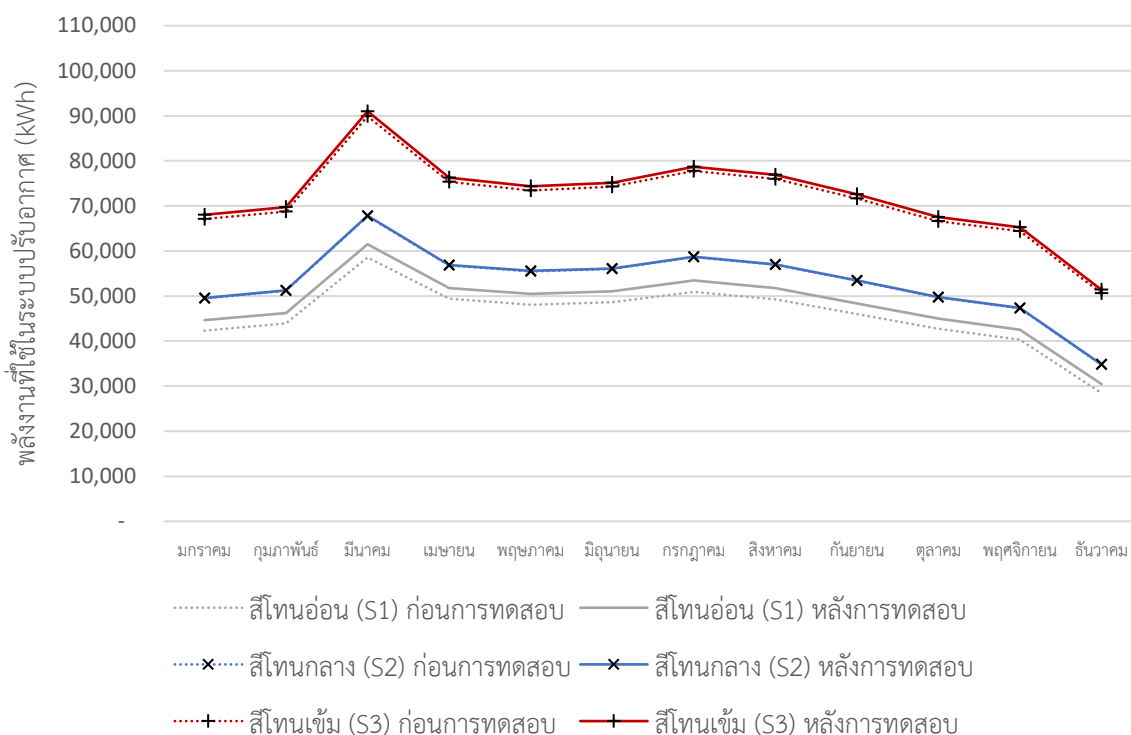


แผนภูมิที่ 4.7 ค่าการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่สูงขึ้นและค่าการดูดซับรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นโทนสีที่แตกต่างกัน

#### 4.5.2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศแต่ละเดือน

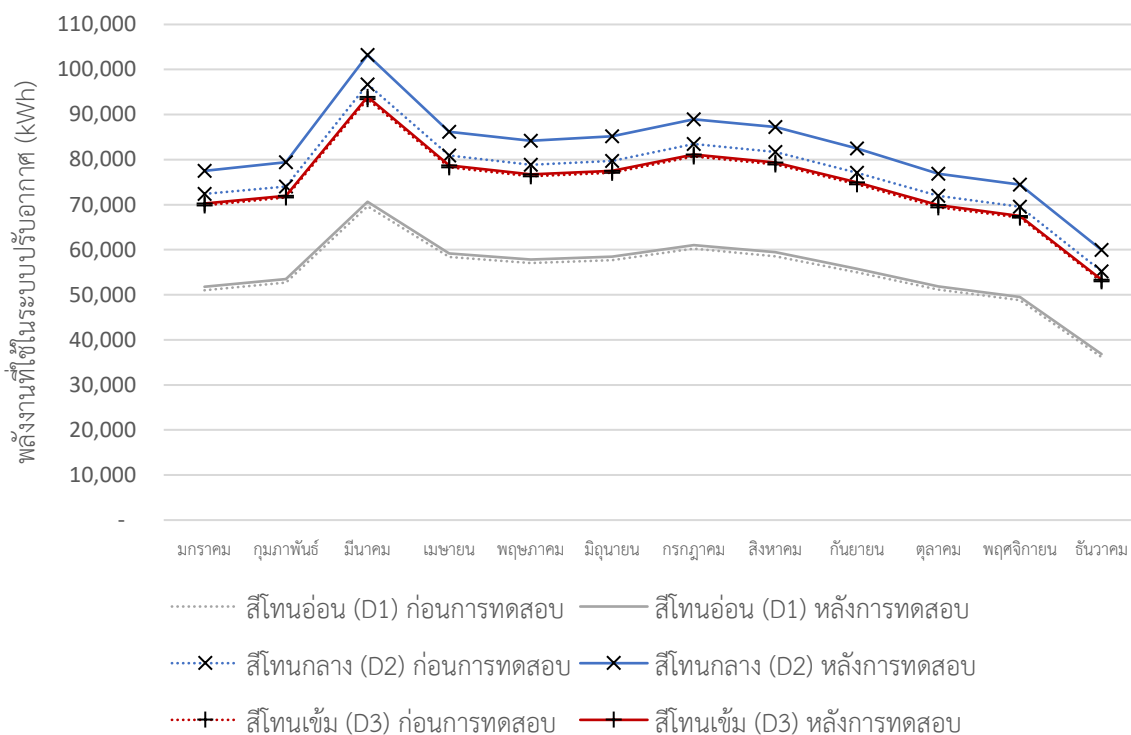
จากการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศอาคารร้านค้ากรณีศึกษา ขนาดพื้นที่ 5,000 ตารางเมตร กรณีจำลองแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว พบว่ามีการใช้พลังงาน สูงสุดในเดือนมีนาคม และใช้พลังงานน้อยสุดในเดือนธันวาคม หากพิจารณาการใช้พลังงานในเดือน มีนาคม แผ่นเหล็กสีโทนเข้ม S3 มีการใช้พลังงานสูงสุด 89,855 กิโลวัตต์ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม หากเปรียบเทียบหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 90,995 กิโลวัตต์ ชั่วโมง มีการใช้พลังงานสูงขึ้น 1,140 กิโลวัตต์ชั่วโมง ถัดมาคือแผ่นเหล็กสีโทนกลาง S2 มีการใช้ พลังงาน 67,719 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 67,811 กิโลวัตต์ชั่วโมง มี การใช้พลังงานแตกต่างกันเพียง 232 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนแผ่นเหล็กสีโทนอ่อน S1 มีการใช้พลังงาน ต่ำสุด 58,552 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 61,487 กิโลวัตต์ชั่วโมง มี การใช้พลังงานแตกต่างกัน 2,935 กิโลวัตต์ชั่วโมง แผ่นเหล็กสีโทนอ่อนมีการใช้พลังงานแตกต่างสูงสุด หากเปรียบเทียบกับแผ่นเหล็กสีโทนสีกลาง และโทนสีเข้ม เนื่องจากการค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์แผ่น เหล็กเคลือบสีโทนอ่อน S1 หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมตามตัวแปรควบคุมที่ เหมือนกัน มีค่าลดลงร้อยละ 3.10 มากกว่าสีโทนกลางและสีโทนเข้ม คือ ร้อยละ 0.10 และ 1.30 ตามลำดับ ดังแสดงตามตารางที่ 4.12 นอกจากนี้หากพิจารณาตามตัวแปรต้น คือ โทนสีที่แตกต่าง กัน จะพบว่าแผ่นเหล็กสีโทนเข้มมีการใช้พลังงานสูงสุด เนื่องจากมีการดูดซับรังสีอาทิตย์สูงสุด จึง ส่งผลทำให้ความร้อนจากทั้งภายนอกและแสงอาทิตย์ถ่ายเทผ่านแผ่นหลังคาเหล็กและเข้าสู่ภายใน อาคารสูงสุดเช่นเดียวกัน

หากพิจารณาแผนภูมิที่ 4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานหลังการทดสอบระหว่างแผ่นเหล็กสี โทนอ่อน S1 และแผ่นเหล็กสีโทนกลาง S2 มีการใช้พลังงานต่างกันเพียง 61,072 กิโลวัตต์ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าแผ่นเหล็กสีโทนกลางมีการใช้พลังงานสูงกว่าร้อยละ 9.6 แผ่นเหล็กสีโทนเข้มมีการใช้ พลังงานสูงกว่าแผ่นเหล็กสีโทนกลางและสีโทนอ่อนร้อยละ 26.4 และ 33.4 ตามลำดับ



แผนภูมิที่ 4.8 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

กรณีการศึกษาแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสี 2 ชั้น ประกอบด้วยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 2 ชุด จากการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศอาคารร้านค้ากรณีศึกษาที่จำลองการใช้แผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีชั้นสองชั้นกลุ่มที่ 1 พบว่ามีการใช้พลังงานสูงสูงในเดือนมีนาคม และใช้พลังงานน้อยสุดในเดือนธันวาคม หากพิจารณาการใช้พลังงานในเดือนมีนาคม แผ่นเหล็กสีโทนกลาง D2 มีการใช้พลังงานสูงสุด 96,721 กิโลวัตต์ชั่วโมง ก่อนการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม หากเปรียบเทียบหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 103,229 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานสูงขึ้น 6,508 กิโลวัตต์ชั่วโมง ถัดมาคือแผ่นเหล็กสีโทนเข้ม D3 มีการใช้พลังงาน 93,428 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 93,937 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานแตกต่างกันเพียง 509 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนแผ่นเหล็กสีโทนอ่อน D1 มีการใช้พลังงานต่ำสุดเช่นเดียวกับแผ่นสีโทนอ่อน S1 ของกลุ่มแผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว มีค่าการใช้พลังงาน 69,645 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 70,647 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานแตกต่างกัน 1,002 กิโลวัตต์ชั่วโมง จากแผนภูมิที่ 4.9 จะพบว่าแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีโทนอ่อน D1 มีการใช้พลังงานต่ำสุดหากเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานแผ่นเหล็กสีโทนกลางและสีโทนเข้ม

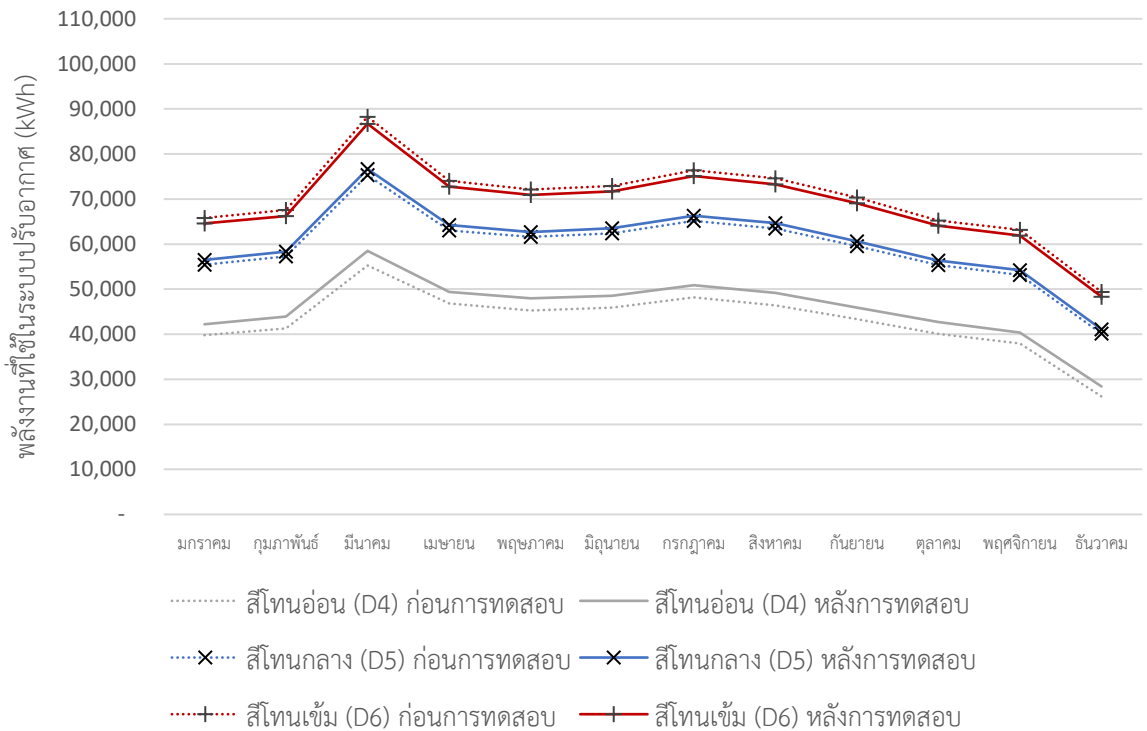


แผนภูมิที่ 4.9 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

การใช้พลังงานแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีชั้นสองชั้นกลุ่มที่ 2 พบว่ามีการใช้พลังงานในเดือนมีนาคม แผ่นเหล็กสีโทนอนเข้ม D6 มีการใช้พลังงานสูงสุด 88,255 กิโลวัตต์ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม หากเปรียบเทียบหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 86,711 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานลดลง 1,544 กิโลวัตต์ชั่วโมง แตกต่างจากผลการทดสอบที่ผ่านมาในแผ่นเหล็กสีโทนอนเข้ม S3 และ D3 เนื่องจากแผ่นเหล็กหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมมีการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงขึ้น ถัดมาคือแผ่นเหล็กสีโตนกลาง D5 มีการใช้พลังงาน 75,285 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 76,653 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานแตกต่างกัน 1,368 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนแผ่นเหล็กสีโทนอน D4 มีการใช้พลังงานต่ำสุดเช่นเดียวกับแผ่นสีโทนอน S1 และ D1 มีค่าการใช้พลังงาน 55,251 กิโลวัตต์ชั่วโมง เทียบกับหลังการทดสอบมีการใช้พลังงาน 58,492 กิโลวัตต์ชั่วโมง มีการใช้พลังงานแตกต่างกัน 3,241 กิโลวัตต์ชั่วโมง

หากเปรียบเทียบการใช้พลังงานอาคารจำลองกรณีศึกษาที่ใช้แผ่นหลังคาเหล็กหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม เดือนมีนาคมมีการใช้พลังงานสูงสุดและเดือนธันวาคมมีการใช้พลังงานต่ำสุด และพบว่าแผ่นเหล็กสีโทนอนเข้ม D6 ที่มีการใช้พลังงานสูงสุด มีการใช้พลังงานแตกต่างกันถึง 38,391 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือมีการใช้พลังงานลดลงร้อยละ 79 ในเดือนธันวาคม ถัดมาคือแผ่นเหล็กสีโตนกลาง D5 มีการใช้พลังงานแตกต่างกัน 35,572 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือมีการใช้พลังงานลดลงร้อยละ 87 ในเดือนธันวาคม และแผ่นเหล็กสีโทนอน D4 มีการใช้พลังงานแตกต่างกันน้อยสุด

30,085 กิโลวัตต์ชั่วโมง แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเดือนมีนาคมและธันวาคมแล้ว เดือนธันวาคมมีการใช้พลังงานลดลงเป็นเท่าตัวหรือร้อยละ 106



แผนภูมิที่ 4.10 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น

#### 4.5.3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศแต่ละวัน

การจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศอาคารร้านค้ากรณีศึกษา ช่วงเวลาทำการ ตั้งแต่ 7:00 น.-21:00 น. ช่วงเวลากลางวันจะมีการถ่ายเทความร้อนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคาร การเลือกใช้แผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูง เป็นปัจจัยส่งผลต่อการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศที่ลดลง

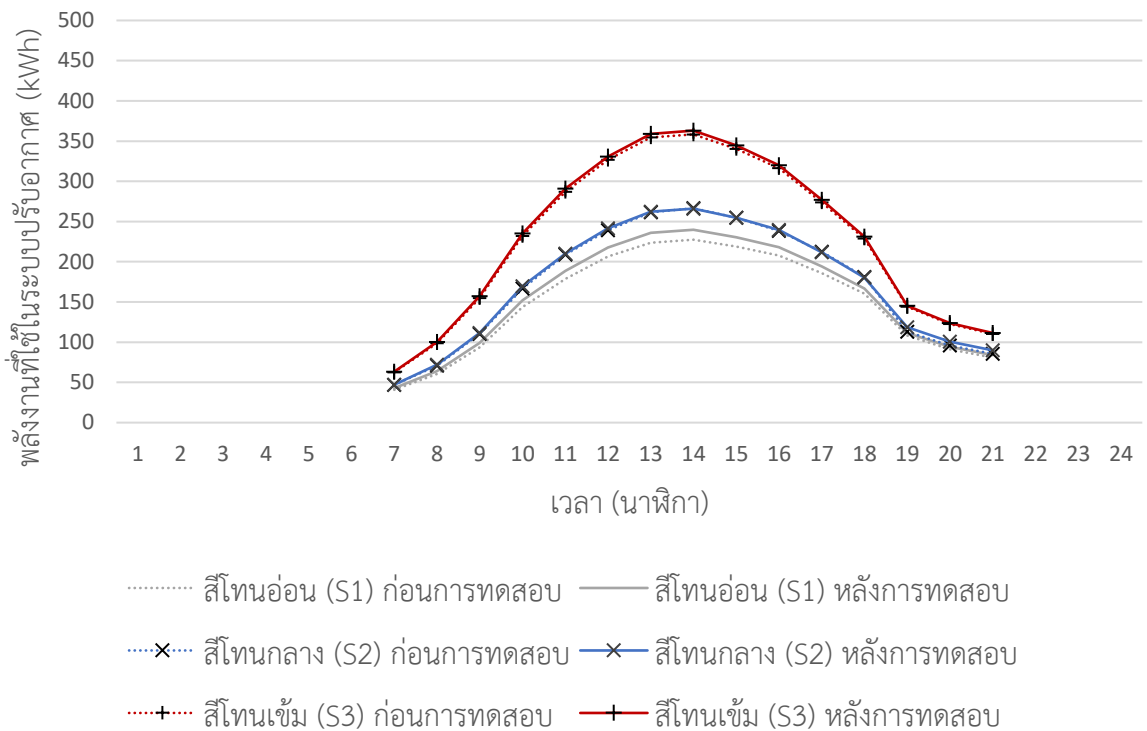
การจำลองการใช้พลังงานเฉลี่ยเลือกเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน ทั้งสองเดือนดวงอาทิตย์จะอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า เดือนมีนาคมเป็นช่วงฤดูร้อน พื้นที่โดยทั่วไปจะได้รับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ส่วนเดือนกันยายนพื้นที่ยังคงถูกปกคลุมด้วยเมฆอันเนื่องมาจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ จึงเลือกพิจารณาผลการจำลองทั้งสองเดือนเปรียบเทียบกันเพื่อให้เห็นความแตกต่างของการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศอย่างชัดเจน โดยใช้กลุ่มตัวอย่างแผ่นหลังคาเคลือบสีชั้นเดียวหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม พบว่าเวลา 14:00 น. อาคารกรณีศึกษามีการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศสูงสุด แผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีโทนเข้ม มีการใช้พลังงาน 363 กิโลวัตต์ชั่วโมง รองลงมาคือสีโทนกลาง มีการใช้พลังงาน 266 กิโลวัตต์



ชั่วโมง และสุดท้ายฮีทอ่อน มีการใช้พลังงาน 240 กิโลวัตต์ชั่วโมง หากพิจารณาจากฮีทแผ่นหลังคาเหล็กแล้ว พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในอาคารที่ใช้แผ่นหลังคาเหล็กเคลือบฮีทอ่อนจะประหยัดพลังงานมากกว่าร้อยละ 10.11 และ 47.65 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฮีทกลาง และฮีทเข้ม และฮีทกลางจะประหยัดพลังงานมากกว่าฮีทเข้มร้อยละ 34.10

ตารางที่ 4.16 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเดือนมีนาคม

เวลา (นาฬิกา)	ฮีทอ่อน (S1)		ฮีทกลาง (S2)		ฮีทเข้ม (S3)	
	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ
7:00	40.84	42.85	47.04	47.10	62.63	63.35
8:00	60.47	64.07	70.98	71.82	98.74	100.13
9:00	93.45	99.04	110.19	111.40	154.83	156.99
10:00	143.70	151.89	166.55	169.44	231.92	234.99
11:00	178.52	188.58	209.06	210.04	287.01	290.84
12:00	206.42	217.70	239.20	241.62	326.63	330.90
13:00	223.61	235.95	261.34	262.14	354.40	359.08
14:00	227.39	239.78	266.50	266.03	358.33	363.00
15:00	218.85	230.30	254.63	254.55	340.29	344.60
16:00	207.64	217.89	238.56	239.51	316.26	320.10
17:00	185.85	194.16	212.35	211.66	273.87	276.97
18:00	160.23	166.69	180.92	180.38	228.99	231.41
19:00	108.42	111.60	113.18	118.71	143.93	145.22
20:00	91.09	94.10	95.72	100.53	122.61	123.77
21:00	80.94	83.81	85.65	89.90	110.32	111.38



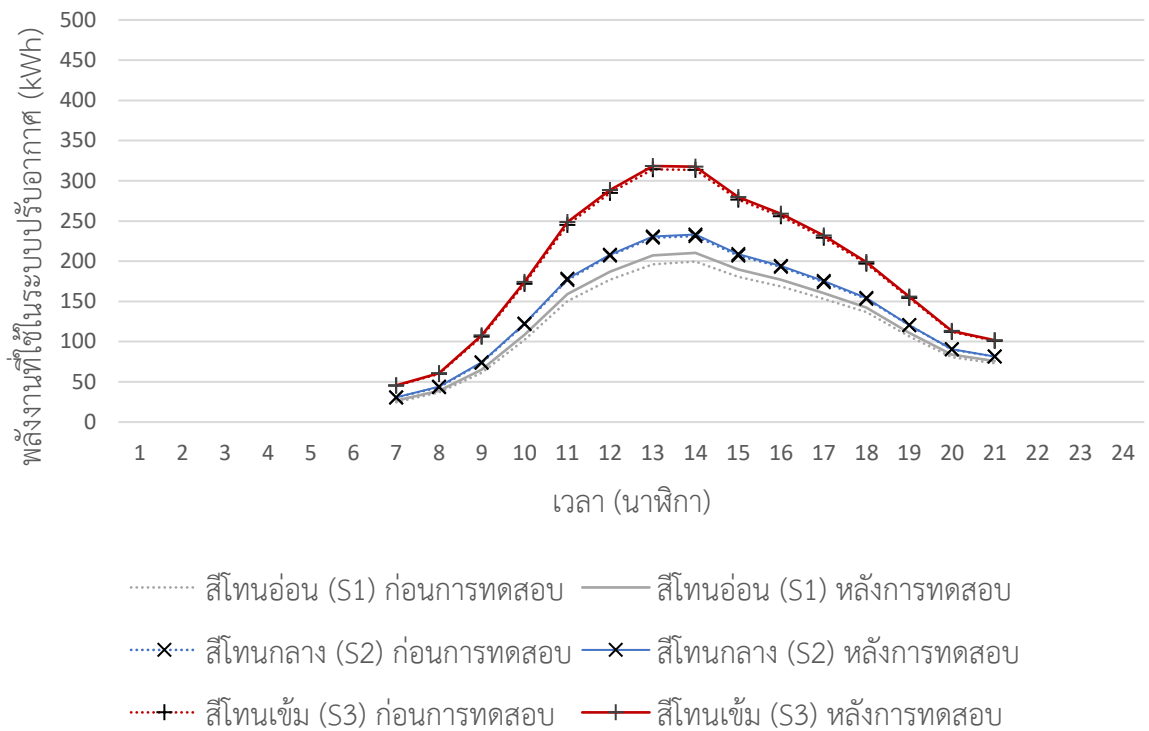
แผนภูมิที่ 4.11 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศเฉลี่ยเดือนมีนาคมกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียมผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

การจำลองพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในเดือนกันยายน พบว่าอาคารกรณีศึกษาที่มีแผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีโทนเข้มมีการใช้พลังงาน 318 กิโลวัตต์ชั่วโมง รองลงมาคือสีโทนกลาง มีการใช้พลังงาน 233 กิโลวัตต์ชั่วโมง และสุดท้ายสีโทนอ่อน มีการใช้พลังงาน 210 กิโลวัตต์ชั่วโมง หากพิจารณาจากโตนสีแผ่นหลังคาเหล็กแล้ว พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในอาคารที่ใช้แผ่นหลังคาเหล็กเคลือบสีโทนอ่อนจะประหยัดพลังงานมากกว่าร้อยละ 10.49 และ 49.36 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสีโทนกลาง และสีโทนเข้ม และสีโทนกลางจะประหยัดพลังงานมากกว่าสีโทนเข้มร้อยละ 35.18 สอดคล้องกับการใช้พลังงานในเดือนมีนาคม

หากเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเดือนมีนาคมและเดือนกันยายน พบว่าพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศในเดือนมีนาคมจะสูงกว่าเดือนกันยายน อาคารกรณีศึกษาที่ใช้แผ่นหลังคาเหล็กสีโทนอนมีการใช้พลังงานสูงกว่า 395.73 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือสูงขึ้นร้อยละ 20.37 สีโตนกลางมีการใช้พลังงานสูงกว่า 428.38 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือสูงขึ้นร้อยละ 19.96 และสีโตนเข้มมีการใช้พลังงานสูงกว่า 551.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือสูงขึ้นร้อยละ 18.99

ตารางที่ 4.17 พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเดือนกันยายน

เวลา (นาฬิกา)	สีโตนอ่อน (S1)		สีโตนกลาง (S2)		สีโตนเข้ม (S3)	
	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ
7:00	24.63	26.75	30.63	30.69	45.05	45.64
8:00	36.81	38.93	43.26	43.84	59.88	60.73
9:00	61.25	65.32	73.64	74.26	106.06	107.65
10:00	102.33	108.70	121.82	122.60	171.81	174.27
11:00	150.28	159.17	176.66	178.14	245.17	248.49
12:00	176.83	186.83	206.91	208.13	284.68	288.48
13:00	196.26	207.33	229.18	230.80	314.21	318.38
14:00	199.56	210.33	231.24	233.18	313.57	317.60
15:00	180.50	189.53	206.96	208.63	276.38	279.77
16:00	168.61	176.82	192.81	194.20	255.70	258.79
17:00	152.92	160.10	173.79	175.27	229.10	231.79
18:00	136.64	142.26	153.03	154.19	196.83	198.96
19:00	106.50	111.01	120.40	120.55	154.21	155.93
20:00	80.82	83.88	90.33	90.42	112.15	113.28
21:00	72.96	75.74	81.48	81.57	100.90	101.88



แผนภูมิที่ 4.12 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศเฉลี่ยเดือนกันยายนกับอาคารทดสอบที่ติดตั้งแผ่นหลังคาเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อนและสภาวะแวดล้อมของวัสดุได้แก่ 2 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1) ความหนาชั้นเคลือบสี แผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีชั้นเคลือบสีที่หนากว่าจะมีประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าที่มีชั้นเคลือบสีที่บางกว่า ประเภทของการเคลือบสีหรือจำนวนชั้นของการเคลือบสีจะมีประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อนแปรผันกับจำนวนชั่วโมงทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ

2) องค์ประกอบของระบบสี ประกอบด้วยผงสี ตัวทำละลาย สารยึดติด และสารเติมแต่ง องค์ประกอบทั้งหมดจะทำหน้าที่รวมกันเพื่อแสดงสมบัติของสี โดยเฉพาะผงสีและสารยึดติดที่ส่งผลต่อความคงทนต่อการกัดกร่อนและสภาวะแวดล้อม

การทดสอบประสิทธิภาพความคงทนต่อการกัดกร่อนด้วยวิธีเร่งสภาวะ ด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเกลือในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียวมีความคงทนต่อการกัดกร่อนน้อยสุด มีลักษณะการเกิดสนิมขาวตลอดแนวกริดและมีสีฟองเกิดขึ้นที่ผิวหน้าตัวอย่างทดสอบ แผ่นเหล็กเคลือบเคลือบสังกะสีเคลือบสีเกิดสนิมขาวตามแนวรอยกริดและไหลเป็นคราบสนิมขาว มีสีฟองเกิดขึ้นที่ผิวหน้าตัวอย่างทดสอบเช่นกันกับแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีชั้นเดียว แต่มีปริมาณสีฟองน้อยกว่า ส่วนแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสี เกิดสนิมขาวและมีสีฟองเกิดขึ้นที่ผิวหน้า แต่ไม่มีคราบสนิมขาวไหลบนแผ่น

แผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นมีความหนาชั้นเคลือบสีรวมสูงกว่าแผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว โดยสีรองพื้นทำหน้าที่เพิ่มการยึดเกาะชั้นเคลือบโลหะและชั้นสี การเกิดสีฟองที่ผิวหน้าของแผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นจึงมีปริมาณน้อยกว่าแผ่นเหล็กเคลือบสีชั้นเดียว แสดงถึงความคงทนต่อการกัดกร่อนละอองน้ำเกลือดีกว่า หากพิจารณาการเกิดสนิมขาวบนแผ่นทดสอบแล้ว แผ่นเหล็กเคลือบสีสองชั้นแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีมีการเกิดสนิมขาวอย่างชัดเจน เนื่องจากชั้นเคลือบโลหะก่อนการเคลือบสีที่เป็นสังกะสีหรืออลูมิเนียม เมื่อเกิดการทำปฏิกิริยากับการทดสอบละอองน้ำเกลือจะเกิดซิงค์ออกไซด์เป็นคราบสีขาวตามแนวรอยกริด และเกิดคราบสนิมไหลเป็นทางลงมาตามทิศทางการวางแผ่นทดสอบในตู้ทดสอบละอองน้ำเกลือ แต่แผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีทั้งชั้นเดียวและสองชั้น มีการเกิดสนิมขาวน้อยกว่าเนื่องจากวัสดุผลิตจากแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมที่มีประสิทธิภาพคงทนต่อการกัดกร่อนดีกว่าแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียว

การทดสอบประสิทธิภาพความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีเร่งสภาวะ เป็นการทดสอบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสีของชั้นผิวเคลือบวัสดุด้วยวิธีการจำลองผลกระทบของแสงแดดในสภาวะแวดล้อมด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ UVA-340 ในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 2,000 ชั่วโมง พบว่าแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น สีโทนอ่อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุด ส่วนแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น สีโทนกลางมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยสุด ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับความหนาของชั้นเคลือบสีไม่มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้นมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุดทุกโทนสีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้งหมด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาโทนสี สีโทนอ่อนมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสูงสุดเหมือนกัน ทั้งนี้ขอบเขตของการทดสอบไม่ได้มีการศึกษาตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของระบบสี

การทดสอบความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสีด้วยวิธีการทดสอบ QUV จำนวน 2,000 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM G154 และ ASTM D2244 ค่า  $\Delta E$  HunterLab สีโทนกลางมีค่าไม่เกินหรือเท่ากับ 5 หน่วย ทั้งนี้ผลการทดสอบทั้งหมดมีค่าไม่เกินกำหนด แต่หากทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงระยะเวลา 10 ปี ตามมาตรฐาน AS/NZS 1580.457.1 และ ASTM D2244 ค่า  $\Delta E$  HunterLab สีโทนอ่อนมีค่าไม่เกินหรือเท่ากับ 4 หน่วย สีโทนกลางมีค่าไม่เกินหรือเท่ากับ 6 หน่วย และสีโทนเข้มมีค่าไม่เกินหรือเท่ากับ 10 หน่วย ผลการทดสอบทั้งหมดจำแนกตามโทนสีมีค่าไม่เกินกำหนด แสดงถึงสมบัติด้านความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมของแผ่นเหล็กเคลือบสีทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด

ภายหลังการทดสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์พบว่าค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่มีค่าลดลง แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีเคลือบสีสองชั้น สีโทนกลางมีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุด ส่วนแผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสี เคลือบสีชั้นเดียว สีโทนกลางมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์กับความหนาชั้นเคลือบสีหรือโทนสีแล้ว ไม่มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงหลังการทดสอบความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นแตกต่างกันออกไป นอกจากนั้นหากเปรียบเทียบเฉพาะแผ่นเหล็กเคลือบสีโทนเข้ม แผ่นเหล็กเคลือบอะลูมิเนียม 55% ผสมสังกะสีเคลือบสีสองชั้น มีค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์หลังการทดสอบสูงกว่าก่อนการทดสอบ แตกต่างกับผลการทดสอบอื่นๆ โดยเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ชั้นเคลือบสารยึดติดบนผิวชั้นเคลือบสีเสื่อมลงหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมด้วยวิธีเร่งสภาวะ ทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวชั้นเคลือบสีและมีสีขาวเป็นส่วนประกอบ ส่งผลทำให้ค่าสะท้อนอาทิตย์ที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

แผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูง ส่งผลทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบมีค่าแตกต่างกันสูง สอดคล้องกับแผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำ จะส่งผลทำให้ค่าการใช้พลังงานแตกต่างกันต่ำเช่นเดียวกัน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศในแต่ละเดือน เดือนมีนาคมจะมี

การใช้พลังงานสูงสุด และเดือนธันวาคมจะมีการใช้พลังงานต่ำสุด ทั้งนี้ปริมาณการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจะมีค่าแตกต่างกันออกไปแปรผันตามค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ หากพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงแต่ละวัน การใช้พลังงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เปิดระบบเครื่องปรับอากาศเวลา 7.00 น. จนถึงเวลา 14.00 น. ที่มีการใช้พลังงานสูงสุด หลังจากนั้นแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลา 21.00 น. ที่มีการปิดระบบเครื่องปรับอากาศ

## 5.2 เสนอแนะแนวทางการเลือกใช้วัสดุ

- 1) ผลิตภัณฑ์ชั้นเคลือบโลหะผสมอะลูมิเนียมและสังกะสี มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าชั้นเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียว
- 2) ผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กเคลือบสีที่มีจำนวนชั้นเคลือบสีหนากว่า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเช่นกัน
- 3) การเลือกผลิตภัณฑ์แผ่นเหล็กเคลือบสีควรเลือกผู้ผลิตที่มีการรับประกันสีชัดเจน หรือมีมาตรฐานการผลิตและการทดสอบอ้างอิง
- 4) หากต้องการเลือกใช้วัสดุแผ่นหลังคา ร่วมกับอาคารเขียวหรือ Green Building กรณีความลาดชันหลังคาต่ำกว่า 2 ต่อ 12 สามารถเลือกใช้สีขาว Off White ส่วนกรณีความลาดชันหลังคาสูงกว่า 2 ต่อ 12 สามารถเลือกใช้สีขาว Asian White สีครีม Peanut Butter สีงาช้าง Ivory สีขาว Off White และสีเทา Alloy Grey ได้ตามเกณฑ์ LEED
- 5) การเลือกโทนสีของวัสดุ ควรเลือกโทนสีอ่อนเพราะช่วยให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้อาคารประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศ
- 6) หากมีข้อสงสัยในการเลือกใช้วัสดุ ข้อมูลผลิตภัณฑ์ทางด้านเทคนิค หรือวัสดุมีความเสื่อมหรือผิปกติเนื่องจากการใช้งานก่อนระยะเวลาที่เหมาะสม ควรปรึกษาบริษัทผู้ผลิต เพื่อให้คำแนะนำที่ถูกต้องเพื่อประกอบการพิจารณา ก่อนการตัดสินใจเลือกใช้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) การศึกษาควรทำการเปรียบเทียบกับระบบสีอื่น ๆ นอกจากทดสอบระบบสีโพลีเอสเตอร์เพียงอย่างเดียว เพื่อเป็นการวิเคราะห์สมบัติของระบบสีที่มีผลต่อความคงทนต่อการกัดกร่อนและสภาวะแวดล้อม เนื่องจากผงสีและสารยึดติดหรือเรซินเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้แสดงสมบัติของระบบสี
- 2) แผ่นเหล็กเคลือบสีสำหรับงานก่อสร้างที่มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาดยังมีอีกหลายชนิด แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านงบประมาณจึงได้มีการศึกษาเพียง 3 รูปแบบ

- 3) การทดสอบและศึกษาด้วยวิธีการเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการ สามารถช่วยลดระยะเวลาการทดสอบในการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุได้ แต่หากสามารถทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงควบคู่กันได้จะสามารถให้ข้อมูลที่เที่ยงตรงมากขึ้น หากมีการศึกษาด้วยวิธีการเร่งสภาวะและการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงควบคู่กัน แล้วนำผลการทดสอบมาประเมินและเปรียบเทียบในแต่ละพื้นที่ทดสอบ เพื่อกำหนดเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุในแต่ละพื้นที่ว่ามีความเหมาะสมกับการเลือกใช้วัสดุชั้นคุณภาพประเภทใด จะทำให้ผู้เลือกใช้มีข้อมูลประกอบในการตัดสินใจมากขึ้น
- 4) การศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนกรณีเลือกชั้นคุณภาพวัสดุแต่ละประเภท หากมีการศึกษาเพิ่มเติมจากการประเมินอายุการใช้งานของวัสดุกับสิ่งก่อสร้าง หรือการลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศที่ลดลงออกมาเป็นมูลค่าได้ จะสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุได้ง่ายขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## บรรณานุกรม

- Akbari, H., Berdahl, P., & Levinson, R. (1996). ASTM Standards for Measuring Solar Reflectance and Infrared Emittance of Construction Materials and Comparing their Steady-State Surface Temperature. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Aoyama, T., Sonoda, T., Nakanishi, Y., Tanabe, J., & Takebayashi, H. (2017). Study on aging of solar reflectance of the self-cleaning high reflectance coating. *Energy and Buildings*, 157, 92-100.
- ASTM International. (2011). ASTM B117 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.
- ASTM International. (2012). ASTM E903 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Intergrating Spheres.
- ASTM International. (2016). ASTM D2244 Calculation of Color Tolerances and Color Differences from Instrumentally Measured Color Coordinates.
- ASTM International. (2019). ASTM E1980-11 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces.
- ASTM International. (2020). ASTM D5796 Standard Test Method for Measurement of Dry Film Thickness of Thin-Film Coil-Coated Systems by Destructive Means Using a Boring Device.
- Australian/New Zealand Standard. (1998). AS/NZS 1580.481.1.9 Paints and related materials - Methods of test Coatings - Exposed to weathering - Degree of blistering.
- Australian/New Zealand Standard. (2013). AS/NZS 2728:2013 Prefinished/prepainted Sheet Metal Products for Interior/exterior Building Application.
- Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R., & Miller, W. A. (2008). Weathering of roofing materials - An overview. *Construction and Building Materials*, 22, 423-433.
- Cocuzzi, D. A., & Pilcher, G. R. (2013). Ten-year exterior durability test results compared to various accelerated weathering devices: Joint study between ASTM International and National Coil Coatings Association. *Progress in Organic Coating*,

76, 979-984.

Edavan, R. P., & Kopinski, R. (2009). Corrosion resistance of painted zinc alloy coated steels. *Corrosion Science*, *51*, 2429-2442.

European General Galvanizers Association. (2013). Salt spray testing - why it should not be used to compare different types of coatings. In.

Gao, X., Li, W., & Ma, H. (2017). Effect of anti-corrosive performance, roughness and chemical composition of pre-treatment layer on the overall performance of the paint system on cold-rolled steel. *Surface & Coating Technology* *329*, 19-28.

Hunter Associates Laboratory Inc. Measuring Color using Hunter L, a, b versus CIE 1976 L\*a\*b\*. *Application Note*.

Ichinose, M., Inoue, T., & Sakamoto, Y. (2009). Long-term performance of high-reflectivity exterior panels. *Building and Environment*, *44*, 1601-1608.

Mariappan, T., Kamble, A., & Naik, S. M. (2019). An investigation of primer and topcoat compatibility on the waterborne intumescent coating to structural steel. *Progress in Organic Coating*, *131*, 371-377.

Nguyen, T. V., Le, X. H., Dao, P. H., Decker, C., & Nguyen-Tri, P. (2018). Stability of acrylic polyurethane coatings under accelerated aging tests and natural outdoor exposure: The critical role of the used photo-stabilizers. *Progress in Organic Coating*, *124*, 137-146.

Takebayashi, H., Miki, K., Sakai, S., Marata, Y., Matsumoto, T., Wada, S., & Aoyama, T. (2016). Experimental extermination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging. *Energy and Buildings*, *114*, 173-179.

U.S. Green Building Council. (2018). LEED v4 for Building Design and Construction.

Upadhyay, V., Allahar, K. N., & Bierwagen, G. P. (2014). Environmental humidity influence on a topcoat/Mg-rich primer system with embedded electrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *193*, 522-529.

Wood, K. A. (2014). How can we effectively use accelerated methods to predict the decorative properties of PVDF-based coatings? - A practical approach. *Progress in Organic Coating*, *77*, 2140-2146.

Yang, X. F., Tallman, D. E., Bierwagen, G. P., Croll, S. G., & Rohlik, S. (2002). Blistering and degradation of polyurethane coatings under different accelerated weathering

tests. *Polymer Degradation and Stability* 77, 103-109.

Zhang, W., Song, Z., Shi, Y., Song, J., Qu, J., Qin, J., . . . Xue, X. (2013). The effects of manufacturing processes and artificial accelerated weathering on the solar reflectance and cooling effect of cool roof coatings. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 118, 61-71.

กระทรวงพลังงาน. (2542). หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร.

พงษ์พิชญ์ จงศุภางครัตน์. (2554). การพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

วัศพล อีรวนพันธ์. (2558). แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารเรียนคณะ

สถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2545). มอก.2131-2545 เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบสังกะสีโดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2559). มอก.2753-2559 เหล็กกล้าทรงแบนรีดเย็นเคลือบอะลูมิเนียม ๕๕% ผสมสังกะสี โดยกรรมวิธีจุ่มร้อนและเคลือบสี.

อภิชญา อธิคมบัณฑิตกุล. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุหลังคาที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและฉนวนกันความร้อนทั่วไป. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนพล ไคร้งาม
วัน เดือน ปี เกิด	15 กรกฎาคม 2528
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผลงานตีพิมพ์	6th Building Technology Alliance Conference on Energy and Environment



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY