

การจำลองการเสื่อมสภาพของสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอ
ประวิติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เกิดจากแสงและความชื้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF DETERIORATION OF PIGMENTS IN THE ROYAL PAINTING OF KING
RAMA V AND HIS QUEEN AT MEMORIAL HALL OF CHULALONGKORN UNIVERSITY
CAUSED BY LIGHT AND HUMIDITY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการเสื่อมสภาพของสารสีในพระบรม สาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอ ประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เกิดจากแสงและ ความชื้น
โดย	น.ส.เดือนเต็มดวง เดชสุภา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิถรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุพิพัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ สุธีรัตนาภิรมย์)

เดือนเต็มดวง เดชสุภา : การจำลองการเสื่อมสภาพของสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และ
พระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เกิดจากแสงและความชื้น. (SIMULATION OF
DETERIORATION OF PIGMENTS IN THE ROYAL PAINTING OF KING RAMA V AND HIS QUEEN AT
MEMORIAL HALL OF CHULALONGKORN UNIVERSITY CAUSED BY LIGHT AND HUMIDITY) อ.ที่
ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พิชญดา เกตุเมฆ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพิณจรธรรม

สภาพแวดล้อมเป็นหนึ่งในสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของงานศิลปะ ภายในพิพิธภัณฑ์จึงมีข้อกำหนด
เพื่อควบคุมปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามยังมีงานศิลปะจำนวนมากที่ไม่ได้ถูกเก็บรักษาภายในสถานที่ที่มี
การควบคุม ดังนั้นหากสามารถทำนายกระบวนการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นและมีการป้องกันแก้ไขทันที จะสามารถช่วยรักษา
งานศิลปะนั้นให้อยู่ในสภาพดีและยืดเวลาที่ต้องบูรณะออกไปได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการจำลองการเสื่อมสภาพ
ที่มีสาเหตุจากแสงและความชื้นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสี เพื่อใช้ในการติดตามการเสื่อมสภาพของ
องค์ประกอบของชิ้นงานศิลปะ โดยทดลองกับสารสีจำลองที่พบในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และ
พระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ประการแรกคือการ
วิเคราะห์สารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี
ประการที่สองคือการศึกษการเปลี่ยนแปลงของสารสีในแผ่นสีตัวอย่าง เมื่อผ่านการจำลองการเสื่อมสภาพที่ระยะเวลา
การเร่งการเสื่อมสภาพด้วยแสงที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75%
ตรวจสอบผลด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี ร่วมกับการวิเคราะห์ความต่างสีระหว่างแผ่นสี
ตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมและแผ่นสีตัวอย่างที่ผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพ ประการสุดท้ายคือการทำนายการ
เสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์ด้วยการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมการสะท้อนที่ได้จากสีในพระบรมสาทิสลักษณ์
และแผ่นสีตัวอย่าง จากผลการวิจัยที่เทียบกับแผ่นซาร์ทาสารสี CHSOS คาดว่ามีการใช้สารสีจำนวน 12 ชนิดในพระบรม
สาทิสลักษณ์ เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารสีในแผ่นสีตัวอย่างที่ผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพและแผ่นสี
ตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุม พบว่าสารสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมอินฟราเรด ได้แก่ สารสีสีต่างข้าง สารสีสี
น้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง และสารสีสีน้ำเงิน
มลายู และสารสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมรามาน ได้แก่ สารสีสีขาวไททาเนียมและสารสีสีขาวสังกะสี เมื่อ
วิเคราะห์ความแตกต่างสี พบว่าตัวอย่างสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีแนวโน้มที่จะให้ความแตกต่างสีมากกว่าตัวอย่างสีที่
ความชื้นสัมพัทธ์ 55% อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงจากการจำลองการเสื่อมสภาพนี้ยังไม่มากพอที่จะใช้ทำนายการ
เปลี่ยนแปลงในภาพพระบรมสาทิสลักษณ์ได้อย่างแม่นยำ เพียงแต่ระบุได้ว่าการเสื่อมสภาพของสารสีในพระบรม
สาทิสลักษณ์เทียบได้กับการเสื่อมสภาพมากกว่า 20 ปี ของการเก็บรักษางานศิลปะไว้ในพิพิธภัณฑ์

สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ	ลายมือชื่อ นิสิต
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6171958723 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORD: Heritage science, Pigment identification, Pigment deterioration, Museum year

Duantermdoung Dethsuphar : SIMULATION OF DETERIORATION OF PIGMENTS IN THE ROYAL PAINTING OF KING RAMA V AND HIS QUEEN AT MEMORIAL HALL OF CHULALONGKORN UNIVERSITY CAUSED BY LIGHT AND HUMIDITY. Advisor: Assoc. Prof. PICHAYADA KATEMAKE, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. PROMPONG PIENPINIJTHAM, Ph.D.

The environment is one of the most important factors affecting the deterioration of artworks, there are the regulations to control the factors causing the deterioration of works of art in museum. However, there are still many works of art that are not preserved in regulated condition. The research aimed to study the effects of the simulation of deterioration caused by light and humidity on physical and chemical properties of pigments in the artwork of the royal painting of King Rama V and his Queen at memorial hall of Chulalongkorn university. The investigations were divided into 3 parts: 1) identification of pigments used in the royal painting by technical photography and X-ray fluorescence spectroscopy 2) investigation of the difference between pigment samples in controlled conditions and in aging conditions, including exposure to light at 5, 30, 50, 70 and 100 hours under 55% and 75% RH, using infrared spectroscopy and Raman spectroscopy in cooperate with color difference. 3) estimation of the deterioration of the royal painting by comparing spectral reflectance obtained directly from royal painting and pigments sample under the simulated deterioration. The results were found that there are about 12 pigments used in royal painting. The FTIR technique indicated that the raw umber, Alizarin red, red ochre, chrome yellow, yellow ochre and Maya blue pigment were changed in chemical structure. The Raman spectroscopy shown that only the titanium white and zinc white changed. The color differences in color samples at 75%RH were higher than 55%RH. The spectral reflectance of the colors in the royal painting were difference from all the pigment sample conditions. However, these changes are not sufficiently large to accurately predict the deterioration processes. The time and/or the abruptly change of the factors caused deterioration should be increased to obtain reliable results. At least it could be estimated that the royal painting might have deteriorated more than the preservation of art in museums for 20 years based on the maximum of the simulated condition in this study.

Field of Study: Imaging Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอด และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พร้อมพงศ์ เพียรพิณิจธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือเรื่องการวิเคราะห์มาตลอดจนงานวิจัยนี้สมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุร์พิพัฒน์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ สุธีรัตนาภิรมย์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าที่ที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำงานเสมอมา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่สนับสนุนและให้กำลังใจจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เดือนเต็มดวง เดชสุภา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.	4
2.1 แนวทางในการควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่องานศิลปะ	4
2.1.1 อุณหภูมิ	4
2.1.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity หรือ RH)	4
2.1.3 แสง	5
2.1.4 มลภาวะทางอากาศ	5
2.1.5 แอมพลิจูดและสัตว์รบกวน	6
2.2 การถ่ายภาพเชิงเทคนิค (technical photography)	6

2.2.1 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (visible light photography).....	7
2.2.2 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาวและรังสียูวี (Ultraviolet reflected photography).....	8
2.2.3 การถ่ายภาพภายใต้รังสียูวี (UV fluorescence photography).....	8
2.2.4 การถ่ายภาพภายใต้รังสีอินฟราเรด (infrared photography).....	9
2.2.5 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาวโดยใช้แสงจากหลอดไฟแอลอีดี ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น (infrared fluorescence photography).....	9
2.2.6 ภาพ false color (false color photography).....	10
2.1 สารสี (pigment).....	11
2.3.1 สารสีขาวไททาเนียม (titanium white pigment).....	12
2.3.2 สารสีขาวสังกะสี (zinc white pigment).....	13
2.3.3 สารสีดำคาร์บอน (carbon black pigment).....	13
2.3.4 สารสีดำงาช้าง (ivory black pigment).....	14
2.3.5 สารสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment).....	14
2.3.6 สารสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment).....	15
2.3.7 สารสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment).....	15
2.3.8 สารสีจากดินแดง (red ochre pigment).....	15
2.3.9 สารสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment).....	15
2.3.10 สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment).....	16
2.3.11 สารสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment).....	16
2.3.12 สารสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment).....	16
2.4 สเปกโทรสโกปี (spectroscopy).....	17
2.4.1 ทฤษฎี.....	17
2.4.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation).....	17

2.4.1.2	พลังงานของโมเลกุล.....	19
2.4.1.3	การสั่นของโมเลกุล (molecular vibrations).....	21
2.4.2	อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy).....	23
2.4.2.1	รังสีอินฟราเรด (infrared radiation)	23
2.4.2.2	อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (infrared spectrometer).....	24
2.4.2.3	การใช้งานอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	24
2.4.3	รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy).....	25
2.4.3.1	การใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี	26
2.4.4	เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy)	26
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3	การทดลอง.....	30
3.	30
3.1	สารเคมี.....	30
3.2	วัสดุและอุปกรณ์	30
3.3	เครื่องมือ	32
3.4	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
3.4.1	การระบุสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์	34
3.4.1.1	การถ่ายภาพเชิงเทคนิค.....	35
3.4.1.1.1	การถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (VIS).....	36
3.4.1.1.2	UV reflected (UVR)	36
3.4.1.1.3	UV fluorescence (UVF).....	37
3.4.1.1.4	infrared fluorescence (IRF).....	38
3.4.1.1.5	infrared (IR).....	38
3.4.1.1.6	ภาพ false color.....	39

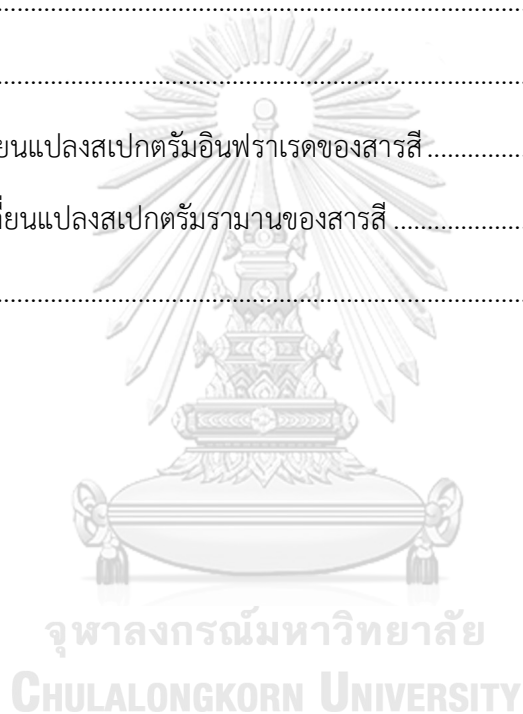
3.4.1.2 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี.....	39
3.4.2 การเตรียมแผ่นสีตัวอย่าง	40
3.4.2.1 การทำสารยัด	40
3.4.2.2 การทำตัวอย่างสี.....	40
3.4.2.3 การเร่งปัจจัยการเสื่อมสภาพของแผ่นสีตัวอย่าง	40
3.4.2.3.1 ปัจจัยทางด้านแสง	40
3.4.2.3.2 ปัจจัยทางด้านความชื้น.....	41
3.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสี.....	42
3.4.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	42
3.4.3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีด้วยรามานสเปกโทรสโกปี	42
3.4.3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีจากความแตกต่างสี.....	43
3.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	43
3.4.4.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและรามาน	43
3.4.4.2 การวิเคราะห์ความแตกต่างสี (ΔE_{2000}).....	43
3.4.5 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	45
4.	45
4.1 การระบุสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์	45
4.1.1 สีขาว.....	46
4.1.1.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	46
4.1.1.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	47
4.1.2 สีดำ.....	49
4.1.2.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	49
4.1.2.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	49

4.1.3 สีน้ำตาล.....	51
4.1.3.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	51
4.1.3.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	51
4.1.4 สีแดง.....	53
4.1.4.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	53
4.1.4.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	54
4.1.5 สีเหลือง.....	57
4.1.5.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	57
4.1.5.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	59
4.1.6 สีเขียว	61
4.1.6.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	62
4.1.6.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	62
4.1.7 สีน้ำเงิน.....	64
4.1.7.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	64
4.1.7.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	65
4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสี.....	67
4.2.1 สารสีสีขาวไททานเนียม (titanium white pigment).....	69
4.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	69
4.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	69
4.2.1.2 ความแตกต่างสี.....	71
4.2.2 สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white pigment)	71
4.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	71
4.2.2.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	71
4.2.2.3 ความแตกต่างสี.....	74

4.2.3 สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black pigment).....	74
4.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	74
4.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	74
4.2.3.3 ความแตกต่างสี.....	75
4.2.4 สารสีสีดำงาช้าง (ivory black pigment).....	75
4.2.4.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	75
4.2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	78
4.2.4.3 ความแตกต่างสี.....	78
4.2.5 สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment).....	78
4.2.5.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	78
4.2.5.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	80
4.2.5.3 ความแตกต่างสี.....	81
4.2.6 สารสีสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment).....	81
4.2.6.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	81
4.2.6.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	82
4.2.6.3 ความแตกต่างสี.....	82
4.2.7 สารสีสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment).....	83
4.2.7.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	83
4.2.7.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	85
4.2.7.3 ความแตกต่างสี.....	85
4.2.8 สารสีจากดินแดง (red ochre pigment).....	86
4.2.8.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	86
4.2.8.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน.....	87
4.2.8.3 ความแตกต่างสี.....	87

4.2.9 สารสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment)	88
4.2.9.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด	88
4.2.9.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	89
4.2.9.3 ความแตกต่างสี.....	89
4.2.10 สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment)	90
4.2.10.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด	90
4.2.10.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	91
4.2.10.3 ความแตกต่างสี	92
4.2.11 สารสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment)	92
4.2.11.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด	92
4.2.11.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	93
4.2.11.3 ความแตกต่างสี	93
4.2.12 สารสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment)	94
4.2.12.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด	94
4.2.12.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	95
4.2.12.3 ความแตกต่างสี	95
4.3 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์	95
4.3.1 สีขาว	95
4.3.2 สีดำ	98
4.3.3 สีน้ำตาล	99
4.3.4 สีแดง	101
4.3.5 สีเหลือง	104
4.3.6 สีเขียว	105
4.3.7 สีน้ำเงิน	106

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	108
5.1 สรุปผลการวิจัย	108
5.1.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด.....	108
5.1.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน	108
5.1.3 ความแตกต่างสี.....	109
5.1.4 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์.....	109
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
บรรณานุกรม.....	111
ภาคผนวก ก การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสี.....	115
ภาคผนวก ข การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสี.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	139



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 การสั้นของโมเลกุลที่สัมพันธ์กับอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี .	22
ตารางที่ 3-1 การตั้งค่ากล้องในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค.....	36
ตารางที่ 3-2 การตั้งค่าไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรมิเตอร์แบบพกพา	39
ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขการเร่งการเสื่อมสภาพของแผ่นสีตัวอย่างที่สัมพันธ์กับปัจจัยทางด้านความชื้นและแสง.....	41
ตารางที่ 3-4 การตั้งค่าฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	42
ตารางที่ 3-5 การตั้งค่างามานไมโครสโคปที่ใช้ในการทดลอง.....	43
ตารางที่ 3-6 การตั้งค่างสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	44
ตารางที่ 4-1 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีขาของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี.....	48
ตารางที่ 4-2 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีดำของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี.....	50
ตารางที่ 4-3 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีน้ำตาลของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	52
ตารางที่ 4-4 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีแดงตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	55
ตารางที่ 4-5 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีแดงตำแหน่งที่ 4 และ 5 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	56
ตารางที่ 4-6 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีเหลืองตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	60
ตารางที่ 4-7 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีเหลืองตำแหน่งที่ 4 และ 5 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	60
ตารางที่ 4-8 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีเขียวของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี.....	63

ตารางที่ 4-9 ธาตุและความเข้มในบริเวณสีน้ำเงินของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี	66
ตารางที่ 4-10 สารสีที่คาดว่าจะมีการใช้งานในพระบรมสาทิสลักษณ์	66
ตารางที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพและระยะเวลาปีพิพิธภัณฑท์ ...	95



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1 พระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ	2
ภาพที่ 2-1 รายละเอียดการถ่ายภาพเชิงเทคนิค	7
ภาพที่ 2-2 ปรากฏการณ์การเกิดอัลตราไวโอเล็ตฟลูออเรสเซนซ์	9
ภาพที่ 2-3 ปรากฏการณ์การเกิดอินฟราเรดฟลูออเรสเซนซ์	10
ภาพที่ 2-4 การทำภาพอินฟราเรดและยูวี false color	10
ภาพที่ 2-5 การแยกแยะระหว่างสีเขียวมาลาไคต์ และสีเขียวเวอร์ริเดียน ด้วยภาพอินฟราเรด false color	11
ภาพที่ 2-6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation)	18
ภาพที่ 2-7 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum)	19
ภาพที่ 2-8 (A) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก E_0 ไปยัง E_1 ด้วยคลื่นพลังงาน ($h\nu$) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐาน (B) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก E_0 ไปยัง E_2 ทำให้เกิดโอเวอร์โทน	20
ภาพที่ 2-9 แผนภาพของการกระเจิงแบบเรย์เลและการกระเจิงแบบรามาน	26
ภาพที่ 3-1 pigment checker v.5 ที่ประกอบด้วยสารสีสำคัญทางประวัติศาสตร์	32
ภาพที่ 3-2 บริเวณที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ .	35
ภาพที่ 3-3 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (VIS)	36
ภาพที่ 3-4 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ UVR	37
ภาพที่ 3-5 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ UVF	37
ภาพที่ 3-6 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ IRF	38
ภาพที่ 3-7 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ IR	39
ภาพที่ 3-8 แผ่นสีตัวอย่างประกอบไปด้วยสารสี 12 สี จำนวน 2 ชุด	40

ภาพที่ 4-1 pigment checker ภายใต้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้งหมด 6 แบบ	45
ภาพที่ 4-2 บริเวณของสีขาวยี่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	46
ภาพที่ 4-3 ตำหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของบริเวณสีขำยี่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์ ดัวย การถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS (บน) และ UVR (ล่ำง).....	47
ภาพที่ 4-4 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปีของสารสีขำยี่วี่บริเวณตำหน่งที่ 2....	48
ภาพที่ 4-5 บริเวณของสีดำที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	49
ภาพที่ 4-6 บริเวณของสีน่ำตาลที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	51
ภาพที่ 4-7 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปีของสารสีน่ำตาลบริเวณตำหน่งที่ 252	
ภาพที่ 4-8 บริเวณของสีแดงที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	53
ภาพที่ 4-9 ตำหน่งที่ 1, 2, 3 (บน) 4 และ 5 (ล่ำง) ของบริเวณสีแดงที่วี่เคราะห์หำสรสึใน	54
ภาพที่ 4-10 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปีของสารสีแดงบริเวณตำหน่งที่ 1.	56
ภาพที่ 4-11 บริเวณของสีเหลืองที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	57
ภาพที่ 4-12 ตำหน่งที่ 1 และ 2 ของบริเวณสีเหลืองที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์ ดัวยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC	58
ภาพที่ 4-13 ตำหน่งที่ 3 ของบริเวณสีเหลืองที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์ ดัวยการ ถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC.....	58
ภาพที่ 4-14 ตำหน่งที่ 4 และ 5 ของบริเวณสีเหลืองที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์ ดัวยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC	59
ภาพที่ 4-15 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปีของสารสีเหลืองบริเวณตำหน่งที่ 3	61
ภาพที่ 4-16 บริเวณของสีเขียวที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	61
ภาพที่ 4-17 ตำหน่งที่ 1 ของบริเวณสีเขียวที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์ ดัวยการ ถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, IRFC และ UVFC.....	62
ภาพที่ 4-18 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปีของสารสีเขียวบริเวณตำหน่งที่ 1	63
ภาพที่ 4-19 บริเวณของสีน่ำเงินที่วี่เคราะห์หำสรสึในพระบรมสำทิสลัษณ์	64

ภาพที่ 4-20 ตำแหน่งที่ 1, 2 (บน) และ 3 (ล่าง) ของบริเวณสีน้ำเงินที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรม
 สาทิสลักษณ์ ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC 65

ภาพที่ 4-21 สารสีสีขาวไททาเนียม สารสีสีขาวสังกะสี สารสีสีดำคาร์บอน สารสีสีด่างข้าง สารสีสี
 น้ำตาลอัมเบอร์และสารสีสีน้ำตาลไหม้ ในสภาวะควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพเป็นเวลา 5,
 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75%..... 67

ภาพที่ 4-22 สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง สาร
 สีสีเขียวโครเมียมออกไซด์และสารสีสีน้ำเงินมายา ในสภาวะควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพเป็น
 เวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75%..... 68

ภาพที่ 4-23 โครงสร้างทางเคมีของกัมอาร์บิก [24] 69

ภาพที่ 4-24 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 235 cm^{-1} ของสารสีสีขาวไททาเนียมที่สภาวะ
 ควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%. 70

ภาพที่ 4-25 I_{140}/I_{445} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีสีขาวไททาเนียม เมื่อเร่
 การเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน 71

ภาพที่ 4-26 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 438 cm^{-1} ของสารสีสีขาวสังกะสีที่สภาวะ
 ควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%. 72

ภาพที่ 4-27 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 438 cm^{-1} ของสารสีสีขาวสังกะสีที่สภาวะ
 ควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%. 73

ภาพที่ 4-28 I_{94}/I_{438} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีขาวสังกะสี เมื่อเร่การเสื่อมสภาพด้วย
 ระยะเวลาแตกต่างกัน 73

ภาพที่ 4-29 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดของพีค 1409 cm^{-1} ของสารสีสีด่างข้างที่สภาวะ
 ควบคุมและเมื่อถูกรังการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%. 76

ภาพที่ 4-30 (a) I_{971}/I_{1010} (b) I_{1409}/I_{1010} (c) I_{1597}/I_{1010} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีด่างข้าง
 77

ภาพที่ 4-31 I_{1409}/I_{1010} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีด่างข้าง..... 77

ภาพที่ 4-32(a) I_{792}/I_{1007} (b) I_{888}/I_{1007} (c) I_{1409}/I_{1007} (d) I_{1595}/I_{1007} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสี
 สีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่การเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน 79

ภาพที่ 4-33 I ₆₆₇ /I ₁₀₀₇ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	80
ภาพที่ 4-34 I ₃₈₅ /I ₁₃₅₇ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	81
ภาพที่ 4-35 โครงสร้างทางเคมีสารสีสีแดงอะลิซาริน [34]	83
ภาพที่ 4-36 (a) I ₆₀₈ /I ₁₀₁₆ (b) I ₆₄₉ /I ₁₀₁₆ (c) I ₆₆₈ /I ₁₀₁₆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีแดง อะลิซารินเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	84
ภาพที่ 4-37 (a) I ₆₀₈ /I ₁₀₁₆ (b) I ₆₄₉ /I ₁₀₁₆ (c) I ₆₆₈ /I ₁₀₁₆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีแดง อะลิซารินเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	85
ภาพที่ 4-38 I ₆₆₈ /I ₁₀₀₀ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีจากดินแดงเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	87
ภาพที่ 4-39 (a) I ₉₇₆ /I ₁₀₁₅ และ (b) I ₁₁₄₅ /I ₁₀₁₅ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีเหลืองโครเมียมเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	89
ภาพที่ 4-40 (a) I ₉₇₆ /I ₁₀₁₅ และ (b) I ₁₁₄₅ /I ₁₀₁₅ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีเหลืองโครเมียมเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	89
ภาพที่ 4-41 (a) I ₁₀₂₄ /I ₁₀₀₀ และ (b) I ₁₁₁₄ /I ₁₀₀₀ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีจากดินเหลืองเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	91
ภาพที่ 4-42 สเปกตรัมรามานของผ้าใบและสารสีจากดินเหลือง	91
ภาพที่ 4-43 (a) I ₅₆₂ /I ₁₀₁₅ และ (b) I ₆₀₆ /I ₁₀₁₅ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	93
ภาพที่ 4-44 I ₁₄₁₁ /I ₁₆₁₇ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีสีน้ำเงินมายาเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน	94
ภาพที่ 4-45 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวไททาเนียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%.....	96
ภาพที่ 4-46 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวไททาเนียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%.....	97

ภาพที่ 4-60 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงจากดินแดงที่ ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%.....	103
ภาพที่ 4-61 ความสัมพันธ์ระหว่าง K/S และ ปีพิพิธภัณฑ์ ของสารสีจากดินแดง	103
ภาพที่ 4-62 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองโครเมียมที่ ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%.....	104
ภาพที่ 4-63 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองโครเมียมที่ ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%.....	104
ภาพที่ 4-64 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองจากดิน เหลืองที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%	105
ภาพที่ 4-65 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองจากดิน เหลืองที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%	105
ภาพที่ 4-66 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเขียวโครเมียม ออกไซด์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%	106
ภาพที่ 4-67 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเขียวโครเมียม ออกไซด์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%	106
ภาพที่ 4-68 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำเงินมายาที่ ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%.....	107
ภาพที่ 4-69 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำเงินมายาที่ ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ศิลปะและมนุษย์มีความสัมพันธ์กันมาตั้งแต่ก่อนประวัติศาสตร์ ศิลปะเป็นเหมือนการเล่าเรื่องราวผ่านตัวอักษร การแสดงหรือรูปภาพ โดยแสดงถึงพัฒนาการของมนุษย์ทางด้านต่าง ๆ ทำให้การศึกษาสารสีในงานศิลปะไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เท่านั้น แต่ยังเป็นการย้อนกลับไปเพื่อเรียนรู้และเข้าใจประวัติศาสตร์ผ่านงานศิลปะอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาผ่านไปการเสื่อมสภาพของงานศิลปะก็เพิ่มขึ้นตามกาลเวลา ทั้งจากปัจจัยภายนอกและภายใน โดยสภาพแวดล้อมเป็นหนึ่งในสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของงานศิลปะ ในพิพิธภัณฑ์จึงมีการควบคุมปัจจัยเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ การเปลี่ยนแปลงความชื้น แสงและอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย อาจทำลายงานศิลปะได้ สภาการพิพิธภัณฑ์ระหว่างชาติ หรือ ICOM (International Council of museums) จึงได้กำหนดมาตรฐานสภาพแวดล้อมในพิพิธภัณฑ์ผ่านแถลงการณ์ ICOM-CC 2014 ให้ใช้สภาพแวดล้อมที่กำหนดโดยสถาบันเพื่อการอนุรักษ์วัฒนธรรมแห่งออสเตรีย หรือ AICCM (Australian Institute for the Conservation of Cultural Material) [1, 2] โดยให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอยู่ระหว่าง 40%-55% ที่ความแปรปรวนไม่เกิน 5% ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ จึงควรควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 15-25 องศาเซลเซียส ไม่เช่นนั้นงานศิลปะอาจดูดซับความชื้น ทำให้เกิดการร้าวของชิ้นงานได้ นอกจากนี้ แสงยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานศิลปะเกิดการซีดจาง เนื่องจากแสงขาว (visible light) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation) หรือรังสียูวีส่งผลต่อสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุในงานศิลปะ โดยปริมาณ ซึ่งหมายถึงความเข้มและระยะเวลาที่โดนแสงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการซีดจาง ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้งานศิลปะไม่ควรโดนแสงเกิน 50 ลักซ์ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง และไม่เกิน 200,000 ลักซ์ใน 1 ปี สำหรับงานศิลปะที่มีวัสดุประกอบด้วยกระดาษและสิ่งทอ และไม่เกิน 200 ลักซ์ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง สำหรับงานสีน้ำมัน แต่ยังมีงานศิลปะจำนวนมากไม่ได้เก็บรักษาในพิพิธภัณฑ์หรือสถานที่ที่มีการควบคุมสภาพการเก็บรักษาตามข้อกำหนดของพิพิธภัณฑ์ การเสื่อมสภาพสามารถเกิดขึ้นจากชั้นวัสดุด้านในที่มองไม่เห็น หรือจากวัสดุด้านนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทีละน้อยและไม่สามารถสังเกตเห็นได้ หากทราบว่ากระบวนการเสื่อมสภาพกำลังเริ่มเกิดขึ้นและมีการป้องกันแก้ไขทันทีจะช่วยรักษาให้ชิ้นงานนั้นอยู่ได้นานขึ้นโดยไม่ต้องบูรณะ

งานวิจัยนี้จึงสนใจการติดตามการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบของชิ้นงานศิลปะ โดยจำลองการเสื่อมสภาพของสารสีที่มีสาเหตุมาจากแสงและความชื้น ในที่นี้ศึกษาเฉพาะสารสี โดยการเก็บ

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดและรามาน ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี ร่วมกับการวิเคราะห์การสะท้อนแสงของสารสี โดยทดลองกับสารสีชนิดที่พบในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทั้งนี้จะวิเคราะห์และระบุชนิดสารสีในงานศิลปะด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี จากนั้นจึงจะแยกศึกษาปัจจัยแสงและความชื้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของสารสี เพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเสื่อมสภาพ



ภาพที่ 1-1 พระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ
ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการจำลองการเสื่อมสภาพที่มีสาเหตุจากแสงและความชื้นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลของแสงและความชื้นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสี โดยจำลองการเสื่อมสภาพของสารสีที่พบในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากการวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค (technical photography) และเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) ซึ่งได้แก่

- สารสีสีขาวไททาเนียม (titanium white pigment)
- สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white pigment)
- สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black pigment)
- สารสีสีดำงาช้าง (ivory black pigment)
- สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment)
- สารสีสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment)
- สารสีสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment)
- สารสีจากดินแดง (red ochre pigment)
- สารสีสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow titanium pigment)
- สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment)
- สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment)
- สารสีสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment)

สารสีแต่ละชนิดจะถูกผสมกับกัมอาร์บิกในอัตราส่วน 80:20 ก่อนทาลงบนผ้าใบคอตตอน และนำเข้าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เป็นเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% และอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส รวมทั้งหมด 10 สภาวะ จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารสีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) และความแตกต่างสีของสารสี เมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างแบบเดียวกันที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะควบคุม สุดท้ายทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์จากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสะท้อนแสง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสี เมื่อได้รับแสงและความชื้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวทางในการควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่องานศิลปะ

สภาพแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของงานศิลปะ ทำให้พิพิธภัณฑ์ต้องควบคุมสภาพการเก็บรักษาตามข้อกำหนดมาตรฐานสภาพแวดล้อมในพิพิธภัณฑ์ผ่านแถลงการณ์ ICOM-CC 2014 ให้ใช้มาตรฐานที่กำหนดโดยสถาบันเพื่อการอนุรักษ์วัฒนธรรมแห่งออสเตรเลีย หรือ AICCM (Australian Institute for the Conservation of Cultural Material) โดยสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อสภาพของงานศิลปะแบ่งออกเป็น 5 ปัจจัยหลัก [1, 2] ได้แก่

2.1.1 อุณหภูมิ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาเคมี โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส วัสดุในงานศิลปะมีแนวโน้มที่จะเกิดการทำลายตัวเองเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กระดาษที่มีฤทธิ์เป็นกรด ยาง หรือซีเมนต์ เป็นต้น ความแปรปรวนระหว่างอุณหภูมิต่ำสุดในเวลากลางคืนและอุณหภูมิสูงสุดในเวลากลางวันอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่องานศิลปะได้มากกว่าการเปลี่ยนแปลงระหว่างฤดูกาล เนื่องจากไม่มีระยะเวลาที่เพียงพอในการปรับตัวกับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่แห้งและอบอุ่น นอกจากนี้อุณหภูมียังเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความชื้นสัมพัทธ์ โดยแปรผันตรงต่อความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นนั้นสร้างความเสียหายต่องานศิลปะมากกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว AICCM จึงกำหนดให้ควบคุมอุณหภูมิคงที่อยู่ในช่วง 15–25 องศาเซลเซียส

2.1.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity หรือ RH)

ความชื้นสัมพัทธ์คือปริมาณของไอน้ำที่อยู่ในอากาศต่อปริมาณสูงสุดของน้ำที่อากาศสามารถเก็บไว้ได้ในสภาพอุณหภูมินั้น ๆ โดยความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผันตรงตามอุณหภูมิ ซึ่งความผันผวนของความชื้นสัมพัทธ์ทำให้เกิดการทำลายกลไกของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ก่อให้เกิดความเสียหายต่องานศิลปะ โดยถ้าความชื้นสัมพัทธ์เกิน 70% อาจทำให้เกิดเชื้อราที่เป็นอันตรายต่อวัสดุในงานศิลปะ ได้แก่ *Aspergillus Niger*, *Cladosporium*, *Penicillium* และ *Stachybotry* ซึ่งเติบโตได้ด้วยออกซิเจน น้ำ และวัตถุดิบอินทรีย์ ส่วนถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 25% วัสดุอินทรีย์จะเกิดการแห้งตัว ทำให้งานศิลปะร้าวและแตกในที่สุด อย่างไรก็ตามหากความชื้นบริเวณพื้นผิวสูง เชื้อราจะเติบโตได้ดีแม้ความชื้นสัมพัทธ์โดยรอบต่ำ ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความชื้น AICCM จึงกำหนดให้ความชื้นสัมพัทธ์ในพิพิธภัณฑ์อยู่ระหว่าง 40–55%

2.1.3 แสง

แสงทุกประเภทก่อให้เกิดความเสื่อมสภาพของงานศิลปะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความยาวคลื่นสั้นและช่วงรังสียูวี เนื่องจากมีพลังงานมากกว่าช่วงความยาวคลื่นยาว เมื่อแสงกระทบกับผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งส่งผลกระทบต่องานศิลปะ ยกตัวอย่างเช่น การซีดจางของสีย้อม ความเข้มของวาร์นิช หรือความเหลืองของกระดาษ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ความรุนแรงในการทำลายไม่เทียบเท่าแสงอาทิตย์ แหล่งแสงสังเคราะห์ก็สามารถทำให้เกิดการทำลายได้เช่นกัน โดยแหล่งแสงอินแคนเดสเซนต์มีการผลิตรังสีอินฟราเรด และแหล่งแสงฟลูออเรสเซนต์มีการผลิตรังสียูวี การลดความเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นจากแสงสามารถทำได้โดยควบคุมความเข้มของแสงและระยะเวลาในการฉายแสง โดย AICCM กำหนดให้งานศิลปะที่มีความไวต่อแสงมากไม่ควรได้รับแสงเกิน 50 ลักซ์ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง และไม่เกิน 200,000 ลักซ์ใน 1 ปี โดยมีพลังงานของรังสียูวีที่ตกกระทบกับวัตถุไม่เกิน 1,500 microwatts/m² ยกตัวอย่างเช่น งานศิลปะประเภทกระดาษ สิ่งทอ และขนสัตว์ เป็นต้น และไม่เกิน 200 ลักซ์ในระยะเวลา 7 ชั่วโมง และไม่เกิน 650,000 ลักซ์ใน 1 ปี สำหรับงานที่มีความไวต่อแสงน้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่น สีน้ำมัน งานสืออะคริลิก และงานที่เคลือบด้วยแลคเกอร์ เป็นต้น โดยมีพลังงานของรังสียูวีที่ตกกระทบกับวัตถุไม่เกิน 15,000 microwatts/m²

2.1.4 มลภาวะทางอากาศ

มลภาวะทางอากาศภายนอกอาคารประกอบไปด้วยโอโซน (ozone) ในโตรเจนไดออกไซด์ (nitrogen dioxide) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) ไอของกรดซัลฟิวริก (sulphuric acid vapour) และไอของกรดไนตริก (nitric acid vapour) ที่เกิดจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งมลภาวะภายในอาคารสามารถมีปริมาณมากเทียบเท่ากับภายนอกอาคาร เว้นแต่ว่าภายในอาคารมีการติดตั้งระบบกรองอากาศ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ก่อสร้างเฟอร์นิเจอร์ภายในพิพิธภัณฑ์ยังก่อให้เกิดมลภาวะจำพวกคาร์บอนไดออกไซด์เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ไม้ พลาสติก สี สิ่งทอ เป็นต้น ผลกระทบของมลภาวะทางอากาศได้แก่

- เมื่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับไนโตรเจนไดออกไซด์รวมกับสภาพอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และทำปฏิกิริยากับวัสดุในงานศิลปะก่อให้เกิดเป็นสารประกอบเกลือ
- ก๊าซที่เป็นกรดจะทำให้วัสดุที่ทำมาจากหนังเสื่อมสภาพ และเร่งการเสื่อมสภาพของกระดาษ วัตถุอินทรีย์ และกัณฑ์อ่อนโลหะ
- โอโซนจะทำปฏิกิริยากับวัตถุอินทรีย์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และทำให้วัตถุที่มีส่วนประกอบของซัลเฟอร์แข็งและเปราะ

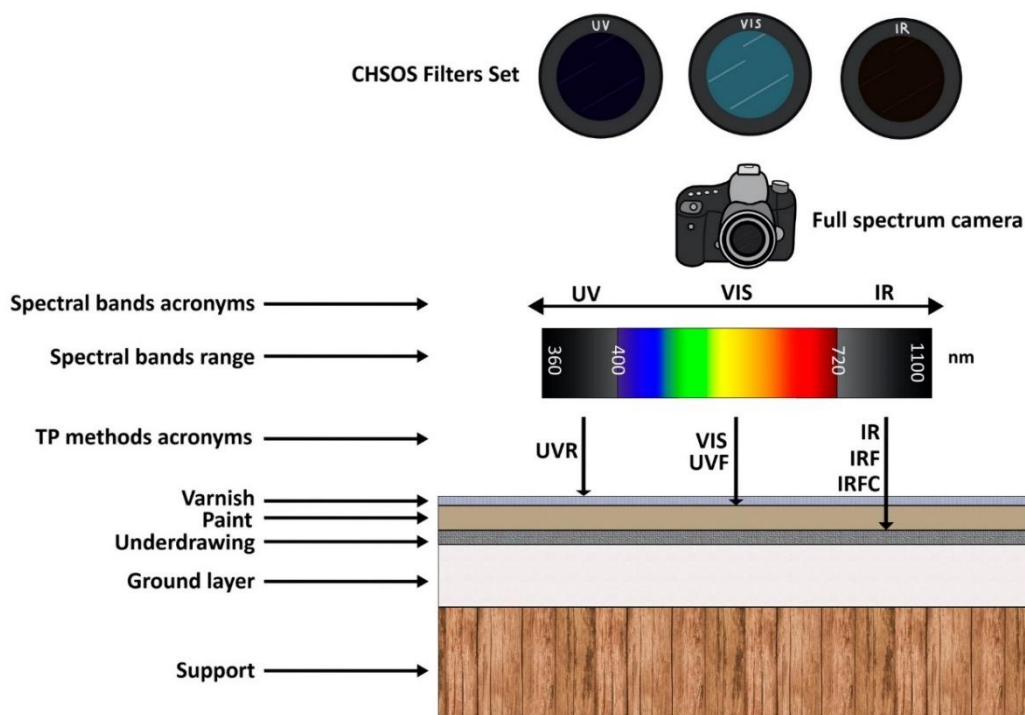
2.1.5 แมลงและสัตว์รบกวน

มีแมลงจำนวนมากที่สามารถทำลายงานศิลปะได้จากการใช้วัตถุอินทรีย์และไม้ที่เป็นส่วนประกอบของงานศิลปะเป็นแหล่งอาหาร ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ของแมลงได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสง บรรยากาศ ที่อยู่และแหล่งอาหาร เมื่อเข้าใจปัจจัยเหล่านี้ จะทำให้สามารถควบคุมปัญหาของแมลงได้

- แมลงเติบโตได้ดีในอุณหภูมิ 5-45 องศาเซลเซียส และไม่สามารถมีชีวิตรอดได้ในอุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียสและสูงกว่า 55 องศาเซลเซียส
 - ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70% เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของแมลง ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำจะช่วยชะลอการขยายพันธุ์ของแมลง ยกเว้นผีเสื้อหนอนเจาะผ้าและด้วงพรมที่ชอบสภาพแวดล้อมที่แห้ง
 - การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการลดก๊าซออกซิเจนทำให้การอัตราการบริโภคของแมลงลดลง
 - ระดับแสงและความมืดที่ต่างกันจะดึงดูดแมลงต่างสายพันธุ์กัน การควบคุมแมลงสามารถทำได้โดยกำหนดระยะเวลาของความมืดและสว่าง ซึ่งส่งผลกระทบต่อขยายพันธุ์และการจำศีลของแมลง
 - ที่อยู่ที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับแมลงบางชนิด ยกตัวอย่างเช่น แมลงสาบที่ต้องการการสัมผัสบริเวณส่วนบนและล่างของร่างกาย อาคารที่มีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องสามารถลดปัญหานี้ได้
- แมลงต้องการอาหารที่มีโภชนาการสูงในการเร่งอัตราการเจริญเติบโต นอกจากนี้ความชื้นในอาหารก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน เมื่อความชื้นลดลง จะส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของแมลง

2.2 การถ่ายภาพเชิงเทคนิค (technical photography)

การถ่ายภาพเชิงเทคนิค [3, 4] หรือบางครั้งถูกเรียกว่าภาพถ่ายมัลติสเปกตรัม รายละเอียดดังภาพที่ 2-1 เนื่องจากนำภาพที่ถ่ายจากช่วงความยาวคลื่นต่างกันมาใช้งาน เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจใช้ระบุชนิดของสารสี ทำได้โดยการถอดฟิลเตอร์กรองอินฟราเรดและยูวีที่ติดมากับกล้องถ่ายภาพออก ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์และแหล่งแสงที่ครอบคลุมขอบเขตของความยาวคลื่นตั้งแต่บริเวณ 360-1,100 นาโนเมตร



ภาพที่ 2-1 รายละเอียดการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

เนื่องจากในแต่ละภาพนั้นให้ข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนั้นการรวบรวมข้อมูลจากภาพทั้งหมดจึงเป็นวิธีการที่ประสบผลสำเร็จและให้ผลในเชิงปฏิบัติได้ดีที่สุด โดยสามารถใช้วิเคราะห์สารสีได้โดยปฏิบัติตามผังงาน 6 แบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

2.2.1 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (visible light photography)

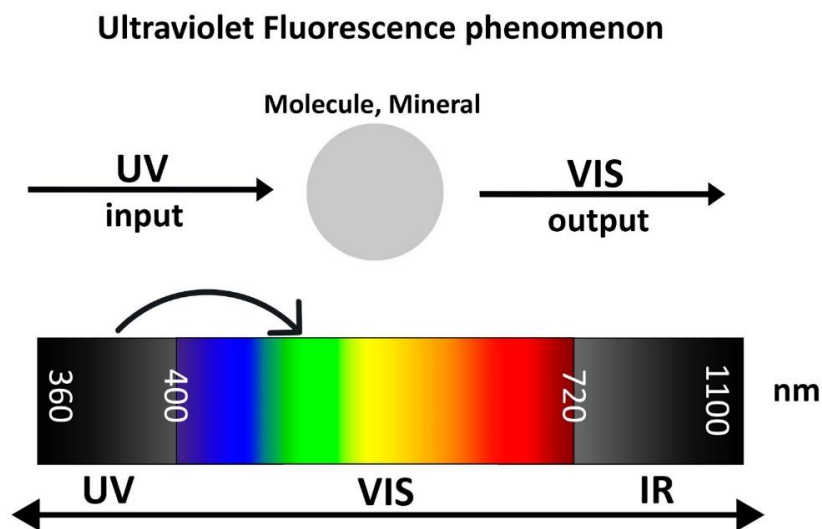
การตรวจสอบงานศิลปะและงานทางโบราณคดีเริ่มต้นจากการถ่ายภาพคุณภาพสูงในช่วงที่ตามองเห็น โดยควบคุมคุณภาพด้วยการคาลิเบรตกล้อง การชดเชยแสง สมดุลแสงสีขาว ความคมชัด ชาร์จปรับค่าสี และความละเอียด ซึ่งเรียกวิธีนี้โดยย่อว่า VIS เป็นการถ่ายภาพภายใต้แสงจากหลอดไฟฮาโลเจน ซึ่งมีความยาวคลื่นครอบคลุมช่วง 320–1100 นาโนเมตร ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ให้แสงขาวผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น โดยทำเพื่อแบ่งสารสีออกเป็น สีขาว สีดำ สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีน้ำตาล และสีแดง ตามลักษณะสีที่มองเห็น วิธีนี้สามารถใช้ควบคู่กับเทคนิคการถ่ายภาพด้วยแสงโพลาไรซ์ (polarized light photography) เพื่อลดแสงสะท้อนบริเวณผิวหน้าที่เกิดจากวาร์นิช และเทคนิคการถ่ายภาพด้วยแสงเฉียง (raking light photography) เพื่อตรวจสอบการเสริมแต่งในภาพเขียนและศึกษาเทคนิคฝีแปรงของศิลปิน

2.2.2 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาวและรังสียูวี (Ultraviolet reflected photography)

การใช้งานหลักของวิธีการนี้ เพื่อระบุและแยกแยะระหว่างสารสีสีขาวเก่าและใหม่ ซึ่งสารสีสีขาวสมัยใหม่อย่างเช่นสีขาวสังกะสีและสีขาวไททาเนียม จะดูดกลืนรังสียูวีและปรากฏภาพเป็นสีดำ ในขณะที่สารสีสีขาวเก่าอย่างเช่นสีขาวตะกั่ว จะไม่มีการดูดกลืนยูวี ทำให้ปรากฏเห็นเป็นสีขาวสว่าง จะเรียกวินี้โดยย่อว่า UVR เป็นการถ่ายภาพภายใต้แสงจากแอลอีดีช่วงแสงขาว และจากแหล่งกำเนิดรังสียูวี ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสียูวีผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น รังสียูวีทำปฏิกิริยากับส่วนพื้นผิวของภาพเขียนซึ่งได้แก่วาร์นิชที่เคลือบบนผิวหน้าภาพเขียนและสารสีที่อยู่ด้านบน เท่านั้น การดูดกลืนรังสียูวีของวาร์นิชจะส่งผลต่อความสว่างโดยรวมของภาพ ดังนั้นภาพของวาร์นิชและสารสีด้านบนจะปรากฏให้เห็นเป็นลักษณะสว่างและมีดี

2.2.3 การถ่ายภาพภายใต้รังสียูวี (UV fluorescence photography)

วัสดุในงานศิลปะบางชนิด เช่น สารสี สารยัด วาร์นิช จะปรากฏสีในช่วงแสงขาวต่างกันเมื่อฉายแสงภายใต้รังสียูวี ปรากฏการณ์นี้เรียกว่ายูวีฟลูออเรสเซนซ์ (UV fluorescence) แสดงดังภาพที่ 2-2 ซึ่งเกิดจากการสั่นของโมเลกุล เมื่อดูดกลืนรังสียูวี โมเลกุลจะถูกกระตุ้นจากระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น (ground state) ไปยังระดับชั้นพลังงานสถานะกระตุ้น (excited state) แต่เนื่องจากโมเลกุลที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานสถานะกระตุ้นไม่มีความเสถียร จึงปลดปล่อยพลังงานเพื่อกลับมายังชั้นพลังงานสถานะพื้น หรือเรียกว่าการคายโฟตอน ทำให้เกิดการร้าวแสงในช่วงพลังงานกระตุ้นจำเพาะของสารแต่ละชนิด วิธีนี้มีประโยชน์มากในการระบุการซ่อมแซมของภาพเขียน และทำให้หมึกที่เลือนรางมองเห็นได้ชัดเจนขึ้น เรียกวินี้โดยย่อว่า UVF เป็นการถ่ายภาพภายใต้แหล่งกำเนิดรังสียูวี ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงขาวผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น เช่นเดียวกับ UVR รังสียูวีทำปฏิกิริยากับส่วนพื้นผิวของภาพเขียนเท่านั้น แต่ในกรณีของ UVF วาร์นิชจะส่งผลต่อสีของภาพด้วย เนื่องจากวาร์นิชดูดกลืนรังสียูวีและแสดงฟลูออเรสเซนซ์ออกมามากกว่าสารสี ภาพที่ได้จากเทคนิคนี้สามารถปรากฏได้เป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ ไม่มีฟลูออเรสเซนซ์ สีขาว สีน้ำเงิน สีแดง สีส้ม และสีเหลือง



ภาพที่ 2-2 ปรากฏการณ์การเกิดอัลตราไวโอเลตฟลูออเรสเซนซ์

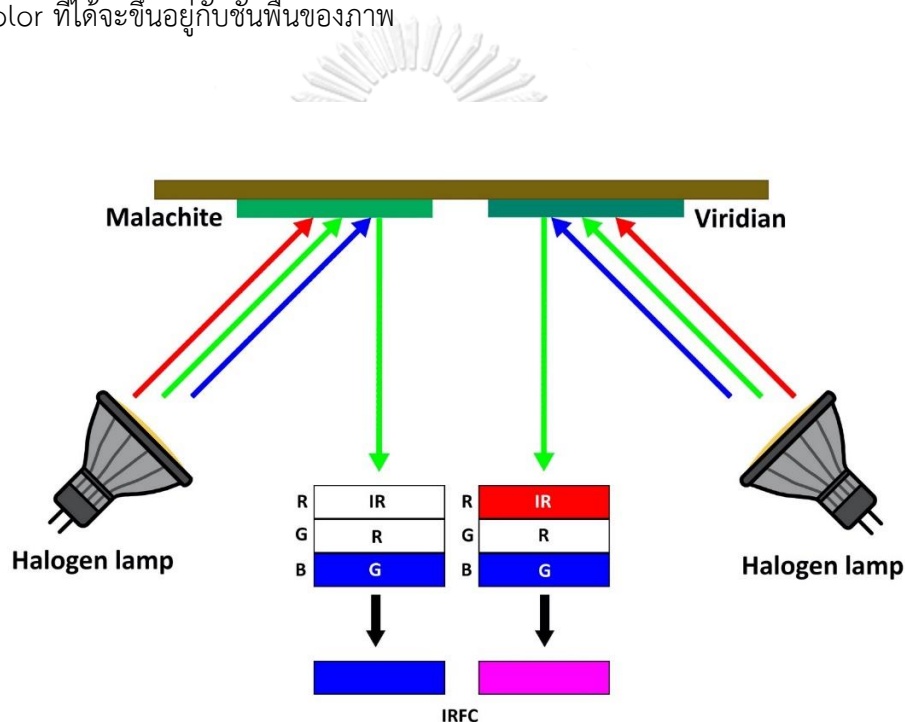
2.2.4 การถ่ายภาพภายใต้รังสีอินฟราเรด (infrared photography)

สารสีบางชนิดจะโปร่งแสงภายใต้รังสีอินฟราเรด ทำให้การถ่ายภาพภายใต้รังสีอินฟราเรดสามารถเปิดเผยเส้นร่างดินสอภายใต้ภาพได้ เรียกวิธีนี้โดยย่อว่า IR ซึ่งเป็นการถ่ายภาพภายใต้แสงจากหลอดไฟฮาโลเจน ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น ลักษณะของสารสีที่ปรากฏภายใต้อินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ โปร่งแสง สะท้อน และดูดกลืน โดยสารสีที่โปร่งแสงจะทำให้สามารถสังเกตเห็นเส้นร่างภายใต้สีได้ แต่ถ้าสารสีสามารถสะท้อนอินฟราเรด สารสีจะมีความสว่างและไม่พบเส้นร่างของภาพ ส่วนในกรณีที่สารสีดูดกลืนอินฟราเรด ภาพที่ได้จะปรากฏเห็นเป็นสีดำ

2.2.5 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาวโดยใช้แสงจากหลอดไฟแอลอีดี ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์เท่านั้น (infrared fluorescence photography)

โมเลกุลและสารสีจากแร่ขาวแสงในช่วงอินฟราเรดเมื่ออยู่ภายใต้แสงขาว ปรากฏการณ์นี้คล้ายคลึงกับการเกิดยูวีฟลูออเรสเซนซ์ เพียงแต่การเกิดอินฟราเรดฟลูออเรสเซนซ์ แสดงดังภาพที่ 2-3 โดยเกิดจากการฉายแสงขาวลงบนสารสี ก่อให้เกิดการปลดปล่อยรังสีอินฟราเรดในสารสีบางชนิด เรียกวิธีนี้โดยย่อว่า IRF มีเพียงสารสีที่ประกอบด้วยแคดเมียมและสีน้ำเงินอียิปต์เท่านั้นที่ปรากฏให้เห็นภายใต้วิธีการนี้

ภาพ false color ถูกใช้ในการระบุสารสีและแยกแยะระหว่างสีดั้งเดิมและสีใหม่ในงานศิลปะ แม้มองเห็นเป็นสีเดียวกันด้วยตาเปล่าภายใต้แสงขาว ยกตัวอย่างเช่น การแยกแยะระหว่างสีเขียวมาลาไคท์ (malachite green) และสีเขียวเวอร์ริเดียน (viridian green) ด้วยภาพอินฟราเรด false color ดังภาพที่ 2-5 อย่างไรก็ตามการระบุสารสีด้วยภาพ false color ควรใช้ควบคู่กับวิธีการวิเคราะห์อื่น ๆ เพื่อยืนยันสารสีที่ถูกต้อง เนื่องจากสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของสารสีแต่ละชนิดสามารถส่งผลกระทบต่อภาพ false color ที่แท้จริงได้ ยกตัวอย่างเช่น สีนํ้าเงินอินดิโก (indigo blue) จะปรากฏเห็นโปร่งแสงภายใต้รังสีอินฟราเรด ในขณะที่สีน้ำเงินอมฟ้าสด (phthalocyanine blue) จะมีสมบัติสะท้อนรังสีอินฟราเรดและทึบแสงในช่วงคลื่นนี้ ทำให้เมื่อพบสองสีนี้ทับกัน ภาพอินฟราเรด false color ที่ได้จะขึ้นอยู่กั้กับชั้นพื้นของภาพ



ภาพที่ 2-5 การแยกแยะระหว่างสีเขียวมาลาไคท์ และสีเขียวเวอร์ริเดียน ด้วยภาพอินฟราเรด false color

2.1 สารสี (pigment)

สารสี [5] เป็นหนึ่งในสารให้สี (colorant) ที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย แต่สามารถกระจายในตัวทำละลายได้ สารสีแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามแหล่งกำเนิดและส่วนประกอบ ได้แก่

- สารสีอนินทรีย์ (inorganic pigment) มีสมบัติทนต่อแสง อุณหภูมิ และสารเคมี นอกจากนี้ยังไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ทำให้ไม่เกิดการคายสี แต่ให้กำลังการผสม (tinting strength) ต่ำ สารสีอนินทรีย์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

- earth pigments เป็นสารสีธรรมชาติ ที่ได้จากการนำหินชนิดต่างกัน ไปบดให้ละเอียดและทำให้แห้ง
- mineral pigment เป็นสารสีที่ได้จากแร่ธาตุ
- สารสีอนินทรีย์สังเคราะห์ (synthetic inorganic pigment) เป็นสารสีที่ได้จากการตกตะกอนของปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมี 2 ชนิด
- สารสีโลหะ (metallic pigment) เป็นสารสีที่ได้จากการบดโลหะให้ละเอียด
- สารสีอินทรีย์ (organic pigment) มีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้มีสมบัติทางวิทยาศาสตร์ (rheological properties) และสมบัติทางการพิมพ์ที่ดี มีกำลังการผสมสูง ทำให้สีเข้มสดใส แต่ไม่ทนต่อแสง อุณหภูมิและอาจเกิดการคายสีได้ในตัวทำละลายบางชนิด สารสีอินทรีย์ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่
 - pigment dyestuffs เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีและไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ โดยสารสีประเภทนี้ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดเกลือ
 - โทเนอร์ (toners) เป็นสารสีที่เกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมด้วยเกลือโลหะหรือกรด ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของสีย้อม
 - เลก (lakes) เป็นสารสีที่ได้จากการตกตะกอนของสีย้อมลงบนตัวยึด (substrate) ที่เป็นสารอนินทรีย์ โดยมากนิยมใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide, $\text{Al}(\text{OH})_3$) ทำให้สีย้อมไม่ละลายในตัวทำละลาย

1.3.1 สารสีขาวไททาเนียม (titanium white pigment)

สารสีขาวไททาเนียม [6-8] ถูกผลิตขึ้นใช้เชิงพาณิชย์ในช่วงศตวรรษที่ 20 จากการพัฒนาทางอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความเสถียร มีสมบัติในการปกปิดสูงและมีสมบัติการไหลดี ไม่เป็นพิษ และเป็นสารสีขาวที่สุด ไม่เหลืองคล้ำ ทำให้สารสีขาวไททาเนียมได้รับความนิยมในการใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะใช้เป็นสารสี สารเพิ่มเนื้อหรือสารเคลือบ โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และ บรูคโคท (brookite) แต่รูไทล์จะนิยมใช้เป็นสารสีมากที่สุดเพราะมีดัชนีหักเหและความหนาแน่นสูง สารสีขาวไททาเนียมตามท้องตลาดถูกผลิตขึ้นจากหลากหลายวิธีการ ได้แก่

- การไฮโดรไลซิสของสารละลาย (sulfate process)
 - เกิดจากการใช้แร่อิลเมไนต์ (ilmenite, FeTiO_3) ที่มีส่วนผสมของไททาเนียมไดออกไซด์และเหล็ก นำมาผ่านกระบวนการการแยกส่วนประกอบของเฟอร์ริก

ไอออนออก เหลือเพียงแค่เกลือไททาเนียม จากนั้นทำการไฮโดรไลซิสให้กลายเป็นไททาเนีย (titania, TiO_2) ก่อนแยกน้ำออกเป็นไททาเนียมไดออกไซด์

- การออกซิเดชันของไอโททาเนียมเตตระฮาไลด์ (chloride process)

วิธีการนี้คิดค้นขึ้นที่ประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1950 โดยการเผาแร่ฮิลเมไนต์ กับถ่านโค้กที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดเป็นแก๊สไททาเนียมเตตระคลอไรด์ ซึ่งเกิดการควบแน่นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,500 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน จึงได้เป็นไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดรูโพล์

- การตกตะกอนจากสารละลายเตตระฮาไลด์โดยการเติมต่าง

2.3.2 สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white pigment)

สารสีสีขาวสังกะสีเป็นหนึ่งในสามของสารสีสีขาวที่นิยมในช่วงกลางถึงปลายศตวรรษที่ 20 มักถูกใช้ในสีน้ำและใช้ร่วมกับสีขาวไททาเนียมและสีขาวตะกั่วในสีน้ำมันเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแสงสำหรับงานภายนอกอาคาร เพราะดุดกสีรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี แม้ว่าจะถูกใช้มาตั้งแต่ยุคสมัยอียิปต์โบราณ แต่สารสีสีขาวสังกะสี กลับไม่ได้รับการยอมรับในแง่ของสารสีสำหรับศิลปินจนกระทั่งปลายศตวรรษที่ 18 โดยจุดประสงค์เพื่อใช้แทนสารสีสีขาวตะกั่วที่เป็นพิษ อย่างไรก็ตามความนิยมของสารสีสีขาวสังกะสีกลับลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์และสมบัติการปกปิดต่ำเมื่อใช้ในสีน้ำมัน จนในปี 1834 บริษัทวินเซอร์แอนด์นิวตัน ได้ใช้สารสีสีขาวสังกะสีในสีน้ำ ในชื่อ Chinese white ซึ่งต่อมากลายเป็นสีที่สำคัญสำหรับสีน้ำ การสังเคราะห์สารสีสีขาวสังกะสีที่นิยมในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการทางอ้อม (French process) โดยการควบคุมการเกิดออกซิเดชันของไอสังกะสีเมื่อให้ความร้อนที่ 300 องศาเซลเซียส และวิธีการทางตรง (American process) โดยการเผาแร่สังกะสีกับถ่านหิน อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางอ้อมจะให้สารสีที่บริสุทธิ์มากกว่า [7-9]

ขนาดและอนุภาคของสารสีสีขาวสังกะสีจะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของออกไซด์ ถ้าอัตราการเย็นตัวเร็ว จะได้อนุภาคที่เป็นก้อนกลม แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวช้า จะได้อนุภาคที่มีลักษณะคล้ายเข็ม (acicular zinc oxide) ที่ความยาวประมาณ 5-10 ไมโครเมตร เนื่องจากสารสีสีขาวสังกะสีมีฤทธิ์เป็นด่าง ทำให้เมื่อผสมกับสารย้อมที่มีฤทธิ์เป็นกรดสูง สารสีจะเกิดปฏิกิริยากับกรดอิสระที่อยู่ในสารย้อมเกิดเป็นสบู่ โดยเมื่อทิ้งไว้จะขุ่นขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเป็นวุ้นเหนียว (livering) ซึ่งทำให้สารสีไม่เสถียร เมื่อแห้งแล้วจะกลายเป็นฟิล์มที่แข็งและเปราะ เมื่อนำมาใช้งานจะส่งผลให้เกิดรอยแตกได้ [5]

2.3.3 สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black pigment)

สารสีสีดำคาร์บอน [7, 8] เป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปสำหรับสีดำที่เกิดขึ้นจากการเผาของก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ไม้ หรือวัตถุดิบทรีย์ สีดำคาร์บอนนั้นผลิตได้ง่าย เสถียร คงทนต่อสภาพอากาศ

และมีสมบัติปกปิดสูง เนื่องจากคาร์บอนสามารถดูดกลืนแสงได้ดี ทำให้ถูกใช้มาตั้งแต่ก่อนประวัติศาสตร์ โดยนิยมใช้ในสีน้ำมัน สีน้ำและการเขียนภาพร่าง ในปี ค.ศ. 1864 ได้มีการพัฒนาสีดำคาร์บอนให้เหมาะสมกับสีน้ำ โดยการให้ความเย็นกับควันที่ได้จากการเผาก๊าซธรรมชาติ จากนั้นบดตะกอนที่ได้ให้ละเอียด สารสีดำคาร์บอนที่ได้มีเม็ดละเอียด ทำให้กระจายในตัวกลางที่มีความหนืดต่ำได้ดี ปัจจุบันนอกจากทางด้านศิลปะ สีดำคาร์บอนยังถูกใช้ในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์และเครื่องพิมพ์เลเซอร์อีกด้วย สารสีดำคาร์บอนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมี 3 ชนิด ต่างกันที่กรรมวิธีในการผลิต ได้แก่

- แชนเนลแบล็ก (channel black) ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของแก๊สมีเทนและอีเทน โดยเผาให้เปลวไฟตกลงบนผิวหน้าแผ่นเหล็กจนเกิดเป็นผงถ่าน
- เฟอร์เนซแบล็ก (furnace black) ได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมันที่พ่นออกมา (atomized mineral oil) ในเตาอูฐที่มีอากาศต่ำ โดยเฟอร์เนซแบล็กที่ได้จากแก๊สธรรมชาติจะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง และเฟอร์เนซแบล็กที่ได้จากน้ำมันจะนำมาใช้เป็นสารสี
- เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) ได้จากการทำให้แก๊สอะเซทิลีนแตกตัวด้วยความร้อน

2.3.4 สารสีสีด่างาช้าง (ivory black pigment)

สารสีสีด่างาช้างเป็นหนึ่งในกลุ่มย่อยของสารสีสีดำคาร์บอน สารสีสีด่างาช้างประกอบไปด้วยวัตถุดิบที่ร้อยละประมาณ 60% ได้แก่ ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมงกานีสและคาร์บอนเล็กน้อย วัตถุดิบที่ร้อยละประมาณ 40% ได้แก่ คอลลาเจนและไขมันเล็กน้อย การเตรียมสารสีสีด่างาช้างทำได้โดยเผาผงช้างในภาชนะปิด หรือสามารถทดแทนด้วยกระดูกสัตว์ จึงมีอีกชื่อว่าสีดำถ่านกระดูก (bone black pigment) เมื่อผงช้างถูกเผาจนกลายเป็นถ่านแล้ว พักให้เย็นจากนั้นจึงนำมาบดให้กลายเป็นผงละเอียด สารสีสีด่างาช้างถูกพบในงานศิลปะมาตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์และมีการใช้อย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน [7, 8]

2.3.5 สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment)

สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ทำมาจากหินอัมเบอร์ ในทางธรณีวิทยา หินอัมเบอร์จัดเป็นหินตะกอนเม็ดละเอียดที่สามารถพบได้ทั่วโลก โดยมีส่วนผสมของแมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide, MnO) แมงกานีสไฮดรอกไซด์ (manganese (II) hydroxide, Mn(OH)₂) และเหล็กออกไซด์ (iron oxide, FeO) หินอัมเบอร์ที่ขุดได้จะถูกนำมาบดและล้าง โดยไม่ผ่านกระบวนการกำจัดแร่ธาตุที่อยู่ในหินออก ทำให้สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์สามารถมีได้หลากหลายเฉดสี ตั้งแต่น้ำตาลอมเหลืองไปจนถึงน้ำตาลอมเขียว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของธาตุที่พบในหินอัมเบอร์ที่นำมาทำสารสี หินอัมเบอร์ที่มี

คุณภาพสูงมาจากประเทศไซปรัส เมื่อนำมาทำสารสีจะให้สีน้ำตาลเข้มอมม่วง ศิลปินมักใช้สารสีชนิดนี้ บริเวณเงาของภาพและผสมกับสารสีอื่นเพื่อให้ได้สีผิวของมนุษย์ [7, 8]

2.3.6 สารสีสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment)

คล้ายกับสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีน้ำตาลไหม้ทำมาจากการเผาหินอัมเบอร์ใน ภาวะที่มีออกซิเจน ทำให้เกิดการคายน้ำของเหล็กไฮดรอกไซด์ (iron hydroxide, FeOH) เปลี่ยนเป็น เหล็กออกไซด์ จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด โดยยังให้สมบัติเหมือนกับสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ เพียงแต่ มีสีน้ำตาลเข้มกว่า และมีเฉดสีอมแดง [7, 8]

2.3.7 สารสีสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment)

อะลิซารินเป็นส่วนประกอบหลักที่พบได้ในพืชวงศ์เข็ม (Rubiaceae) การทำสารสีสีแดงอะลิซาริน คล้ายคลึงกับสารสีสีแดงแมดเดอร์เลก โดยใช้สารสกัดจากรากของต้นแมดเดอร์ แต่ในปี ค.ศ. 1826 นักเคมีชาวฝรั่งเศสได้ค้นพบว่าในรากของต้นแมดเดอร์มีสารให้สี 2 ชนิด ได้แก่ 1,2-ไดไฮดรอกซีแอนทราควิโนน (1,2-dihydroxyanthraquinone, $C_{14}H_8O_4$) หรือในอีกชื่อว่าอะลิซาริน (Alizarin) และ 1,2,4-ไตรไฮดรอกซีแอนทราควิโนน (1,2,4-trihydroxyanthraquinone, $C_{14}H_8O_5$) หรือเพอร์พูริน (Purpurin) เนื่องจากเพอร์พูรินนั้นเป็นสารที่ทำให้เกิดการซีดจางในสี ในปี ค.ศ. 1868 จึงได้มีการสังเคราะห์อะลิซารินขึ้นโดยนักเคมีชาวเยอรมัน และถูกใช้ในสารสีจำพวกอะลิซารินนับแต่นั้นเป็นต้นมา ข้อดีของสารสีสีแดงอะลิซารินคือมีความเสถียรและคงทนสูง เนื่องจากไม่มีส่วนผสมของสารเพอร์พูริน อย่างไรก็ตามสีที่ได้จะมีความสดและอิมิตัวน้อยกว่าสีแดงแมดเดอร์เลก สารสีสีแดงอะลิซารินนิยมใช้กับงานสีน้ำและสีน้ำมัน [6-8]

2.3.8 สารสีจากดินแดง (red ochre pigment)

สารสีจากดินแดงทำขึ้นจากดินที่มีส่วนผสมของแร่เฮมาไทต์ (hematite) ที่มีสารประกอบของเหล็ก(II)ออกไซด์ (iron(II)oxide, Fe_2O_3) นำมาล้างและบดให้ละเอียด สารสีจากดินแดงถูกพบการใช้งานตั้งแต่ปลายยุคหินเก่าสำหรับการเขียนกับผนังถ้ำ เนื่องจากแร่เฮมาไทต์ มีสมบัติเป็นชอล์กสีแดงโดยธรรมชาติ ทำให้ไม่ต้องผ่านกระบวนการสังเคราะห์ใด ๆ ต่อเนื่องมาจนถึงยุคฟื้นฟูศิลปวิทยา สารสีจากดินแดงยังคงเป็นที่นิยมสำหรับศิลปินชื่อดังจำนวนมากในการสร้างสรรค์งานประเภทจิตรกรรมฝาผนังปูนเปียก (fresco) เนื่องจากมีความเสถียรสูง คงทนต่อสภาพอากาศและใช้ได้ดีในทุกตัวกลาง สารสีจากดินแดงจะให้เฉดสีแดงและความโปร่งแสงหลากหลายระดับ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแร่ที่พบในหินเฮมาไทต์ [7, 8]

2.3.9 สารสีสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment)

เดิมทีในศตวรรษที่ 18 สารสีสีเหลืองโครเมียมทำขึ้นจากแร่โครคอยต์ (crocoite) ที่ประกอบด้วยตะกั่วโครเมต (lead chromate, $PbCrO_4$) ที่มีผลึกแบบโมนอคลินิก (monoclinic) ให้สี

เหลืองกลางไปจนถึงสีเหลืองสว่าง เมดสีเหลืองโครเมียมที่สว่างเกิดจากส่วนผสมของตะกั่วซัลเฟต (lead sulfate, $PbSO_4$) โดยมาตรฐาน ASTM D211-67 ได้แบ่งสีเหลืองโครเมียมเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- สีเหลืองพริมโรส ประกอบไปด้วยตะกั่วโครเมต 50%
- สีมะนาวเหลือง ประกอบไปด้วยตะกั่วโครเมต 65%
- สีเหลืองกลาง ประกอบไปด้วยตะกั่วโครเมต 87%

ปัจจุบันสารสีเหลืองโครเมียมถูกสังเคราะห์โดยการเติมตะกั่วแอสซิเตทหรือตะกั่วไนเทรตลงในโพแทสเซียมโครเมต ซึ่งสีที่ได้ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของสารสังเคราะห์ ถูกพบการใช้งานครั้งแรกในภาพเขียนในปี ค.ศ. 1810 โดยคาดการณ์ว่ามีการใช้อย่างแพร่หลายในท้องตลาดช่วงปี ค.ศ. 1814 สารสีเหลืองโครเมียมมีดัชนีหักเหสูง ทึบแสงและไม่เกิดการคายน้ำในตัวทำละลายต่าง ๆ แต่มีแนวโน้มที่จะซีดจางเมื่อโดนแสง และกลายเป็นสีเขียวเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของโครเมียมออกไซด์ หรือมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดจากแสงเมื่ออยู่ในภาวะขาดออกซิเจนและความชื้น [7-9]

2.3.10 สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment)

สารสีจากดินเหลืองถูกทำขึ้นจากดินที่มีส่วนผสมของเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (iron oxide hydroxide, α - $FeOOH$) หรือเรียกว่าแร่เกอไทต์ (goethite) ซึ่งเป็นแร่ที่ทำให้เกิดสีเหลืองในสารสี ถูกพบได้มากในบริเวณละติจูดสูงและมีความชื้นสูง การเตรียมสารสีจากดินเหลืองทำโดยนำดินเหนียวมาล้างและบดให้ละเอียด บางครั้งอาจนำไปเผาเพื่อให้ได้สีอื่นเช่น น้ำตาล แดงหรือม่วง ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของเหล็ก(III)ออกไซด์ สารสีจากดินเหลืองถูกพบการใช้งานตั้งแต่ยุคหินเก่าในถ้ำแถบยุโรป โดยพบการใช้งานอย่างแพร่หลายตั้งแต่อารยธรรมอียิปต์ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1920 ได้มีการสังเคราะห์สารสีจากดินเหลืองขึ้นในห้องทดลอง และให้ชื่อว่า Mars yellow ซึ่งถูกใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม ข้อดีของของสารสีจากดินเหลืองคือกระจายได้ดีในทุกตัวกลาง [7, 8]

2.3.11 สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment)

สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ประกอบด้วยโครเมียม(III)ออกไซด์ (chromium(III) oxide, Cr_2O_3) 97-98% ซึ่งได้จากการเผาโซเดียมหรือโพแทสเซียมไดโครเมตกับกำมะถันหรือคาร์บอน สารสีสีเขียวโครเมียมมีความทึบแสง ทนทานต่อกรดต่างและแสงสูง และสามารถทนความร้อนได้ถึง 1,000 องศาเซลเซียส แต่ให้สีสันทึบไม่สดใส [6-8]

2.3.12 สารสีสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment)

จากการวิจัยพบว่าสารสีสีน้ำเงินมายาทำมาจากการให้ความร้อนแร่ปาลิโกร์สไกต์ (palygorskite) ผสมกับครามที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของแร่ปาลิโกร์สไกต์และอนุภาคโลหะเหล็กนาโน ส่งผลให้ครามเกาะติดกับพื้นผิวของแร่

ซึ่งนิยมใช้สำหรับงานจิตรกรรม สถาปัตยกรรม เซรามิกและสิ่งทอในอารยธรรมมายาและเมโสอเมริกา [7, 8]

2.4 สเปกโทรสโกปี (spectroscopy)

สเปกโทรสโกปีเป็นการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสสาร แต่เดิมสเปกโทรสโกปีเป็นการศึกษาแสงขาวที่แยกตามความยาวคลื่นต่าง ๆ ด้วยปริซึม หลังจากนั้นความหมายของสเปกโทรสโกปีจึงได้ถูกปรับให้ครอบคลุมการศึกษาสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) การศึกษาสเปกโทรสโกปีมักถูกใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อระบุส่วนประกอบของสสาร โดยวิเคราะห์จากสเปกตรัมการดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานของสสารที่แตกต่างกัน [10]

2.4.1 ทฤษฎี

2.4.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในลักษณะของคลื่น โดยเป็นการรวมกันของสนามไฟฟ้าที่สั่นเป็นคาบ (oscillating electric field) และสนามแม่เหล็กสั่น (oscillating magnetic field) ที่ความเร็วคงที่ ในความถี่เดียวกันแต่ตั้งฉากกันบนสนามไฟฟ้า และเคลื่อนที่ผ่านอากาศในอัตราเร็วของแสง (2.998×10^8 m/s) โดยเดินทางเป็นพลังงานความร้อนที่เรียกว่าโฟตอนหรือควอนตัม ลักษณะคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดภาพที่ 2-6 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความยาวคลื่นและความถี่ ดังแสดงในสมการที่ 2-1

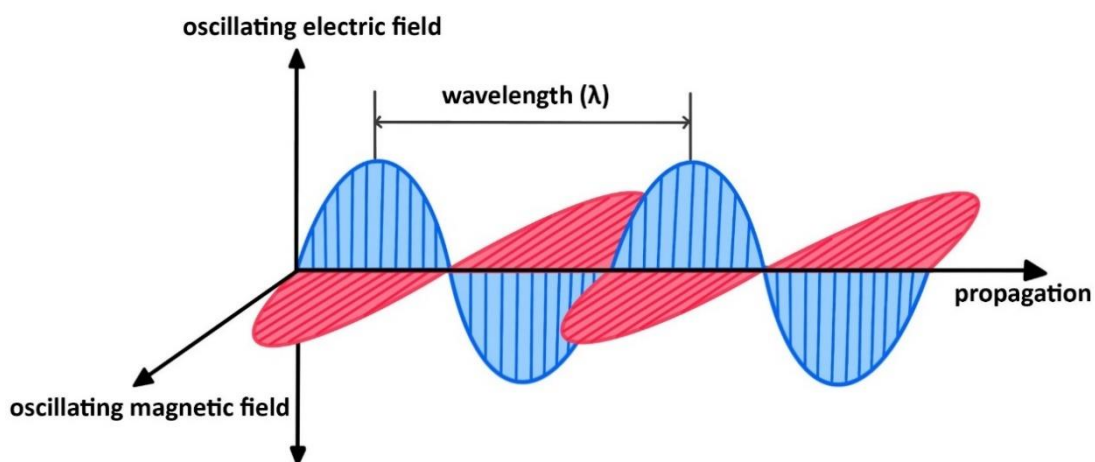
$$c = \lambda \nu$$

(2-1)

โดย c คือ ความเร็ว (velocity, m/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (wavelength, m)

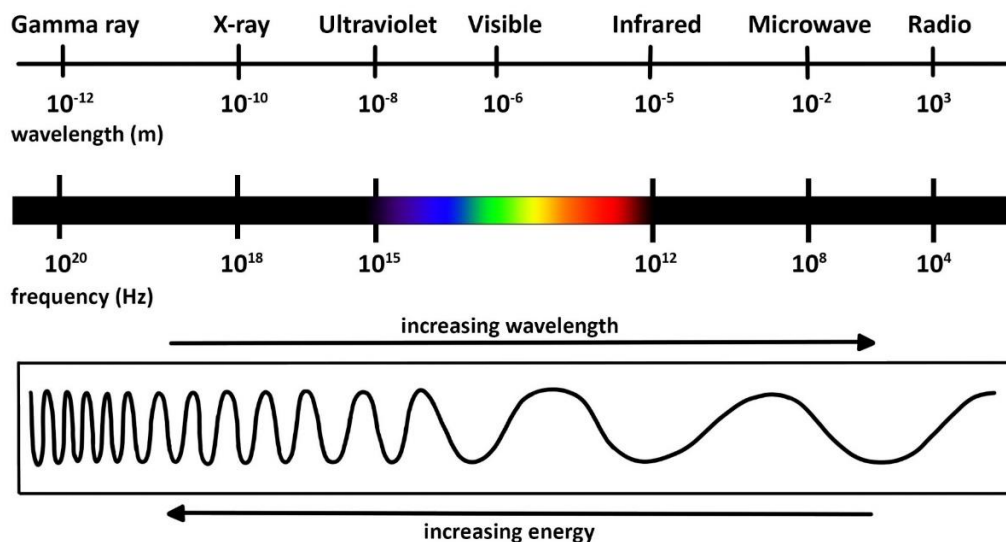
ν คือ ความถี่ (frequency, s^{-1})



ภาพที่ 2-6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation)

เนื่องจากความเร็วคงที่การเพิ่มขึ้นของความถี่จะทำให้ความยาวคลื่นลดลง หรือกล่าวคือความถี่แปรผกผันกับความยาวคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในทุกรูปแบบจะถูกจัดกลุ่มโดยขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันกลายเป็นสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) ดังภาพที่ 2-7

Electromagnetic spectrum



ภาพที่ 2-7 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum)

อนุภาคที่คล้ายคลึงกับธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะปรากฏในรูปแบบของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโฟตอนที่ก่อประจุ (ionizing photons) กับวัตถุ ปริมาณของพลังงานที่พบในโฟตอนจะเท่ากับความถี่คูณกับค่าคงตัวของพลังค์ ดังสมการที่ 2-2

$$E = h\nu \quad (2-2)$$

เมื่อ E คือ พลังงาน (energy, J)
 h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) หรือเท่ากับ $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
 ν คือ ความถี่ (frequency, Hz)

2.4.1.2 พลังงานของโมเลกุล

พลังงานของโมเลกุลเกิดจากการรวมกันของพลังงาน 4 ประเภท ดังสมการที่ 2-3

$$E = E_{ele} + E_{vib} + E_{rot} + E_{tra} + E_{nuc} \quad (2.3)$$

เมื่อ E_{ele} คือ พลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดในโมเลกุล

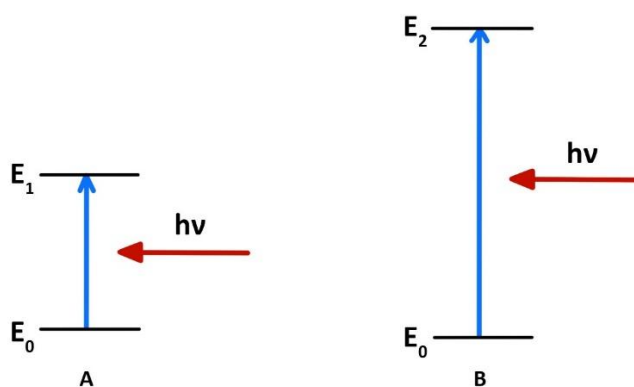
E_{vib} คือ พลังงานการสั่นของโมเลกุล

E_{rot} คือ พลังงานการหมุนของโมเลกุล

E_{tra} คือ พลังงานการเลื่อนของโมเลกุล

E_{nuc} คือ พลังงานนิวเคลียร์

เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงาน โดยจะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่น (vibrational level) และระดับพลังงานการหมุน (rotational level) เสมอ อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) และเมื่ออิเล็กตรอนคายพลังงานออกจะทำให้กลับมามีอยู่ที่สถานะพื้น ดังภาพที่ 2-8 โดยปริมาณพลังงานที่คายออกมาจะแตกต่างกันในโมเลกุลแต่ละชนิด ทำให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีได้



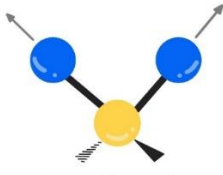
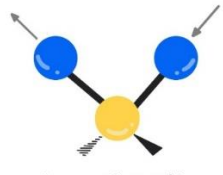
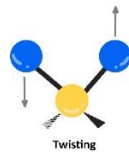

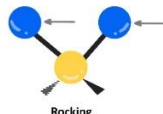
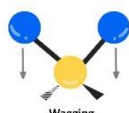
ภาพที่ 2-8 (A) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก E_0 ไปยัง E_1 ด้วยคลื่นพลังงาน ($h\nu$) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่มูลฐาน (B) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก E_0 ไปยัง E_2 ทำให้เกิดโอเวอร์โทน

2.4.1.3 การสั่นของโมเลกุล (molecular vibrations)

จากการดูดกลืนโฟตอนและทำให้เกิดการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสู่สถานะกระตุ้น ส่งผลให้อะตอมเกิดการเคลื่อน และทำให้โมเลกุลมีการเคลื่อนที่หรือหมุน ลักษณะการสั่นของอะตอมที่ต่างกันจะส่งผลต่อสเปกตรัมอินฟราเรดหรือรามาน การสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) หรือการเปลี่ยนแปลงของประจุสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ส่วนการสั่นประเภทอื่นจะต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยรามาน ดังตารางที่ 2-1 การสั่นของโมเลกุลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- การสั่นแบบยืดหด (stretching vibration) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตามแนวแกนพันธะ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างอะตอม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การยืดสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดอสมมาตร (asymmetric stretching)
- การสั่นแบบงอหรือการสั่นแบบเปี้ยวเบน (bending vibration) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของพันธะ หรือการเปลี่ยนรูป สามารถเกิดการสั่นในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบ (out-of-plane) ก็ได้ ลักษณะการสั่นแบบงอแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ การสั่นแบบบิด (twisting) การสั่นแบบกรรไกร (scissoring) การสั่นแบบแกว่ง (rocking) และการสั่นแบบกระดิก (wagging)

ตารางที่ 2-1 การสั่นของโมเลกุลที่สัมพันธ์กับอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี

การสั่นของโมเลกุล (molecular vibrations)	อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy)	รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)
การสั่นแบบยืดหด (stretching vibration)		
 <p style="text-align: center;">Symmetric stretching</p>	<p>ไม่ส่งผลต่อสเปกตรัมอินฟราเรด เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ขั้วคู่</p>	<p>ส่งผลต่อสเปกตรัมรามาน เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสภาพการเกิดขั้ว</p>
 <p style="text-align: center;">Asymmetric stretching</p>	<p>ส่งผลต่อสเปกตรัมอินฟราเรด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ขั้วคู่</p>	<p>ไม่ส่งผลต่อสเปกตรัมรามาน เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการเกิดขั้ว</p>
การสั่นแบบงอ (bending vibration)		
 <p style="text-align: center;">Twisting</p>	<p>ส่งผลต่อสเปกตรัมอินฟราเรด เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ขั้วคู่</p>	<p>ไม่ส่งผลต่อสเปกตรัมรามาน เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการเกิดขั้ว</p>
 <p style="text-align: center;">Scissoring</p>		
 <p style="text-align: center;">Rocking</p>		
 <p style="text-align: center;">Wagging</p>		

องศาอิสระ (degree of freedom) คือตัวเลขของตัวแปรที่ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค สำหรับอะตอมที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติ องศาอิสระจะเท่ากับ 3 ดังนั้นถ้ามีโมเลกุลที่มี N อะตอม องศาอิสระจะเท่ากับ $3N$ นอกจากนี้เมื่ออะตอมเชื่อมกันด้วยพันธะ จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ แต่สามารถเคลื่อนไหวในลักษณะการหมุนหรือสั่นได้ สำหรับโมเลกุลที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear molecules) การหมุนสามารถอธิบายได้ด้วยการหมุนใน 3 แกน และจะมีองศาอิสระเท่ากับ 3 และมีองศาอิสระของการสั่นเท่ากับ $3N - 6$ ส่วนโมเลกุลเชิงเส้น (linear molecule) การหมุนรอบแกนตัวเองจะไม่นับว่าเป็นการหมุน เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล ดังนั้นจึงมีองศาอิสระเท่ากับ 2 และองศาอิสระของการสั่นเท่ากับ $3N - 5$

2.4.2 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ศึกษาผลกระทบของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง $400-4,000 \text{ cm}^{-1}$ อาศัยหลักการการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการสั่นของพันธะเคมีภายในโมเลกุล ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ โดยพันธะที่ต่างกันต้องการพลังงานที่ต่างกันเพื่อก่อให้เกิดการสั่น อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะรายงานผลออกเป็น อินฟราเรดสเปกตรัม (infrared spectrum) ซึ่งบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างเวฟนัมเบอร์และการดูดกลืนของโมเลกุล

2.4.2.1 รังสีอินฟราเรด (infrared radiation)

รังสีอินฟราเรดถูกคิดค้นโดยเซอร์วิลเลียม เฮอร์เชล ในปี ค.ศ. 1800 ในขณะนั้นเฮอร์เชลได้ศึกษาเกี่ยวกับระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นของแสงในช่วงแสงขาว เฮอร์เชลพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจากช่วงสเปกตรัมสีน้ำเงินไปจนถึงสีแดง โดยคาดว่าอุณหภูมิจะคงที่เมื่อเลยช่วงแสงขาว อย่างไรก็ตามอุณหภูมิกลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงใต้สเปกตรัมแดง หรือต่อมาถูกเรียกว่าช่วงรังสีอินฟราเรด (infrared radiation, IR) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็น รังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 5 ช่วงคลื่น ได้แก่

- near-infrared (NIR) ที่ $750-1400$ นาโนเมตร มักใช้ในการระบุการดูดกลืนของน้ำ และการโทรคมนาคมผ่านไฟเบอร์ออปติก เนื่องจากมีการสูญเสียตัวกลางที่เป็นซิลิกาน้อยและตัวขยายภาพมีความไวต่อช่วงความถี่นี้ นอกจากนี้ในแง่ของสเปกโทรสโกปี near-infrared spectroscopy ยังใช้เพื่อศึกษาไอเวอร์โทนและผลรวมการสั่น (combination vibration)
- short-wavelength infrared (SWIR) ที่ $1400-3000$ นาโนเมตร สามารถพบการดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้นได้ชัดเจนในช่วง 1450 นาโนเมตร นอกจากนี้ในช่วง $1,530-1,560$ นาโนเมตรยังเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการโทรคมนาคมระยะไกล

- mid-infrared (MIR) ที่ 3000–8000 นาโนเมตร ในทางสเปกโทรสโกปี mid-infrared spectroscopy ถูกใช้ในการศึกษาการสั่นหลักมูล (fundamental vibration) และการหมุนและสั่นสะเทือนของโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็ก
- long-wavelength infrared (LWIR) ที่ 8000–15000 นาโนเมตร หรือเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่าช่วงอินฟราเรดความร้อน (thermal infrared) เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพความร้อน (thermal imaging) ซึ่งเซนเซอร์สามารถจับวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง
- far-infrared (FIR) ที่ 15000–1000000 นาโนเมตร ในทางสเปกโทรสโกปี far-infrared spectroscopy ถูกใช้ในการศึกษาการสั่นของอะตอมชนิดหนัก

2.4.2.2 อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (infrared spectrometer)

อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1835 ต่อเนื่องมาจนถึงปี ค.ศ. 1900 อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ได้กลายเป็นอุปกรณ์สำคัญในการระบุลักษณะทางเคมีของวัตถุ เนื่องจากเป็นเทคนิคทางเคมีกายภาพ ที่ไม่ก่อให้เกิดการทำลายตัวอย่าง ยกตัวอย่างเช่น กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid, R-COOH) แสดงพีคที่ 1700 cm^{-1} และใกล้กับ 3500 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นตามแนวแกนของ C=O และ O-H ต่อมาในปี ค.ศ. 1950 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีได้ถูกพัฒนาให้ใช้ได้กับโมเลกุลที่ความซับซ้อนยิ่งขึ้น อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบดั้งเดิม (classic infrared spectrometer) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) ต่างกันที่การทำงานของอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์แบบดั้งเดิมจะใช้ปริซึมหรือเกรตติงในการแยกแสง แต่ในฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ จะใช้ไมเคิลสันอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michelson interferometer) เป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้สามารถระบุสเปกตรัมการดูดกลืนของตัวอย่างได้แม่นยำยิ่งขึ้น

2.4.2.3 การใช้งานอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีที่ไม่ทำให้เกิดการทำลายตัวอย่าง ถูกใช้ในงานทางเคมีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการระบุลักษณะของโมเลกุล เนื่องจากสเปกตรัมอินฟราเรดนั้นเป็นเหมือนลายนิ้วมือของโมเลกุลต่าง ๆ โดยมีประโยชน์เนื่องจากสามารถใช้ในการระบุโครงสร้างของโมเลกุลที่ความซับซ้อนและมีฐานข้อมูลอ้างอิงจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น โพรตีน ดีเอ็นเอและเนื้อเยื่อ เป็นต้น นอกจากนี้อินฟราเรดสเปกโทรสโกปียังนิยมใช้ในงานภาคสนาม เนื่องจากมีขนาดเล็กพกพาได้ง่าย

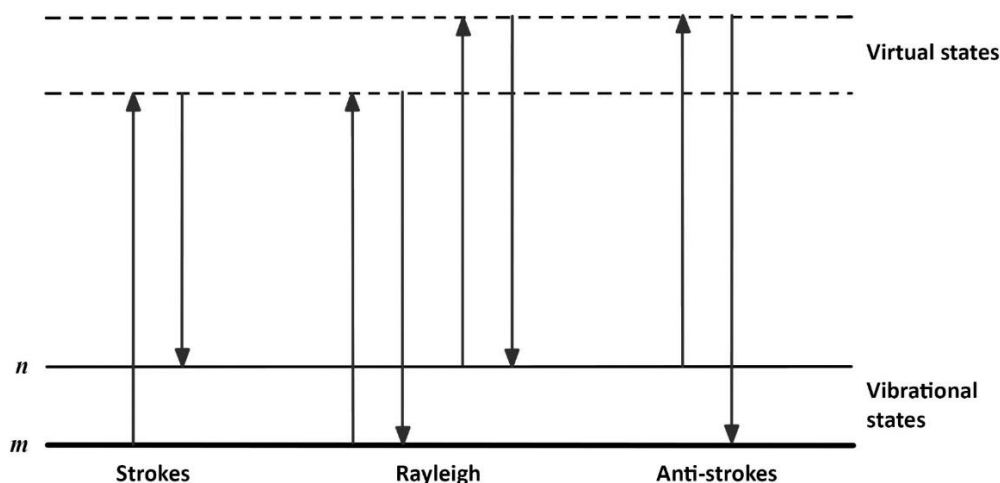
2.4.3 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)

ปรากฏการณ์การกระเจิงแสงแบบไม่ยืดหยุ่นถูกทดลองครั้งแรกในปีค.ศ. 1928 โดยรามานและคริสแนน ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาได้มีการเรียกเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์นี้ว่ารามานสเปกโทรสโกปี [11]

โดยปกติแล้วในอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ช่วงความถี่ที่ครอบคลุมพลังงานอินฟราเรดทั้งหมดจะถูกฉายไปยังตัวอย่าง เมื่อพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบสอดคล้องกับช่องว่างพลังงานระหว่างสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นของโมเลกุล โมเลกุลอาจดูดกลืนโฟตอน ทำให้เคลื่อนจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น ซึ่งอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีคือการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนพลังงานที่ได้จากการวัดปริมาณพลังงานที่สูญเสียไป ในทางกลับกัน รามานใช้หลักการการกระเจิงแสงเป็นหลัก ในกรณีนี้โฟตอนไม่จำเป็นต้องมีพลังงานสอดคล้องกับระดับพลังงานของโมเลกุล โดยใช้รังสีความถี่เพียงความถี่เดียวฉายไปยังวัตถุ ในการกระเจิงแสงของรามาน แสงจะทำปฏิกิริยากับวัตถุและเกิดการโพลาไรซ์ ทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเกิดสถานะสั้น ๆ ที่เรียกว่า สถานะเสมือน (virtual state) ที่ไม่เสถียร ส่งผลให้โฟตอนเกิดการคายพลังงาน พลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปที่พบจากการสั่นของโมเลกุล เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่นิวเคลียร์ (nuclear motion) ในกรณีที่มีเพียงกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดการโพลาไรซ์ โฟตอนจะกระเจิงและเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่เพียงเล็กน้อย เรียกการกระเจิงนี้ว่าการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) ซึ่งเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ หรือเรียกในอีกชื่อว่า การกระเจิงแบบเรย์เล (Rayleigh scattering) อย่างไรก็ตามหากมีการเคลื่อนที่นิวเคลียร์เข้ามาเกี่ยวข้อง พลังงานจะถูกส่งผ่านโฟตอนไปยังโมเลกุลที่ตกกระทบ หรือในทางกลับกันจากโมเลกุลสู่โฟตอน และทำให้พลังงานระหว่างโฟตอนที่กระเจิงกับโฟตอนที่ตกกระทบแตกต่างกัน ในกรณีนี้จะเรียกการกระเจิงนี้ว่า การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) หรือในอีกชื่อว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) อย่างไรก็ตาม การกระเจิงแบบรามานสามารถพบได้น้อยมาก เพียงหนึ่งใน 10^6-10^8 ของโฟตอนที่เกิดการกระเจิง ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน การเก็บข้อมูลรามานไม่ใช่เรื่องยาก เพียงแต่การใช้พลังงานสูงในรามานอาจส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของตัวอย่างหรือการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

สถานะเสมือนจะถูกสร้างขึ้นเมื่อเลเซอร์ป้อนพลังงานและทำให้เกิดการโพลาไรซ์ ดังนั้นพลังงานของสถานะเสมือนจะเท่ากับความถี่ของเลเซอร์ที่ใช้ ดังภาพที่ 2-9 การกระเจิงแบบเรย์เลจะให้พลังงานที่สูงที่สุด เนื่องจากโฟตอนส่วนมากมีการกระเจิงในลักษณะนี้ โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน เนื่องจากสุดท้ายแล้วอิเล็กตรอนจะกลับมายังระดับพลังงานเดิม ส่วนการกระเจิงแบบรามาน โมเลกุลมีการดูดกลืนพลังงานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะพื้น (m) ไปยังสถานะกระตุ้น (n) เรียกว่าการกระเจิงแบบสโตคส์ (stokes scattering) อย่างไรก็ตามในบางโมเลกุลที่มีพลังงานความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง อิเล็กตรอนจะอยู่ที่สถานะกระตุ้น (n) ตั้งแต่นั้น ทำให้

เมื่อเกิดการกระเจิงอิเล็คตรอนจะตกลงมายังสถานะพื้น (m) เรียกว่าการกระเจิงแบบแอนติสโตคส์ (anti-stokes scattering) แต่ตามปกติแล้วโมเลกุลส่วนมากจะอยู่ในระดับพลังงานต่ำที่สุดภายใต้ อุณหภูมิห้อง ทำให้การกระเจิงแบบแอนติสโตคส์เกิดได้น้อย โดยอัตราการเกิดแปรผันตรงกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 2-9 แผนภาพของการกระเจิงแบบเรย์เลและการกระเจิงแบบรามาน

2.4.3.1 การใช้งานรามานสเปกโทรสโกปี

ในอดีตรามานสเปกโทรสโกปีถูกใช้ในการวิเคราะห์สารอนินทรีย์ แต่ในปัจจุบันการวิเคราะห์ด้วยรามานได้ขยายขอบเขตครอบคลุมการวิเคราะห์ทางพอลิเมอร์ เกล็ดขรุขระ เทคโนโลยีชีวภาพ นิติวิทยาศาสตร์และโบราณคดี ในทางโบราณคดี วัตถุที่นำมาศึกษามักจะเป็นสิ่งที่มีมูลค่า ทำให้การทำลายตัวอย่างแม้เพียงเล็กน้อยอาจเกิดปัญหาได้ รามานสเปกโทรสโกปีจึงเข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากรามานสเปกโทรสโกปีสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เล็กขนาดไมโครด้วยเทคนิคคอนโฟคอล (confocal techniques) และไม่เพียงแต่ให้ข้อมูลของสารที่ใช้เท่านั้น เมื่อใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้วิเคราะห์ผลร่วมกับความรู้ทางประวัติศาสตร์ ยังทำให้รู้ถึงอายุของตัวอย่าง และสามารถแยกระหว่างงานต้นฉบับกับส่วนที่บูรณะได้อีกด้วย

2.4.4 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-ray fluorescence spectroscopy)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ด้วยแหล่งพลังงานสูง เช่น ลำแสงอิเล็คตรอนหรือรังสีเอกซ์ อนุภาคที่พลังงานสูงสามารถให้พลังงานกับอิเล็คตรอนในอะตอมเพียงพอต่อการเลื่อนจากระดับพลังงานภายในสู่ระดับพลังงานภายนอกที่สูงขึ้น หรือแม้แต่ทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น ในการทำให้อะตอมเกิดความ

เสถียร อิเล็กตรอนในระดับพลังงานวงนอก (outer shell) จะลดระดับพลังงานลงมาในวงใน (inner shell) เพื่อเติมเต็มระดับพลังงานให้เต็ม การปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอนวงในจะเพียงพอต่อการเกิดโฟตอนรังสีเอกซ์ พลังงานของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจะแปรผันตรงกับเลขอะตอมและแปรผกผันกับความยาวคลื่น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในอะตอมของแต่ละธาตุมีความแตกต่างกัน ทำให้เกิดสเปกตรัมของรังสีที่ได้จากการวัดความเข้มของรังสี ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด สเปกตรัมของรังสีประกอบไปด้วยเส้นของรังสีเอกซ์ที่มีความถี่และพลังงานจำเพาะที่สอดคล้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในอะตอม เรียกว่า รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic X-rays) ความเข้มของแต่ละเส้นจะเป็นสัดส่วนกับความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ภายในอะตอม กล่าวคือ ที่ว่างในระดับชั้นพลังงาน K จะถูกเติมด้วยอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงาน L มากกว่า M ทำให้ความเข้มของรังสีที่ได้จากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้น L ไปยัง K มากกว่าความเข้มที่ได้จากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้น M ไปยัง K อย่างไรก็ตามจำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากการเกิดการแตกตัวของไอออนมีจำนวนมาก ทำให้บางครั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไม่มีนัยสำคัญต่อความเข้ม

การรายงานผลของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีจะอธิบายเส้นเอกซเรย์ที่ต่างกันด้วยตัวอักษรของระดับชั้นพลังงานที่ว่าง ตามด้วยอักษรกรีกที่แสดงถึงระดับชั้นพลังงานที่ให้อิเล็กตรอน โดยถูกใช้ในการระบุธาตุที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 4 (beryllium, Be) ไปจนถึง 92 (Uranium, U) ที่ความเข้มตั้งแต่ $0.1 \mu\text{g}^{-1}$ เป็นต้นไป [12, 13]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cosentino [3] เสนอการใช้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเพื่อระบุสารสีในงานศิลปะ โดยสร้างผังงานทั้งหมด 8 แบบ ขึ้นจาก 4 ช่วงคลื่น เมื่อใช้กล้องที่ถูกดัดแปลงสำหรับช่วงรังสีอินฟราเรด แสงขาว และรังสียูวี ได้แก่ รังสียูวี (360–400 นาโนเมตร) แสงขาว (400–780 นาโนเมตร) รังสีอินฟราเรด (780–1100 นาโนเมตร) และอินฟราเรดรีเฟล็กโตกราฟี (1000–1700 นาโนเมตร) ซึ่งผังงานจะได้ประโยชน์มากที่สุดเมื่อใช้กับสารสีที่ไม่มีการผสมกับสารสีอื่น ทำให้สามารถแยกสารสีจำนวน 58 ชนิดออกจากกัน ซึ่งการแสดงผลของสารสีแต่ละวิธีการจะแตกต่างกัน ทำให้ท้ายที่สุดแล้วสามารถระบุสารสีได้จากความต่างนั้น จากนั้น Cosentino และคณะ [14] ได้นำการถ่ายภาพเชิงเทคนิคไปใช้ในจิตรกรรมฝาผนังใน Aci Sant'Antonio ที่แคว้นซิซิลี ประเทศอิตาลี โดยได้แสดงถึงประโยชน์ของการถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่สามารถให้ข้อมูลของการบูรณะและเทคนิคการวาดที่ศิลปินใช้ในงานศิลปะ โดยใช้เลนส์มุมกว้างในการถ่ายภาพจากงานในสถานที่จริง จากนั้นใช้การต่อภาพเพื่อให้ได้ความละเอียดและแก้ไขการบิดเบี้ยวของภาพ

Feller [15] แบ่งระดับความเสถียรของวัสดุต่อเสถียรภาพทางเคมีของแสงเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับ C เป็นวัสดุที่มีความไวต่อแสงสูง และเกิดการเสื่อมสภาพในระยะเวลาน้อยกว่า 20 ปีเมื่อเก็บรักษาในพิพิธภัณฑ์ ระดับ A เป็นวัสดุที่มีความทนทานสูง ซึ่งจะเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพในระยะเวลา มากกว่า 100 ปี เป็นต้นไป สุดท้าย ระดับ B เป็นวัสดุที่อยู่ระหว่างทั้ง 2 ระดับ โดยมีระยะเวลาการเสื่อมสภาพระหว่าง 20-100 ปี การเร่งระยะเวลาของวัสดุสามารถทำได้โดยการฉายแสงที่มีความเข้มสูงกว่าปกติลงบนตัวอย่าง โดยมีวัตถุประสงค์หลักสามประการ ได้แก่ เพื่อย่นระยะเวลาในการทดสอบความเสถียรทางเคมีหรือความทนทานทางกายภาพ เพื่อประเมินศักยภาพของวัสดุในระยะยาว และเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพ เพื่อศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับวัสดุ โดย Saunders [16] ได้ตั้งสมมติฐานว่าการฉายแสงความเข้มสูงลงบนวัตถุในระยะเวลาสั้นจะสอดคล้องกับการเก็บรักษาวัตถุไว้ในพิพิธภัณฑ์ในระยะยาว สมมติฐานนี้แต่เดิมถูกอธิบายในปี 1862 โดยหลักการแลกเปลี่ยน (reciprocity principle) ของ Bunsen และ Roscoe ที่ศึกษาความดำของกระดาษอัดภาพภายใต้ระดับแสงที่แตกต่างกัน โดยสร้างระดับเทียบเคียงที่ 1-50 พบว่าความเข้มของแสง 1 ที่เวลา 50 จะให้ความดำเท่ากับแสงความเข้ม 50 ในระยะเวลา 1 ดังนั้นการฉายแสง 1 ชั่วโมงภายใต้แสง 5,000 ลักซ์ จะเท่ากับการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์ที่ใช้แสง 50 ลักซ์ 100 ชั่วโมง และด้วยแนวคิดนี้ทำให้เกิดการคำนวณการฉายแสงสะสม (cumulative exposure) ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฉายแสงและความสว่าง Whitmor และ Colaluca [17] ได้กล่าวถึง ระยะเวลาปีพิพิธภัณฑ์ (museum year) โดยกำหนดให้ 1 ปีพิพิธภัณฑ์เท่ากับการฉายแสงที่ความส่องสว่าง 150 ลักซ์ เป็นเวลา 2,950 ชั่วโมง

รามานสเปกโทรสโกปีและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคทางเคมีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพทางด้านการอนุรักษ์มรดกทางวัฒนธรรม Caggiani และคณะ [18] ศึกษาและเก็บข้อมูลของสารสีที่สำคัญในประวัติศาสตร์และสารสีที่แพร่หลายในปัจจุบันจำนวน 58 ชนิด ด้วยรามานสเปกโทรสโกปี นอกจากนี้ Larsen และคณะ [19] ยังเก็บข้อมูลของสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาสารสีสำหรับผู้เชี่ยวชาญทางด้านศิลปะและนักวิทยาศาสตร์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของฐานข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้ทั่วไป โดยสร้างมาตรฐานของสารสีด้วยการเก็บข้อมูลการสะท้อนแสง สเปกตรัมของรามาน และสเปกตรัมของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ระหว่างสารสีที่เป็นผงกับสารสีที่ถูกผสมกับสารยึด ทำให้เข้าใจในองค์ประกอบทางเคมีของสารสียิ่งขึ้น สำหรับรามานสเปกโทรสโกปี จะทำการทดสอบด้วยแหล่งแสงกระตุ้นต่างกัน 3 ช่วงคลื่น เพื่อสังเกตการตอบสนองที่ต่างกันของสารสี จากการเก็บข้อมูลสเปกตรัมรามาน พบว่ามีสารสีเพียง 2 ชนิด ได้แก่ madder lake และ yellow lake resada ที่ไม่พบการเกิดฟิสิกในสเปกตรัม โดยองค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยอื่น พบว่ามีองค์ประกอบตรงกัน จึงสร้างฐานข้อมูลที่เรียกว่า “Pigments Checker

Free Spectra Database” ขึ้นจากข้อมูลที่ได้ สำหรับเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ จะทำการวิเคราะห์สารสีปริมาณ 200–400 มิลลิกรัม โดยทดสอบด้วยรังสีเอกซเรย์ และรายงานผลออกมาเป็นชนิดของธาตุที่พบในสารสีแต่ละชนิด

Liang [20] รวบรวมงานวิจัยที่ใช้การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมและไฮเปอร์สเปกตรัมทางด้านโบราณคดีและการอนุรักษ์งานศิลปะ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 เนื่องจากมีความสามารถในการวัดสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่มีความละเอียดเทียบเท่าการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ไม่เกิดการทำลายตัวอย่างและสามารถเคลื่อนย้ายเพื่อใช้กับตัวอย่างหลากหลายประเภท โดยการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมและไฮเปอร์สเปกตรัมถูกนำมาใช้ในงานที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การเฝ้าสังเกตการเสื่อมสภาพโดยธรรมชาติของงานศิลปะ ซึ่งพบว่าปัญหาหลักของการเสื่อมสภาพของจิตรกรรมฝาผนังคือความชื้น โดยช่วงคลื่นการดูดซึมน้ำที่ 1,400 และ 1900 นาโนเมตรสามารถใช้ในการสังเกตความชื้นได้ แต่ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงความชื้นจำเป็นต้องได้รับการเทียบมาตรฐานที่ถูกต้อง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ยากต่อการสังเกต นอกจากนี้การใช้สเปกตรัมการสะท้อนแสงยังถูกใช้ในการตรวจสอบหาประเภทของสารสีมาอย่างยาวนาน แต่อย่างไรก็ตามการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมและไฮเปอร์สเปกตรัมยังไม่สามารถครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นมากเพียงพอต่อการระบุสารสีบางชนิดที่มีความซับซ้อนได้ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีหลายกลุ่มวิจัยที่มุ่งเน้นในการพัฒนาระบบของภาพมัลติสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 3000–8000 นาโนเมตร เพื่อสอดคล้องต่อความซับซ้อนของตัวอย่างที่วิเคราะห์

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารสี (pigment) จาก PIGMENT TOKYO ประเทศญี่ปุ่น

- สารสีสีขาวไททาเนียม (titanium white pigment) ของ MATSUDA
- สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white pigment) ของ MATSUDA
- สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black pigment) ของ Holbein
- สารสีสีดำงาช้าง (ivory black pigment) ของ Holbein
- สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment) ของ MATSUDA
- สารสีสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment) ของ MATSUDA
- สารสีสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment) ของ Holbein
- สารสีจากดินแดง (red ochre pigment) ของ ZECCHI
- สารสีสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment) ของ Schmincke
- สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment) ของ ZECCHI
- สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment) ของ Schmincke
- สารสีสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment) ของ MAYAN

3.1.2 กัมอาราบิก (gum arabic)

3.1.3 สารดูดความชื้น (silica gel)

3.2 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1 โคมไฟฮาโลเจน (halogen lamps) จาก Cultural Heritage Science Open Source (CHSOS) ประเทศอิตาลี

- หลอดไฟ R7S (78 มิลลิเมตร)
- กำลังไฟฟ้า 150 วัตต์
- ขนาด 140 x 130 x 100 มิลลิเมตร
- ลักษณะการฉายแสง flood light
- จำนวน 2 โคม

3.2.2 โคมไฟอินฟราเรดฟลูออเรสเซนซ์ (infrared fluorescence lamp) จาก CHSOS ประเทศอิตาลี

- หลอดไฟ LED ชนิด cold white จุดฟุ้งที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร
- กำลังไฟฟ้า 15 วัตต์
- ขนาด 32 x 32 x 54 มิลลิเมตร
- ฟลักซ์การส่องสว่าง 1200 ลูเมน
- จำนวน 1 โคม

3.2.3 โคมไฟอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet lamp) จาก CHSOS ประเทศอิตาลี

- หลอดไฟ UV LED จุดฟุ้งที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
- พลังงานการแผ่รังสี 14250 ไมโครวัตต์
- ขนาด 160 x 140 x 145 มิลลิเมตร
- ระยะเวลาการใช้งาน 30000-50000 ชั่วโมง
- องศาการโฟกัสของเลนส์ 60 องศา
- จำนวน 1 โคม

3.2.4 ฟิลเตอร์ ขนาด 52 มิลลิเมตร จาก CHSOS ประเทศอิตาลี

- ฟิลเตอร์ที่ให้แสงขาวผ่านเข้าสู่เซนเซอร์ จำนวน 1 อัน
- ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์ จำนวน 1 อัน
- ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสียูวีผ่านเข้าสู่เซนเซอร์ จำนวน 1 อัน

3.2.5 กล้องถ่ายรูป (digital single-lens reflex camera, DSLR) ของ Canon รุ่น EOS 5D ประเทศญี่ปุ่น

- เซนเซอร์ CMOS
- ขนาดเซนเซอร์ ฟูลเฟรม (36.0 x 24.0 มิลลิเมตร)
- ความละเอียด 30.4 ล้านพิกเซล
- ขนาด (ไม่รวมบริเวณที่ยื่นออกมา) 150.7 x 116.4 x 75.9 มิลลิเมตร
- น้ำหนัก (ไม่รวมแบตเตอรี่และการ์ดหน่วยความจำ) 800 กรัม
- ประสิทธิภาพ ISO 100-32000 (H:102400)
- ช่วงความเร็วชัตเตอร์ 30-1/8000 วินาที, ชัตเตอร์ B
- จุดโฟกัส สูงสุด 61 จุด

3.2.6 pigment checker v.5 ของ CHSOS ประเทศอิตาลี

- สารสีทางประวัติศาสตร์จำนวน 58 สี (ภาพที่ 3-1)



ภาพที่ 3-1 pigment checker v.5 ที่ประกอบด้วยสารสีสำคัญทางประวัติศาสตร์
จำนวน 58 ชนิด ภายใต้แสงขาว

3.2.7 อื่น ๆ

- พู่กัน (paintbrush) ยี่ห้อ KyuHodo
- ผ้าใบผ้าฝ้าย (cotton canvas) จากบริษัท สมใจค้าหนังสือเครื่องเขียน จำกัด

3.3 เครื่องมือ

3.3.1 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (xenon test chamber) ของ Q-Lab รุ่น Q-SUN Xe-3

- แหล่งแสง หลอดอาร์คซีนอน (xenon arc lamps)
 - กำลังไฟฟ้า 900-2500 วัตต์
 - ให้สเปกตรัมในช่วงรังสีอินฟราเรด แสงขาวและรังสียูวี
 - อายุการใช้งานประมาณ 1,500 ชั่วโมง
 - จำนวน 3 หลอด
- ความส่องสว่าง 90,000 ลักซ์
- การควบคุมอุณหภูมิ ระหว่าง 42-120 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับฉนวน ความเข้มที่ตกกระทบบ ชนิดของฟิลเตอร์ อายุของหลอดไฟและอุณหภูมิโดยรอบ)
- การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ระหว่าง 0-100 %
- องศาการวางตัวอย่าง 10 องศา
- ขนาดถาดตัวอย่าง 451 x 718 มิลลิเมตร

3.3.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ของ Konica Minolta รุ่น CM-700d ประเทศญี่ปุ่น

- แหล่งแสง หลอดพัลส์ซีนอนพร้อมกับฟิลเตอร์ตัดรังสียูวี (pulsed xenon lamp with UV cut filter)
- ช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
- ระดับความถี่ของความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร
- ตัวรับสัญญาณ ซิลิกอนโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (silicon photodiode array, dual 36-element)
- ตัวแยกสเปกตรัม เกรตติงเลี้ยวเบน (diffraction grating)
- ขนาดของ integrating sphere $\Phi 40$ มิลลิเมตร
- การทำซ้ำ (repeatability)
 - spectral reflectance: ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ต่ำกว่า 0.1%
 - chromaticity value: ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความต่างสี (ΔE^*_{ab}) ต่ำกว่า 0.04
- จำนวนเฉลี่ยการวัด 1-10 (การเฉลี่ยแบบอัตโนมัติ), 1-30 (การเฉลี่ยแบบตั้งค่าเอง)
- ขนาด 73 x 211.5 x 107 มิลลิเมตร
- น้ำหนัก 550 กรัม (ไม่รวมส่วนคาร์เบตและแบตเตอรี่)

3.3.3 สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ของ Ocean optics รุ่น USB4000 ประเทศสหรัฐอเมริกา

- ตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่น 200-1100 นาโนเมตร
- รายงานผลทุก 0.2 นาโนเมตร
- ตัวรับสัญญาณ TCD1304AP
- Integration times 10 ไมโครวินาที-10 วินาที
- ขนาด 89.1 x 63.3 x 34.4 มิลลิเมตร

3.3.4 ไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา (portable micro x-ray fluorescence spectrometers, Micro-XRF) ของ Bruker รุ่น ELIO ประเทศสหรัฐอเมริกา

- แหล่งแสง Rh-target microfocus-X-ray tube
- ตัวรับสัญญาณ silicon drift detectors (SDD) ขนาด 17 ตารางมิลลิเมตร
- ระยะเวลาวิเคราะห์ โซเดียม (Na) - ยูเรเนียม (U)

- ขนาด 170 x 265 x 170 มิลลิเมตร

3.3.5 พูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrometer, FTIR) ของ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5 ประเทศสหรัฐอเมริกา

- แหล่งแสง รังสีอินฟราเรดย่านกลาง (mid-infrared)
- ความแม่นยำของเวฟนัมเบอร์ $\pm 2 \text{ cm}^{-1}$
- แรงดันไฟฟ้า 100-240 โวลต์ 50/60 เฮิร์ต
- มีการปิดผนึกเพื่อควบคุมความชื้นโดยรอบ
- ประเภทตัวรับสัญญาณ fast recovery deuterated triglycine sulfate (DTGS) (มาตรฐาน)
- มาตรฐาน ASTM E1421
- ขนาด 350 x 280 x 260 มิลลิเมตร
- น้ำหนัก 10 กิโลกรัม

3.3.6 เครื่องรามานไมโครสโคป (Raman microscope) ของ Thermo Fisher Scientific รุ่น DXR ประเทศสหรัฐอเมริกา

- เลเซอร์ที่รองรับ 780, 633, 532 นาโนเมตร
- ความแม่นยำของเวฟนัมเบอร์ $\pm 2 \text{ cm}^{-1}$ (ในกรณีไม่มีการเปลี่ยนเลเซอร์)
- การทำซ้ำเมื่อมีการเปลี่ยนเลเซอร์ $\pm 1.8 \text{ cm}^{-1}$

3.3.7 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารเคมี ของ LMS GmbH & Co. KG รุ่น HTS-1003 ประเทศเยอรมนี

3.3.8 เครื่องชั่งน้ำหนักแม่นยำสูง ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ของ METTLER TOLEDO รุ่น PM2500 และ รุ่น PG1003-S ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ การระบุสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การเตรียมแผ่นสีตัวอย่าง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสี การวิเคราะห์ผลการทดลองและการทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์

3.4.1 การระบุสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์

การวิเคราะห์หาสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์แบ่งออกเป็น 2 วิธีการ ได้แก่ การถ่ายภาพเชิงเทคนิคและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี โดยแบ่งบริเวณในการวิเคราะห์

ออกเป็นสีขาว ดำ น้ำตาล แดง เหลือง เขียวและน้ำเงิน ตามที่ปรากฏในพระบรมสาทิสลักษณ์เมื่อมอง
ภายใต้แสงขาว ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 บริเวณที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ
ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1.1 การถ่ายภาพเชิงเทคนิค

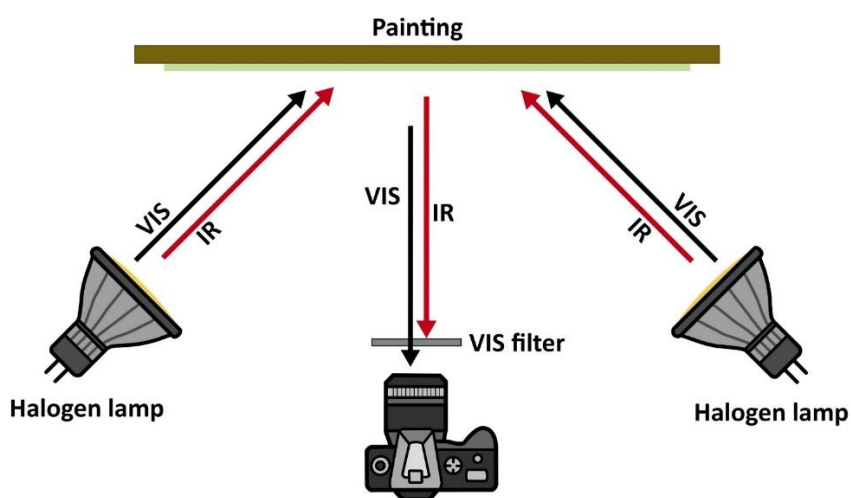
ข้อมูลสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ได้จากการถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่หอ
ประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยปิดกั้นแสงจากภายนอก ใช้เพียงแสงจากแหล่งแสงที่ระบุไว้ใน
เทคนิค การถ่ายภาพทำโดยถ่ายเจาะจงในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้ได้รายละเอียดที่ชัดเจน ในงานวิจัยนี้
ใช้ผังงานการถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้งหมด 6 แบบ การตั้งค่ากล้องในแต่ละเทคนิคเป็นไปตามตารางที่

ตารางที่ 3-1 การตั้งค่ากล้องในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

การถ่ายภาพเชิงเทคนิค	Shutter speed (s)	ISO	F-numbers
VIS	1/4		
UVR	15		
UVF	30	ISO-100	F/11
IRF	1/30		
IR	1		

3.4.1.1.1 การถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (VIS)

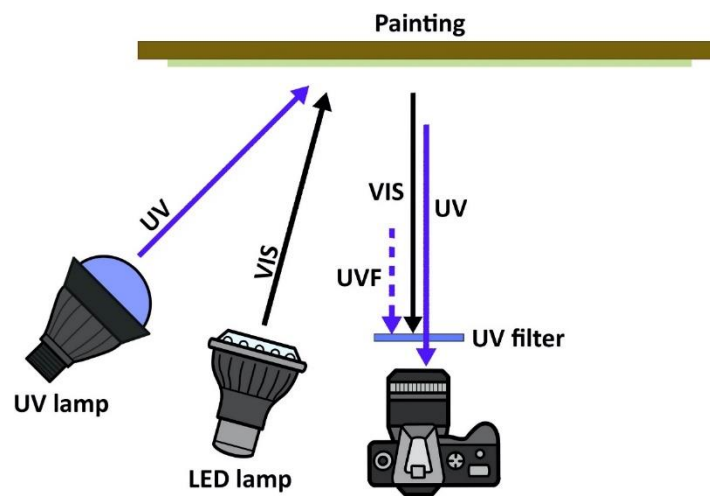
การถ่ายภาพภายใต้แสงขาวใช้โคมไฟฮาโลเจน จำนวน 2 โคม ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ให้แสงขาวผ่านเข้าสู่เซนเซอร์บริเวณหน้ากล้อง โดยตั้งไฟทำมุมประมาณ 45 องศากับภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพภายใต้แสงขาว (VIS)

3.4.1.1.2 UV reflected (UVR)

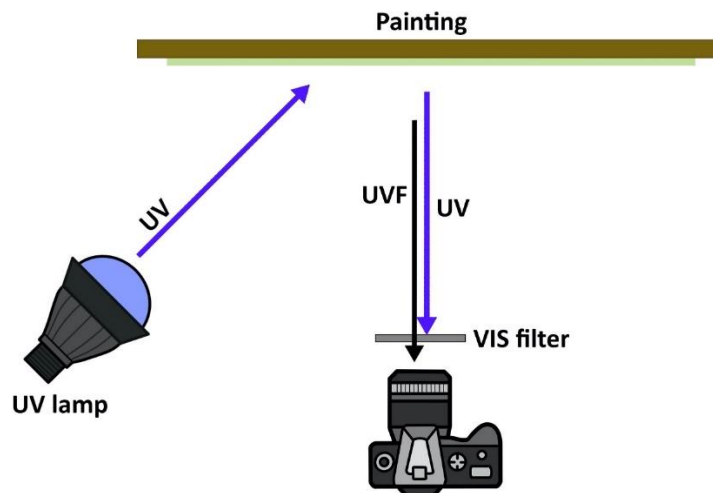
UVR ใช้โคมไฟแอลอีดีช่วงแสงขาว จำนวน 1 โคม และโคมไฟอัลตราไวโอเล็ต จำนวน 1 โคม ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสียูวีผ่านเข้าสู่เซนเซอร์บริเวณหน้ากล้อง ดังแสดงในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 การจัดไฟและกล้องสำหรับถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ UVR

3.4.1.1.3 UV fluorescence (UVF)

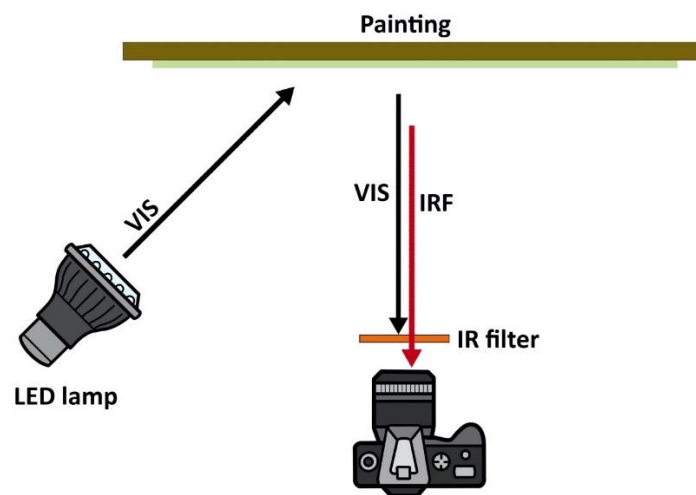
UVF ใช้คอมไฟ้อลตราไวโอเลต จำนวน 1 โคม ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้แสงขาวผ่านเข้าสู่เซนเซอร์บริเวณหน้ากล้อง ดังแสดงในภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ UVF

3.4.1.1.4 infrared fluorescence (IRF)

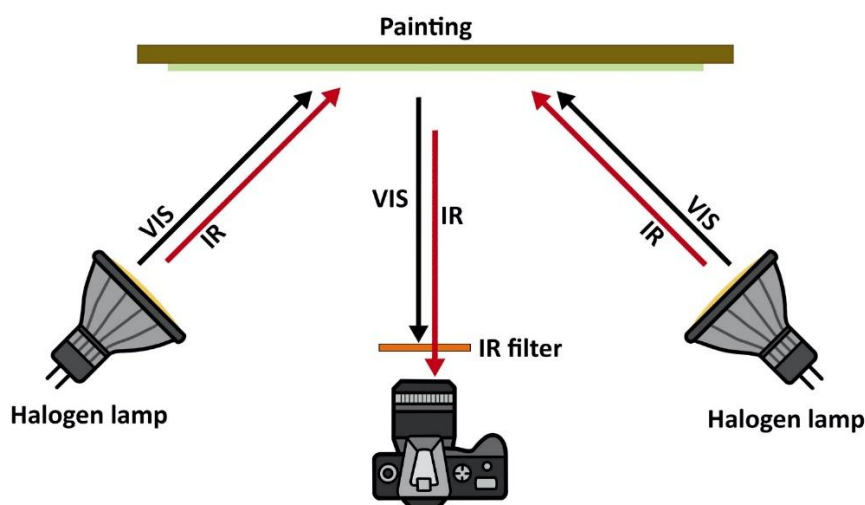
IRF ใช้แสงจากคอมไฟแอลอีดีช่วงแสงขาว จำนวน 1 โคม ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์บริเวณหน้ากล้อง ดังแสดงในภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ IRF

3.4.1.1.5 infrared (IR)

IR ใช้แสงจากคอมไฟฮาโลเจน จำนวน 2 โคม ประกอบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ยอมให้รังสีอินฟราเรดผ่านเข้าสู่เซนเซอร์บริเวณหน้ากล้อง ดังแสดงในภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 การจัดไฟและกล้องสำหรับการถ่ายภาพทางเทคนิคแบบ IR

3.4.1.1.6 ภาพ false color

ภาพอินฟราเรด false color ถูกทำในโปรแกรม GIMP 2.10.18 โดยใช้ภาพที่ถ่ายในตำแหน่งเดียวกัน แทนช่องสัญญาณสีแดงของภาพที่ถ่ายภายใต้แสงขาวด้วยภาพที่ถ่ายภายใต้อินฟราเรด แทนที่ช่องสัญญาณสีเขียวด้วยช่องสัญญาณสีแดง และแทนช่องสัญญาณสีน้ำเงินด้วยช่องสัญญาณสีเขียว เช่นเดียวกับกับภาพยูวี false color เพียงแต่แทนช่องสัญญาณสีน้ำเงินของภาพที่ถ่ายภายใต้แสงขาวด้วยภาพที่ถ่ายด้วยเทคนิค UVF แทนที่ช่องสัญญาณสีเขียวด้วยช่องสัญญาณสีน้ำเงิน และแทนช่องสัญญาณสีแดงด้วยช่องสัญญาณสีเขียว

3.4.1.2 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี

วิเคราะห์หาสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์จากการหาธาตุด้วยไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา ที่ใช้ Rh X-Ray และไม่มีการใช้ฟิลเตอร์ โดยตั้งค่าดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 การตั้งค่าไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา

พารามิเตอร์ของเครื่อง	การตั้งค่า
working regime	40 kV tube power
current intensity	50 μ A
accumulation in air atmosphere	60 s

3.4.2 การเตรียมแผ่นสีตัวอย่าง

3.4.2.1 การทำสารยัด

ละลายกัมอารบิก 6.88 กรัม ต่อน้ำ 50 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งกัมอารบิกละลายจนหมด จากนั้นกรองสิ่งสกปรกออกและรอให้เย็นก่อนนำไปใช้ผสมกับสารสี

3.4.2.2 การทำตัวอย่างสี

ผสมสารยัดที่เตรียมไว้กับสารสีแต่ละชนิดในอัตราส่วน 80:20 (ยกเว้นสารสีคาร์บอนที่ใช้อัตราส่วน 85:15 เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าสารสีอื่น) คนจนกว่าจะกระจายจนทั่ว จากนั้นใช้พู่กันทาสีลงบนผืนผ้าใบคอตตอน ในแต่ละแผ่นสีจะมี 12 สี ดังภาพที่ 3-8 ได้แก่ สีขาว ไททาเนียม สีขาวสังกะสี สีดำคาร์บอน สีดำงาช้าง สีน้ำตาลอัมเบอร์ สีน้ำตาลไหม้ สีแดงอะลิซาริน สีจากดินแดง สีเหลืองโครเมียม สีจากดินเหลือง สีเขียวโครเมียมออกไซด์ และสีน้ำเงินมายา ตามลำดับจำนวน 2 ชุด เพื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทำซ้ำ โดยเก็บรักษาแผ่นสีตัวอย่างไว้ในสภาวะควบคุม



ภาพที่ 3-8 แผ่นสีตัวอย่างประกอบไปด้วยสารสี 12 สี จำนวน 2 ชุด

3.4.2.3 การเร่งปัจจัยการเสื่อมสภาพของแผ่นสีตัวอย่าง

เร่งปัจจัยการเสื่อมสภาพด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ โดยเลือกศึกษาปัจจัยทางด้านความชื้นและแสง

3.4.2.3.1 ปัจจัยทางด้านแสง

คำนวณระยะเวลาการฉายแสงจากสมการที่ 3-1 [16]

$$D = Lt \quad (3-1)$$

เมื่อ D คือ การฉายแสงสะสม (cumulative exposure)

L คือ ความส่องสว่าง (illuminance, lux)

t คือ ระยะเวลาในการฉายแสง (hour)

โดยคำนวณจากระยะเวลาปีพิพิธภัณฑ์ (museum year) ที่กำหนดให้ 1 ปีพิพิธภัณฑ์เท่ากับการฉายแสงที่ความส่องสว่าง 150 ลักซ์ เป็นเวลา 2,950 ชั่วโมง [17] ทำให้การฉายแสงสะสม 1 ปีพิพิธภัณฑ์เท่ากับ 442,500 หน่วย ดังนั้นเมื่อฉายแสงในเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ให้แสงส่องสว่าง 90,000 ลักซ์ จะทำให้การฉายแสงเป็นเวลาประมาณ 5 ชั่วโมงจะเท่ากับ 1 ปีพิพิธภัณฑ์ ส่งผลให้การฉายแสง 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง เท่ากับ 6, 10, 14, และ 20 ปีพิพิธภัณฑ์ ตามลำดับ

3.4.2.3.2 ปัจจัยทางด้านความชื้น

กำหนดการควบคุมความชื้นเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 55% ซึ่งเป็นความชื้นที่สอดคล้องกับข้อกำหนดของ AICCM ในการเก็บรักษางานศิลปะ [2] และ 75% ซึ่งเท่ากับความชื้นเฉลี่ยต่อปีในประเทศไทย [21] โดยสรุปเงื่อนไขการเร่งการเสื่อมสภาพดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เงื่อนไขการเร่งการเสื่อมสภาพของแผ่นสีตัวอย่างที่สัมพันธ์กับปัจจัยทางด้านความชื้นและแสง

Light (hours)	Moisture (%)	
	55	75
5	55, 5	75, 5
30	55, 30	75, 30
50	55, 50	75, 50
70	55, 70	75, 70
100	55, 100	75, 100
control	สภาวะควบคุม*	

* หมายเหตุ: แผ่นสีตัวอย่างถูกเก็บไว้ในที่มืด ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ 50% และอุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส

3.4.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสี

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของแผ่นสีตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยการเสื่อมสภาพด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการสะท้อนแสง โดยวัดแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพทั้ง 10 เงื่อนไขและแผ่นสีที่ถูกเก็บภายใต้สภาวะควบคุม รวมทั้งหมด 11 เงื่อนไข

3.4.3.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีด้วยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสารสีจากแผ่นสีตัวอย่างด้วยฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ จำนวน 4 ครั้ง ต่อ 1 สี โดยตั้งค่าดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 การตั้งค่าฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ของเครื่อง	การตั้งค่า
number of scans	64
resolution	4
sample compartment	Main
detector	DTGS KBr
beamsplitter	KBr
source	IR
accessory	ID7
window	Diamond
gain: 1	1.0
optical velocity	0.4747
aperture	100

3.4.3.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีด้วยรามานสเปกโทรสโกปี

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีจากแผ่นสีตัวอย่างด้วยเครื่องรามานไมโครสโคป จำนวน 4 ครั้งต่อ 1 สี โดยตั้งค่าดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 การตั้งค่ารามานไมโครสโคปที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ของเครื่อง	การตั้งค่า
exposure time	2.00 s
number of exposures	64
number of background exposure	512
laser	780 nm
grating	400 lines/mm
spectrograph aperture	50 μ m slit

3.4.3.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสีจากความแตกต่างสี

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการสะท้อนของสารสีจากแผ่นสีตัวอย่าง ด้วยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยตั้งค่า illuminant/observer ที่ D65/2 และวัดเฉลี่ย 3 ครั้ง สำหรับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุม จำนวน 30 ตัวอย่างและแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพได้นำมาวัดสเปกตรัมการสะท้อนแสงและค่าสี CIE L*a*b* และหาความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) ระหว่างแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมและแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพ

3.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด รามาน สเปกตรัมการสะท้อนแสงและการวิเคราะห์ความแตกต่างสี (ΔE_{2000})

3.4.4.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและรามาน

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดและรามานพิจารณาจาก 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ การเลื่อนของพีคและการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพีค โดยแยกพิจารณาเป็นแต่ละสารสีที่ความถี่ต่างกัน ในแต่ละระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ

3.4.4.2 การวิเคราะห์ความแตกต่างสี (ΔE_{2000})

วิเคราะห์ความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) ระหว่างแผ่นสีตัวอย่างที่ความถี่และระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพต่างกับกับแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเก็บอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมของสารสีแต่ละชนิด

3.4.5 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์

ทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์ จากการวัดสเปกตรัมการสะท้อนแสงเฉลี่ยของพระบรมสาทิสลักษณ์บริเวณตำแหน่งดังภาพที่ 3-2 เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการสะท้อนแสงสารสีเดียวกันในแผ่นสีตัวอย่าง ด้วยสเปกโทรมิเตอร์ ภายใต้แสงจากโคมไฟฮาโลเจน

โดยตั้งค่าดังตารางที่ 3-6 จากนั้นทำนายการเสื่อมสภาพด้วยสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง ดังสมการที่ 3-2 โดยวิเคราะห์จากค่าการสะท้อนแสงของแนวโน้มการเสื่อมสภาพของสารสีจำลองในแผ่นสีตัวอย่าง และหาสมการเพื่อประมาณค่าจากความสัมพันธ์ระหว่างพีพีอิทธิพลและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่อสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง เพื่อทำนายปีพิอิทธิพลการเก็บรักษาของสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

ตารางที่ 3-6 การตั้งค่าสเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ของเครื่อง	การตั้งค่า
integration time	170 milliseconds
scans to average	5

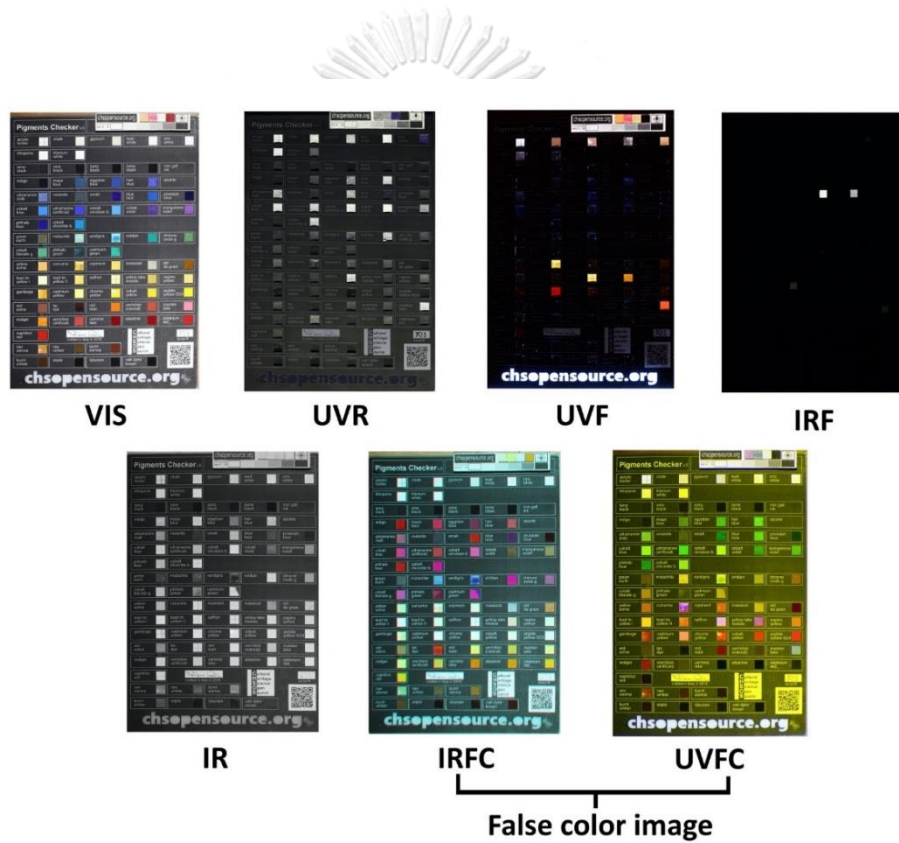
$$K/S = (1 - R_{\infty})^2 / 2R_{\infty} \quad (3-2)$$

เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 S คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง
 R_{∞} คือ ค่าการสะท้อนแสงของชั้นสีที่ทึบแสง

บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 การระบุสารสีที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์

การระบุสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ ทำโดยการเทียบกับสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ภาพที่ 3-2) กับสารสีใน pigment checker ภายใต้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคที่ตั้งค่าแบบเดียวกัน ดังภาพที่ 4-1 และระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 4-1 pigment checker ภายใต้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคทั้งหมด 6 แบบ

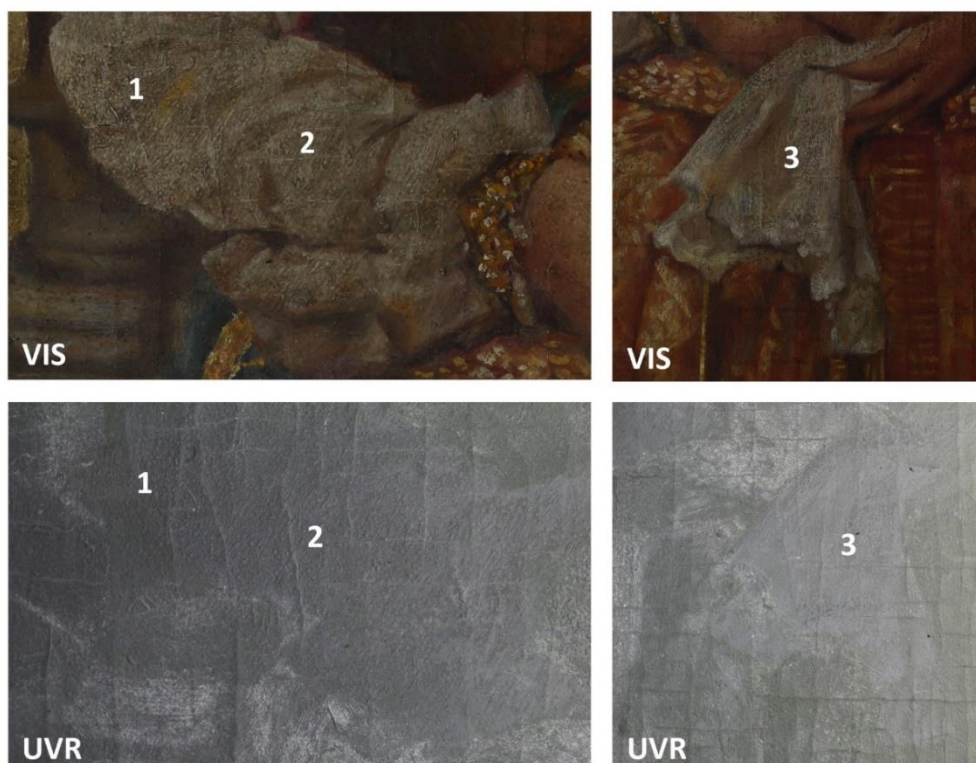
4.1.1 สีขาว



ภาพที่ 4-2 บริเวณของสีขาวที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.1.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

จากภาพที่ 4-3 (บน) แสดงการปรากฏสีของพระบรมสาทิสลักษณ์ภายใต้แสงขาว ในตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของบริเวณสีขาวที่วิเคราะห์หาสารสี พบว่าเมื่อสังเกตภายใต้เทคนิคแบบ UVR ดังภาพที่ 4-3 (ล่าง) บริเวณที่ศึกษาปรากฏเป็นลักษณะมืด โดยจากงานวิจัยของ Cosentino [3] พบว่า เมื่อสีขาวแสดงออกเป็นลักษณะมืดภายใต้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ UVR สีขาวที่ปรากฏในลักษณะนี้ ได้แก่ สีขาวไททาเนียม (titanium white) สีขาวสังกะสี (zinc white) และสีขาวชอล์ก (chalk) อย่างไรก็ตาม การถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบอื่นไม่สามารถใช้ในการระบุสารสีสีขาวได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงต้องใช้เทคนิคเอกซเรย์สเปกโทรสโกปีร่วมในการวิเคราะห์



ภาพที่ 4-3 ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของบริเวณสีขาวที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS (บน) และ UVR (ล่าง)

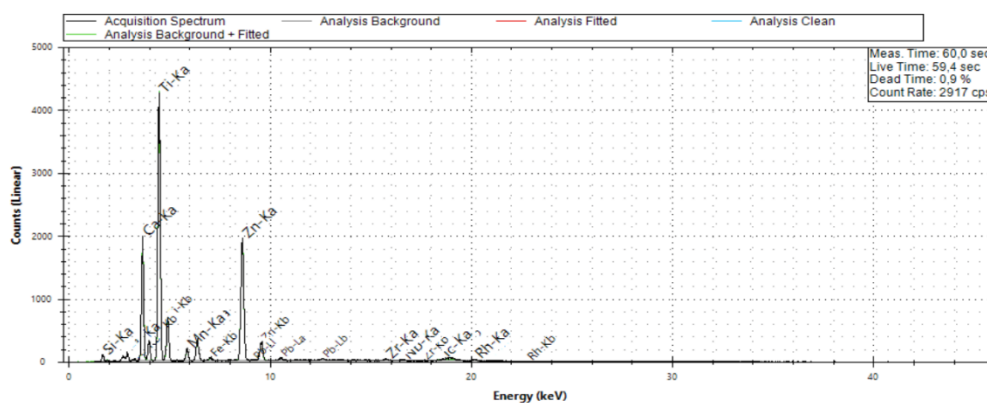
4.1.1.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

จากตารางที่ 4-1 พบว่าธาตุที่พบมากที่สุดบริเวณสารสีสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์ ได้แก่ ซิลิคอน (silicon, Si) ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดจากซิลิโคนเรซินที่ใช้เป็นสีรองพื้น (primer) ในภาพสีน้ำมัน เนื่องจากมีพันธะระหว่างซิลิคอนและออกซิเจนที่แข็งแรง ทำให้สีคงทนต่อสภาพแวดล้อม ทำให้ในการวิเคราะห์หาสารสีจะพิจารณาธาตุที่มีความเข้มลำดับสองเป็นต้นไป โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 2\%$ เนื่องจากธาตุอื่นที่พบในปริมาณน้อยและมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสูงอาจเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์สารสี [22] ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะธาตุดังต่อไปนี้ ได้แก่ แคลเซียม (Ca) ไททาเนียม (Ti) สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) จากฐานข้อมูลของ Larsen และคณะ [19] ที่เก็บข้อมูลของสารสีทางประวัติศาสตร์พบว่าสารสีสีขาวที่พบธาตุดังกล่าว ได้แก่ สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white) ซึ่งมีส่วนของธาตุสังกะสีและพบพีค $K\alpha$ ของ Zn ที่ 8.63 และพีค $K\beta$ ที่ 8.97 และสารสีสีขาวไททาเนียม (titanium white) ที่มีส่วนของธาตุไททาเนียมและร่องรอยของแคลเซียมแสดงพีค $K\alpha$ ของ Ti ที่ 4.51 และ $K\beta$ ที่ 4.93 ตรงกับพีคที่ได้จากการวิเคราะห์

หาสารสีบริเวณสีขาวดังภาพที่ 4-4 โดยตัดความเป็นไปได้ของสีขาวซอล์กออก เนื่องจากข้อมูลเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสีขาวซอล์กต้องพบธาตุสตรอนเชียม (strontium, Sr) [19] ซึ่งไม่พบไม่บริเวณนี้ ส่วนธาตุหลักที่พบบริเวณนี้อาจเกิดจากการผสมกันของสารสีสีขาวชนิดอื่น ยกตัวอย่างเช่น สีขาวตะกั่ว (lead white) หรือยิปซัม (gypsum) [22] แต่ในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับสีขาวชนิดอื่น ทำให้ไม่ปรากฏในการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

ตารางที่ 4-1 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีขาวของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	53.15 ±2.97	Si	52.31 ±3.05	Si	50.31 ±3.33
Ca	21.29 ±0.65	Ti	24.64 ±0.44	Ca	25.45 ±0.61
Ti	21.22 ±0.49	Ca	18.69 ±0.68	Ti	19.76 ±0.53
Zn	1.67 ±0.71	Zn	2.44 ±0.59	Fe	1.89 ±0.99
Fe	1.35 ±1.12	Fe	0.69 ±1.63	Zn	1.38 ±0.81
Pb	0.84 ±2.85	Pb	0.56 ±4.56	Mn	0.46 ±2.34
K	0.36 ±5.72	Mn	0.54 ±2.07	K	0.31 ±3.29
Cr	0.09 ±2.78	Tc	0.10 ±5.06	Pb	0.25 ±2.63
Zr	0.02 ±4.69	Zr	0.02 ±4.51	Cr	0.11 ±5.27
		Nb	0.01 ±3.38	Tc	0.05 ±4.04
				Zr	0.01 ±5.56



ภาพที่ 4-4 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสีสีขาวบริเวณตำแหน่งที่ 2

4.1.2 สีดำ



ภาพที่ 4-5 บริเวณของสีดำที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.2.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

จากการวิเคราะห์หาสารสีสีดำที่ตำแหน่งดังภาพที่ 4-5 ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคพบว่าไม่มีวิธีการถ่ายภาพใดที่สามารถระบุสารสีได้

4.1.2.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

จาก Cosentino [3] สารสีสีดำที่อยู่ใน pigment checker ทั้ง 4 ชนิด ขึ้นอยู่กับเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ของวัสดุอินทรีย์ ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตสารสีสีดำคาร์บอน จากงานวิจัยพบว่า [19] สเปกตรัมที่ได้จากเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี แสดงเพียงร่องรอยของธาตุที่ไม่สามารถใช้ในการระบุลักษณะได้ โดยจะแสดงร่องรอยของแคลเซียมเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีดำของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่า ธาตุที่มีความ

เข้มข้นได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) เหล็ก (Fe) ไททาเนียม (Ti) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) ดังตารางที่ 4-2 โดยคาดว่าซิลิกอนที่พบ มาจากสีรองพื้น แคลเซียมเกิดจากรองรอยของสารสีสีดำและสีขาว เหล็กเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของสารสีที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการสังเคราะห์ ไททาเนียมและสังกะสีเกิดจากสีขาวที่ใช้ในการผสมสี ส่วนแมงกานีสเกิดจากสีน้ำตาลที่ใช้ในการผสมสี ดังนั้นจึงเลือกสารสีสีดำที่ครอบคลุมการใช้งานมากที่สุด ได้แก่ สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black) และหนึ่งในสารสีในประวัติศาสตร์ ได้แก่ สารสีสีดำงาช้าง (ivory black)

ตารางที่ 4-2 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีดำของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	62.26 ±2.96	Si	61.71 ±3.11	Si	56.70 ±3.17
Ca	19.5 ±0.80	Ca	17.50 ±0.86	Ca	22.86 ±0.74
Fe	6.99 ±0.52	Fe	6.80 ±0.52	Fe	7.31 ±0.51
Ti	4.88 ±1.12	Ti	6.40 ±0.97	Ti	6.64 ±0.99
Pb	2.81 ±3.01	S	3.55 ±7.21	Pb	4.40 ±1.51
K	1.85 ±3.27	Pb	1.32 ±1.61	K	1.19 ±4.09
Mn	1.44 ±1.27	Mn	0.98 ±1.55	Cr	0.65 ±1.30
Zn	0.26 ±1.90	K	0.92 ±4.67	Zn	0.25 ±2.02
Tc	0.01 ±9.84	Cr	0.58 ±2.25	Y	0.01 ±6.52
		Zn	0.22 ±2.10		
		Sr	0.01 ±6.42		

4.1.3 สีน้ำตาล



ภาพที่ 4-6 บริเวณของสีน้ำตาลที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.3.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

จากการวิเคราะห์หาสารสีสีน้ำตาลที่ตำแหน่งดังภาพที่ 4-6 เช่นเดียวกับสารสีสีดำ สารสีสีน้ำตาลไม่สามารถระบุชนิดของสารสีได้ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

4.1.3.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี

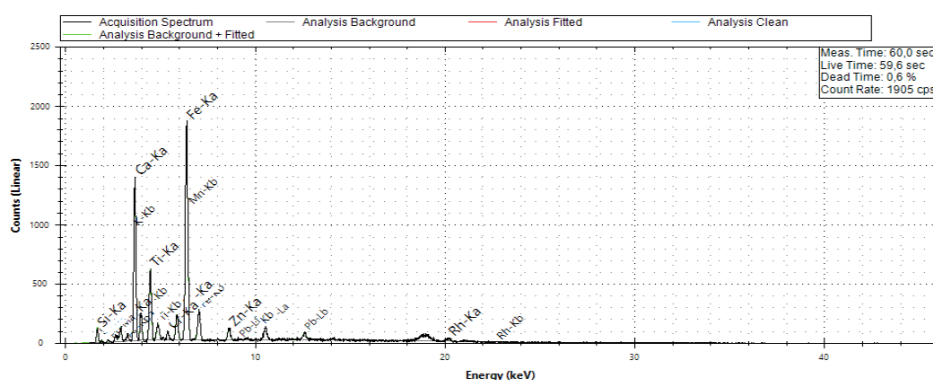
เมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีน้ำตาลของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่าธาตุที่มีความเข้มข้นได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ไททาเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) ส่วนธาตุอื่นที่มีปริมาณของเข้มข้นต่ำอาจเกิดจากการผสมกันของสีอื่น ดังตารางที่ 4-3 โดยสารสีสีน้ำตาลทางประวัติศาสตร์ทั้ง 6 ชนิด ล้วนประกอบด้วยธาตุเหล็กและร่องรอยของแคลเซียม ในขณะที่ข้อมูลจากงานวิจัยพบว่ามีเพียงสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์และสารสีสีน้ำตาลไหม้ที่มี

ส่วนประกอบของธาตุแมงกานีส ซึ่งเกิดจากแร่ไพโรลูไซต์ (pyrolusite) ที่เป็นส่วนประกอบของแมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide) สอดคล้องกับธาตุที่พบ โดยปรากฏพีคของ $K\alpha$ ของ Mn ที่ 5.89 และ $K\beta$ ของ Mn ที่ 6.49 [19] ดังภาพที่ 4-7

ตารางที่ 4-3 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีน้ำตาลของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	65.47 ±2.92	Si	64.06 ±3.11	Si	63.59 ±3.02
Ca	20.53 ±0.81	Ca	22.17 ±0.86	Ca	22.59 ±0.80
Ti	4.86 ±1.18	Ti	5.33 ±0.52	Ti	5.64 ±1.14
Fe	4.42 ±0.65	Fe	3.74 ±0.97	Fe	3.56 ±0.75
Pb	2.49 ±2.47	Pb	2.52 ±7.21	Pb	2.69 ±3.18
K	1.17 ±4.30	K	1.02 ±1.61	K	1.68 ±3.66
Mn	0.68 ±1.95	Mn	0.72 ±1.55	Zn	0.12 ±2.89
Cr	0.24 ±3.66	Cr	0.3 ±4.67	Cr	0.12 ±2.58
Zn	0.15 ±0.15	Zn	0.14 ±2.25		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-7 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสีน้ำตาลบริเวณตำแหน่งที่ 2

4.1.4 สีแดง

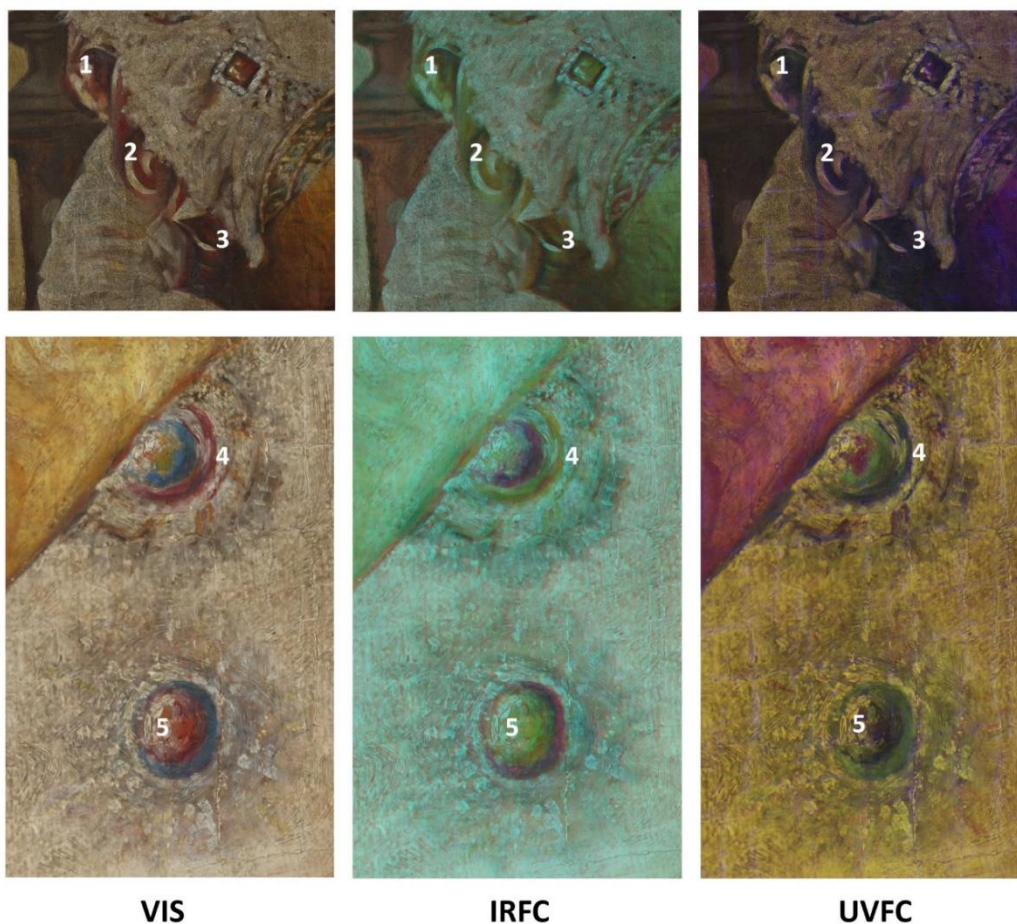


ภาพที่ 4-8 บริเวณของสีแดงที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.4.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

เมื่อใช้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาสารสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์บริเวณดังภาพที่ 4-8 จากภาพที่ 4-9 พบว่าเทคนิคที่สามารถแยกแยะสีแดงได้ดีที่สุดคือ IRFC และ UVFC โดยภายใต้ IRFC บริเวณสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์ปรากฏเป็นสีเหลือง และภายใต้ UVFC ปรากฏเป็นสีน้ำตาลเข้มไปจนถึงดำ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก pigment checker สารสีแดงทางประวัติศาสตร์ที่บรรจุไว้ 11 ชนิด สารสีที่ปรากฏเป็นลักษณะเดียวกันมีอยู่ 5 ชนิด ได้แก่ สารสีจากดินแดง (red ochre pigment) สารสีแดงชาดสังเคราะห์ (synthetic vermilion

pigment) สารสีสีแดงชาดธรรมชาติ (natural vermilion) สารสีสีแดงอะลิซาริน (alizarin red pigment) สารสีสีแดงแคดเมียม (cadmium pigment) และสารสีสีแดงคาร์มีนเลก (carmine lake)



ภาพที่ 4-9 ตำแหน่งที่ 1, 2, 3 (บน) 4 และ 5 (ล่าง) ของบริเวณสีแดงที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, IRFC และ UVFC

4.1.4.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

เมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีแดงของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่า ธาตุที่มีความเข้มข้น ได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ไททาเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) ดังตารางที่ 4-4 และ 4-5 โดยปริมาณของซิลิกอนที่มีความเข้มข้นสูงในทุกบริเวณ ทำให้อนุมานได้ว่าเกิดจากสีรองพื้นที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์ ส่วนธาตุอื่นอาจเกิดการผสมกันของสารสีต่าง ๆ เพื่อให้ได้สีที่ตรงกับความต้องการของศิลปิน จากงานวิจัยของ Larsen และคณะ [19] พบว่าสารสีสีแดงประเภทเลก (lake) ทั้งหมดจะแสดงเพียงพีคของแคลเซียมเท่านั้น

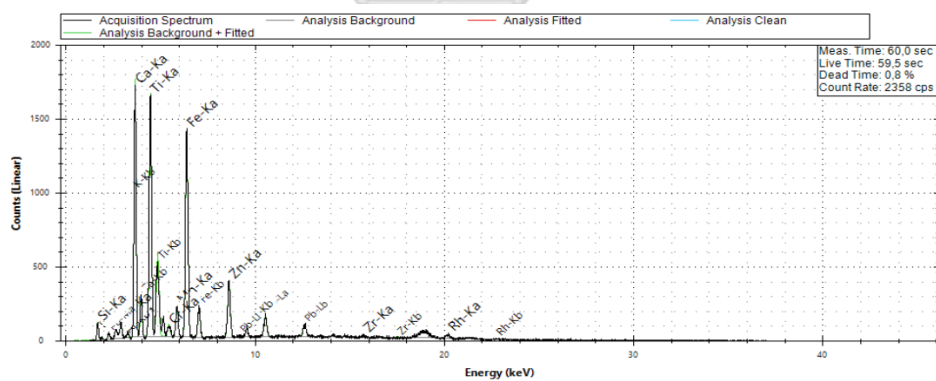
เนื่องจากถูกรบกวนจากมอร์แดนต์ (mordant) หรือสารช่วยย้อมเคมี ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะใช้เป็นเกลือของโลหะจำพวกอลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง ดีบุก หรือโครเมียม จากผลการถ่ายภาพเชิงเทคนิค สารสีที่เป็นประเภทเลกและปรากฏเป็นลักษณะเดียวกันมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ สารสีสีแดงอะลิซารินและคาร์มินเลก อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารสีทั้งคู่มีลักษณะการปรากฏที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกสารสีสีแดงอะลิซารินในการจำลองการเสื่อมสภาพของสารสี นอกจากนี้ในบริเวณสีแดงยังพบธาตุเหล็กที่มีปริมาณเข้มข้นกว่าบริเวณอื่นและปรากฏพีคของธาตุเหล็กอย่างชัดเจนดังภาพที่ 4-10 ซึ่งเป็นลักษณะของสารสีจากดินแดงที่สร้างขึ้นจากเหล็กออกไซด์ โดยสารสีจากดินแดงอาจประกอบด้วยธาตุอื่นร่วมด้วย ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) ไททานเนียม (Ti) วาเนเดียม (V) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) สตรอนเทียม (Sr) และ เซอร์โคเนียม (Zr) ขึ้นอยู่กับธาตุในดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุในการทำสารสี

ตารางที่ 4-4 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีแดงตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	55.07 ±3.13	Si	60.40 ±3.01	Si	59.40 ±2.87
Ca	21.60 ±0.72	Ca	21.17 ±0.76	Ca	23.89 ±0.68
Ti	12.26 ±0.69	Ti	9.21 ±0.82	Ti	7.69 ±0.86
Pb	5.67 ±2.13	Fe	3.75 ±0.7	Fe	4.41 ±0.61
Fe	3.34 ±0.73	Pb	3.37 ±1.27	Pb	2.40 ±2.00
K	0.60 ±5.43	Cr	0.62 ±2.26	Mn	0.85 ±1.64
Mn	0.57 ±2.05	Mn	0.55 ±2.13	K	0.54 ±3.35
Zn	0.49 ±1.34	Zn	0.49 ±1.38	Zn	0.36 ±1.54
Cr	0.38 ±2.84	K	0.44 ±6.66	Cr	0.27 ±3.22
Zr	0.01 ±6.48			Tc	0.17 ±2.23
				Sr	0.02 ±5.60

ตารางที่ 4-5 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีแดงตำแหน่งที่ 4 และ 5 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 4		ตำแหน่งที่ 5	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	51.85 ±3.26	Si	53.83 ±3.23
Ca	24.07 ±0.67	Ca	17.39 ±0.86
Ti	15.59 ±0.62	Ti	17.38 ±0.59
Pb	3.17 ±1.36	Pb	6.59 ±1.74
Fe	2.85 ±0.81	Fe	1.81 ±1.04
Zn	1.19 ±0.89	Zn	1.39 ±0.83
Cr	0.65 ±1.91	Cr	0.55 ±2.50
K	0.60 ±3.68	Mn	0.53 ±2.27
Zr	0.02 ±6.01	K	0.51 ±2.96
		Sr	0.02 ±5.33



ภาพที่ 4-10 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสีสีแดงบริเวณตำแหน่งที่ 1

4.1.5 สีเหลือง

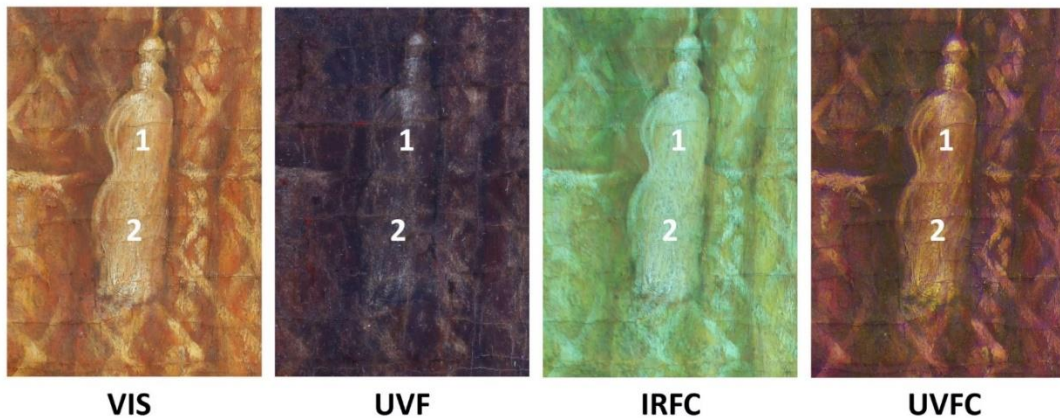


ภาพที่ 4-11 บริเวณของสีเหลืองที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.5.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

เมื่อใช้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์บริเวณดังภาพที่ 4-11 จากภาพที่ 4-12, 4-13 และ 4-14 พบว่าเทคนิคที่สามารถแยกแยะสีเหลืองได้ดีที่สุดคือ UVF, IRFC และ UVFC โดยภายใต้ UVF บริเวณสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์ปรากฏเป็นน้ำตาลเข้ม ภายใต้ IRFC ปรากฏเป็นสีเหลืองอ่อนไปจนถึงขาว และภายใต้ UVFC ปรากฏเป็นสีชมพูอมแดง เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก pigment checker ที่มีสารสีสีเหลืองทางประวัติศาสตร์จำนวน 12 ชนิด สารสีที่ปรากฏเป็นลักษณะเดียวกันมีอยู่ 6 ชนิด ได้แก่ สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment) สารสีจากแร่หธาต (orpiment pigment) สารสีสี

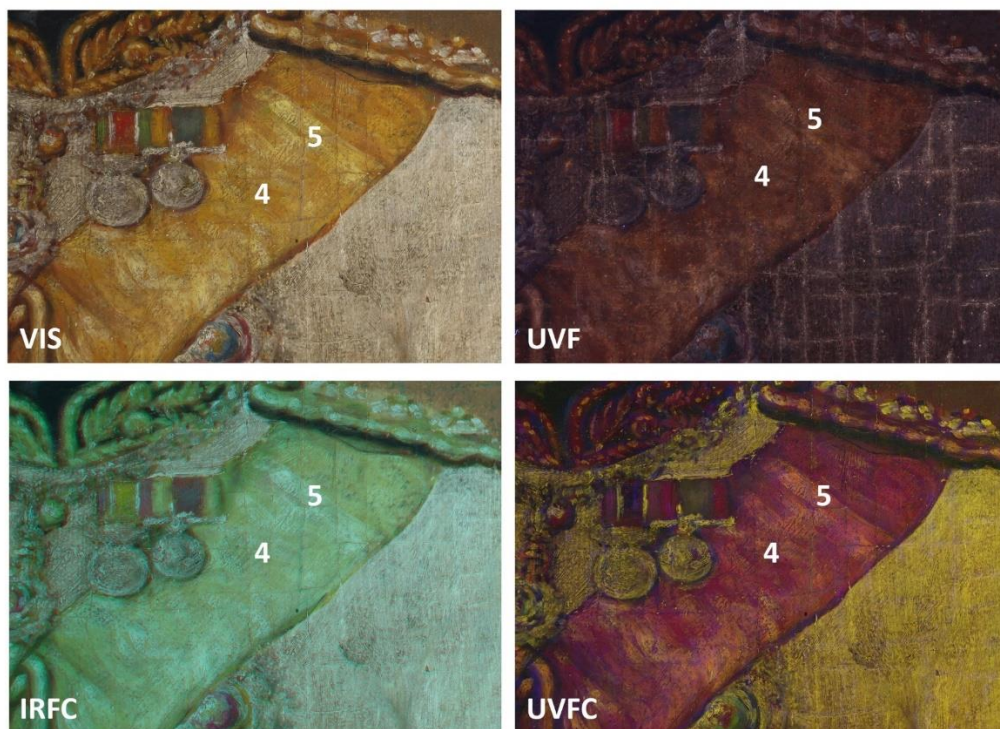
เหลืองตะกั่วดิบ (lead tin yellow II pigment) สารสีเหลืองหญ้าฝรั่น (gamboge pigment)
 สารสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment) และสารสีเหลืองโคบอลต์ (cobalt yellow pigment)



ภาพที่ 4-12 ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ของบริเวณสีเหลืองที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์
 ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC



ภาพที่ 4-13 ตำแหน่งที่ 3 ของบริเวณสีเหลืองที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ ด้วยการ
 ถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC



ภาพที่ 4-14 ตำแหน่งที่ 4 และ 5 ของบริเวณสีเหลืองที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์
ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC

4.1.5.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

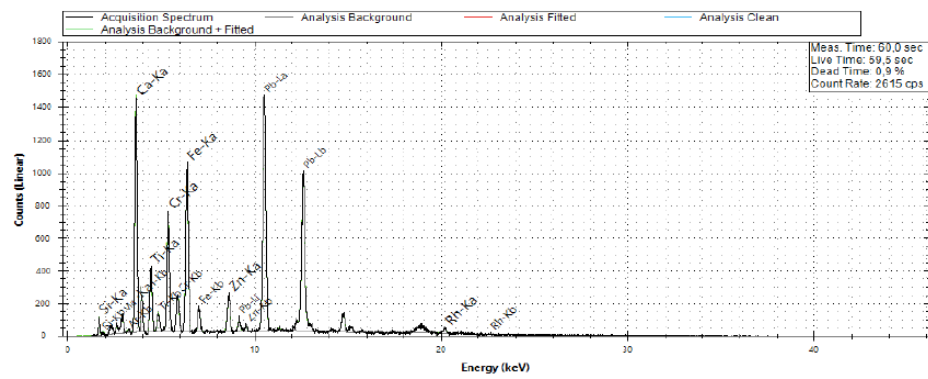
เมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีเหลืองของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่าธาตุที่มีความเข้มข้นได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ไททานเนียม (Ti) ตะกั่ว (Pb) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) ดังตารางที่ 4-6 และ 4-7 โดยเมื่อตัดธาตุที่มีความเป็นไปได้ว่าเกิดจากสารรองพื้นและการผสมของสีขาวแล้ว พบว่าบริเวณสีเหลืองมีระดับของตะกั่วสูง ซึ่งในสารสีทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคมีเพียงสารสีสีเหลืองโครเมียมและสารสีสีเหลืองตะกั่วดีบุก II เท่านั้นที่ประกอบด้วยตะกั่ว เมื่อพิจารณาฐานข้อมูล [19] พบว่าสารสีสีเหลืองโครเมียมจะให้พีคของตะกั่ว โครเมียมและร่องรอยของแคลเซียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังภาพที่ 4-15 แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ของสารสีสีเหลืองตะกั่วดีบุก II ต้องมีส่วนประกอบของธาตุดีบุก (Sn) ซึ่งไม่พบในผลการทดลอง ดังนั้นจึงคาดว่าตะกั่วอาจเกิดการผสมสีระหว่างสีเหลืองและสีขาวตะกั่ว ในขณะที่เดียวกันปริมาณของธาตุเหล็กที่พบ มากเพียงพอที่จะคาดการณ์ได้ว่า อาจมีการใช้สารสีจากดินเหลืองที่มีส่วนผสมหลักคือเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่ได้จากแร่เกอไทต์ (goethite)

ตารางที่ 4-6 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีเหลืองตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	54.49 ±3.10	Si	55.71 ±3.14	Si	58.41 ±3.13
Ca	22.56 ±0.70	Ca	21.45 ±0.73	Ca	22.40 ±0.79
Ti	14.60 ±0.65	Ti	13.32 ±0.67	Pb	10.28 ±0.62
Pb	2.68 ±1.55	Pb	4.79 ±1.55	Ti	3.14 ±1.49
Fe	2.28 ±0.93	Fe	1.97 ±0.98	Cr	2.80 ±1.08
Zn	1.84 ±0.72	Zn	1.55 ±0.77	Fe	2.65 ±0.86
Cr	0.69 ±2.19	Cr	0.66 ±2.21	Zn	0.32 ±1.73
Mn	0.47 ±2.29	Mn	0.43 ±2.34		
K	0.37 ±6.99	Tc	0.08 ±3.82		
Sr	0.03 ±4.25	Sr	0.03 ±4.17		
		Y	0.01 ±6.64		

ตารางที่ 4-7 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีเหลืองตำแหน่งที่ 4 และ 5 ของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 4		ตำแหน่งที่ 5	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	56.47 ±3.14	Si	55.04 ±3.23
Ca	26.05 ±0.69	Ca	23.58 ±0.74
Pb	6.46 ±0.76	Pb	10.46 ±0.65
Ti	6.45 ±1.02	Ti	5.69 ±1.07
Fe	2.11 ±0.95	Cr	2.55 ±1.11
Cr	2.06 ±1.25	Fe	1.84 ±1.01
Zn	0.40 ±1.52	Zn	0.52 ±1.31
		K	0.32 ±8.01



ภาพที่ 4-15 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสีสี่เหลี่ยมบริเวณตำแหน่งที่ 3

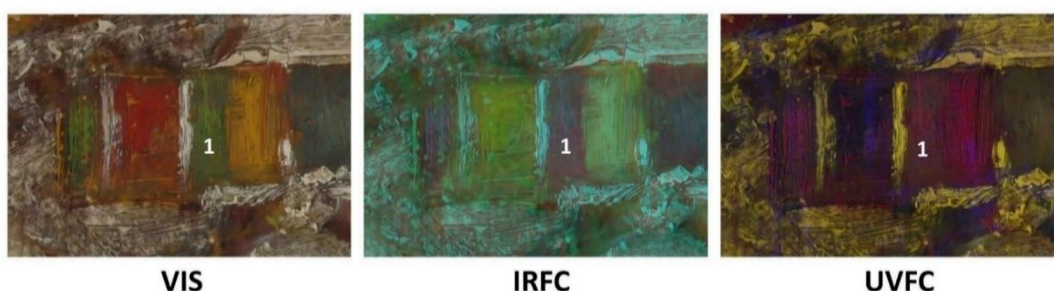
4.1.6 สีเขียว



ภาพที่ 4-16 บริเวณของสีเขียวที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.6.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

จากภาพที่ 4-17 เมื่อใช้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ พบว่าเทคนิคที่สามารถแยกแยะสีเขียวได้ดีที่สุดคือ IRFC และ UVFC โดยเมื่อสังเกตภายใต้ IRFC บริเวณสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์จะปรากฏเป็นสีชมพูอมน้ำเงิน และภายใต้ UVFC จะปรากฏเป็นสีน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก pigment checker ที่มีสารสีสีเขียวทางประวัติศาสตร์จำนวน 8 ชนิด สารสีที่ปรากฏเป็นลักษณะเดียวกันมีเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ได้แก่ สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment)



ภาพที่ 4-17 ตำแหน่งที่ 1 ของบริเวณสีเขียวที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์ ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, IRFC และ UVFC

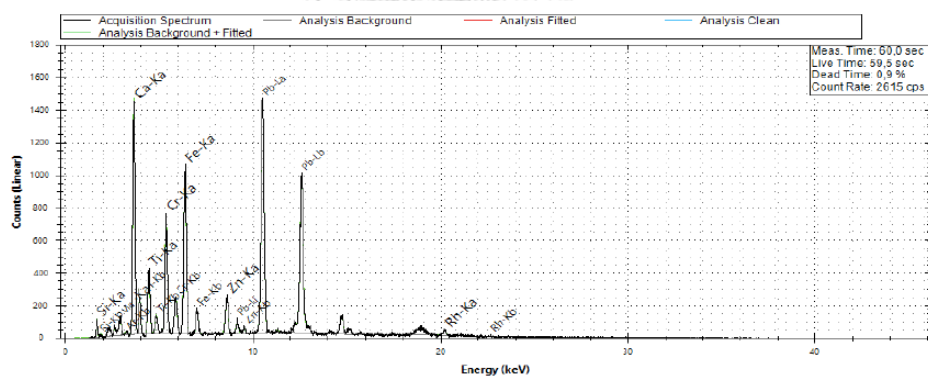
4.1.6.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

เนื่องจากจากการถ่ายภาพเชิงเทคนิคพบเพียงสารสีชนิดเดียวที่เป็นไปได้ ได้แก่ สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ ทำให้การใช้เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีในบริเวณสีเขียวมีจุดประสงค์เพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าว เมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีเขียวของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่า ธาตุที่มีความเข้มข้นได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ตะกั่ว (Pb) ไททานเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) ดังตารางที่ 4-8 จากฐานข้อมูล [19] พบว่าสารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์จะประกอบด้วยธาตุโครเมียมและร่องรอยของแคลเซียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ดังภาพที่ 4-18 ซึ่งโครเมียมมีปริมาณมากกว่าบริเวณสีอื่นในพระบรมสาทิสลักษณ์ ส่วนธาตุชนิดอื่นที่พบบริเวณสีเขียวอาจเกิดจากสีรองพื้นและธาตุที่เกิดจากธาตุของสารสีสีขาวที่ใช้ในการผสมกับสีเขียว

ตารางที่ 4-8 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสี่เหลี่ยมของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1

Element	Concentration (%)
Si	59.31 ±3.08
Ca	19.98 ±0.82
Pb	7.64 ±0.65
Ti	6.91 ±0.98
Fe	2.47 ±0.89
Cr	2.36 ±1.18
K	0.70 ±5.57
Zn	0.50 ±1.38
Tc	0.12 ±3.29



ภาพที่ 4-18 สเปกตรัมเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสี่เหลี่ยมบริเวณตำแหน่งที่ 1

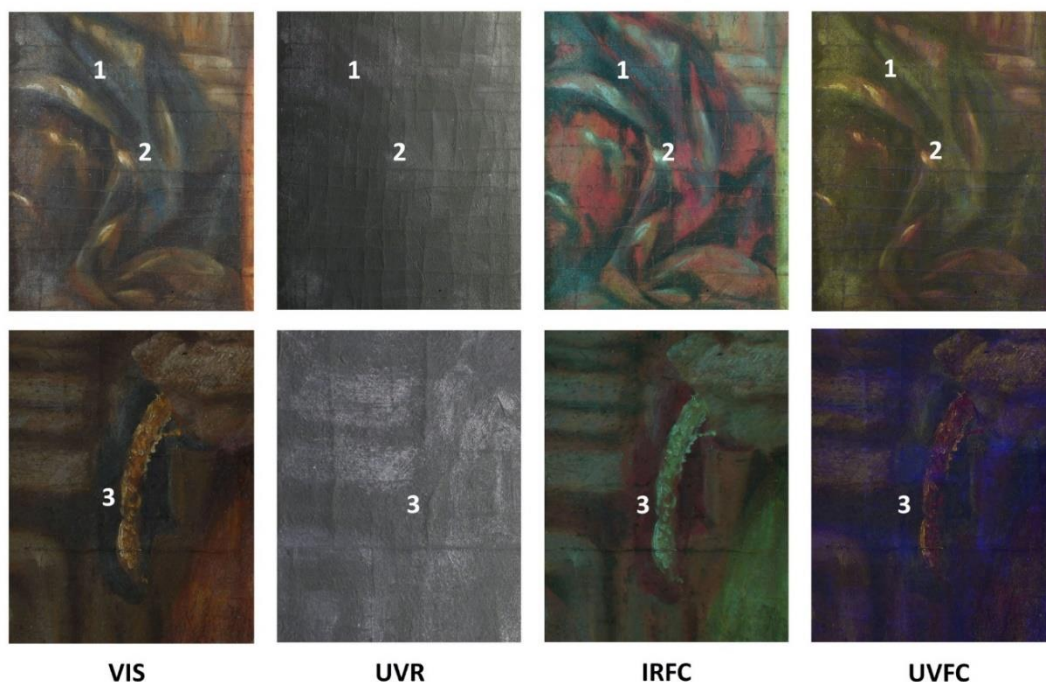
4.1.7 สีน้ำเงิน



ภาพที่ 4-19 บริเวณของสีน้ำเงินที่วิเคราะห์หาสารสีในพระบรมสาทิสลักษณ์

4.1.7.1 การระบุสารสีด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิค

เมื่อใช้การถ่ายภาพเชิงเทคนิคเพื่อวิเคราะห์หาสารสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์บริเวณดังภาพที่ 4-19 จากภาพที่ 4.20 พบว่าเทคนิคที่สามารถแยกแยะสีน้ำเงินได้ดีที่สุดคือ UVR, IRFC และ UVFC โดยเมื่อส่องเกตภายใต้ UVR สีน้ำเงินจะแสดงออกเป็นลักษณะมืด ภายใต้ IRFC จะปรากฏเป็นสีแดง และภายใต้ UVFC จะปรากฏเป็นสีเขียวเข้มจนถึงดำ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก pigment checker ที่มีสารสีน้ำเงินทางประวัติศาสตร์จำนวน 17 ชนิด สารสีที่ปรากฏเป็นลักษณะเดียวกันมี 2 ชนิด ได้แก่ สารสีคราม (indigo blue pigment) และสารสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment)



ภาพที่ 4-20 ตำแหน่งที่ 1, 2 (บน) และ 3 (ล่าง) ของบริเวณสีน้ำเงินที่วัดพระบรมสาทิสลักษณ์ ด้วยการถ่ายภาพเชิงเทคนิคแบบ VIS, UVF, IRFC และ UVFC

4.1.7.2 การระบุสารสีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

เมื่อพิจารณาธาตุที่ได้จากบริเวณสีน้ำเงินของพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่าธาตุที่มีความเข้มข้นชัดเจน ได้แก่ ซิลิกอน (Si) แคลเซียม (Ca) ไททานเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) ตะกั่ว (Pb) โครเมียม (Cr) และสังกะสี (Zn) ดังตารางที่ 4-9 เมื่อพิจารณาจากงานวิจัย [19] พบว่าทั้งสารสีจากครามและสารสีสีน้ำเงินมาจา จะให้พีคของเหล็กเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีการพบธาตุเหล็ก เนื่องจากสารสีสีน้ำเงินมาถูกทำขึ้นจากแร่ปาลิโอรซ์ไกต์ผสมกับคราม [7] ทำให้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของสารสีจากครามแล้ว นอกเหนือจากเหล็ก สารสีจากครามจะให้ร่องรอยของแมงกานีสและสังกะสีร่วมด้วย ซึ่งจากผลการทดลองไม่มีการพบแมงกานีสในบริเวณนี้ ดังนั้นสารสีสีน้ำเงินมาจึงเป็นสารสีที่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยธาตุอื่นที่พบในบริเวณสีน้ำเงิน พบว่าเป็นชนิดเดียวกันและมีปริมาณใกล้เคียงกับบริเวณอื่นในพระบรมสาทิสลักษณ์ จึงอนุมานได้ว่าธาตุเหล่านี้เกิดจากสาเหตุเดียวกัน คือ ปัจจัยที่เกี่ยวกับสีรองพื้นและสีผสม

ตารางที่ 4-9 ธาตุและความเข้มข้นในบริเวณสีน้ำเงินของพระบรมสาทิสลักษณ์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3	
Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)	Element	Concentration (%)
Si	60.55 ±2.89	Si	59.63 ±2.99	Si	56.22 ±3.03
Ca	31.85 ±0.60	Ca	29.79 ±0.65	Ca	27.31 ±0.64
Ti	4.23 ±1.28	Ti	4.05 ±1.34	Ti	5.77 ±1.04
Fe	2.00 ±0.96	Fe	2.79 ±0.84	Fe	5.18 ±0.58
K	0.69 ±5.09	Pb	2.35 ±1.94	S	2.69 ±7.60
Pb	0.27 ±2.23	K	0.92 ±4.63	Pb	1.17 ±1.80
Cr	0.21 ±1.87	Cr	0.25 ±1.78	K	0.97 ±4.24
Zn	0.12 ±2.73	Zn	0.15 ±2.51	Cr	0.37 ±1.51
Cu	0.07 ±4.06	Cu	0.07 ±4.24	Zn	0.26 ±1.87
Sr	0.01 ±5.50	Sr	0.02 ±5.43	Cu	0.02 ±7.07
				Sr	0.02 ±5.38
				Nb	0.01 ±5.01

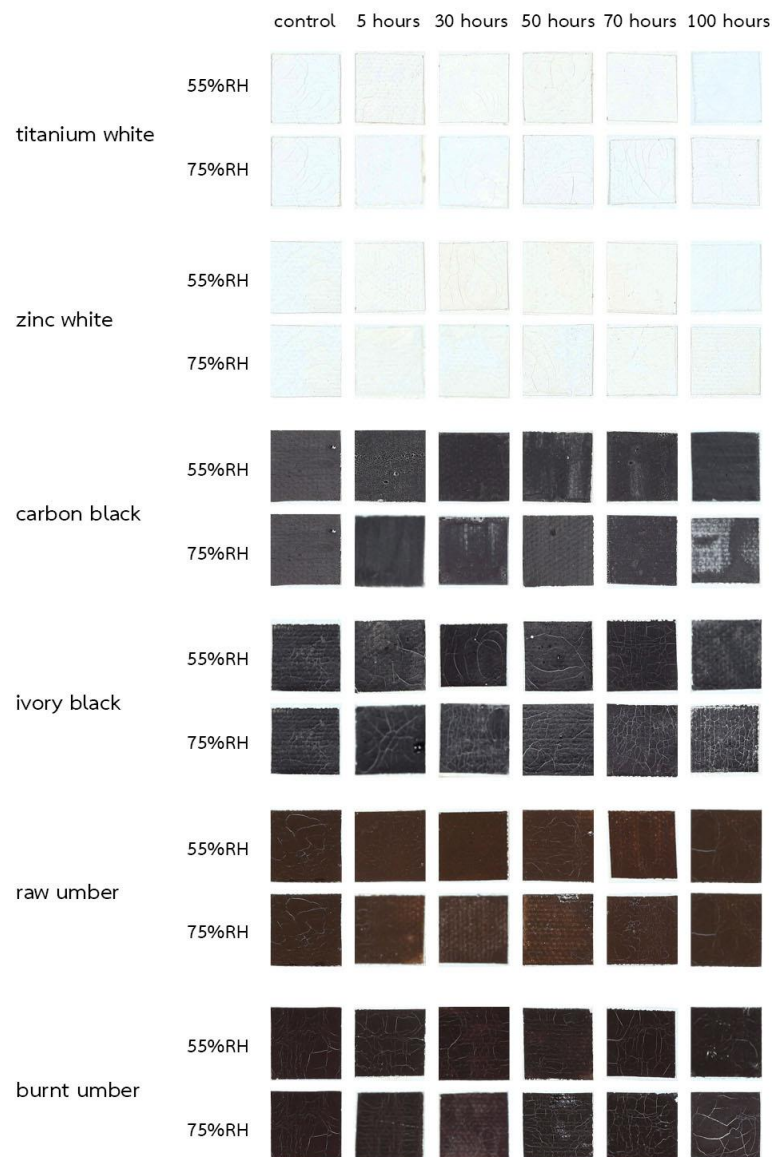
จากผลที่ได้จากการถ่ายภาพเชิงเทคนิคและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี สรุปได้ว่าสารสีที่คาดว่ามีการใช้งานในพระบรมสาทิสลักษณ์ ได้แก่สารสีทั้ง 12 ชนิด ดังตารางที่ 4-10 โดยเลือกใช้สารสีเหล่านี้ในการสร้างแผ่นสีตัวอย่างเพื่อจำลองการเสื่อมสภาพในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4-10 สารสีที่คาดว่ามีการใช้งานในพระบรมสาทิสลักษณ์

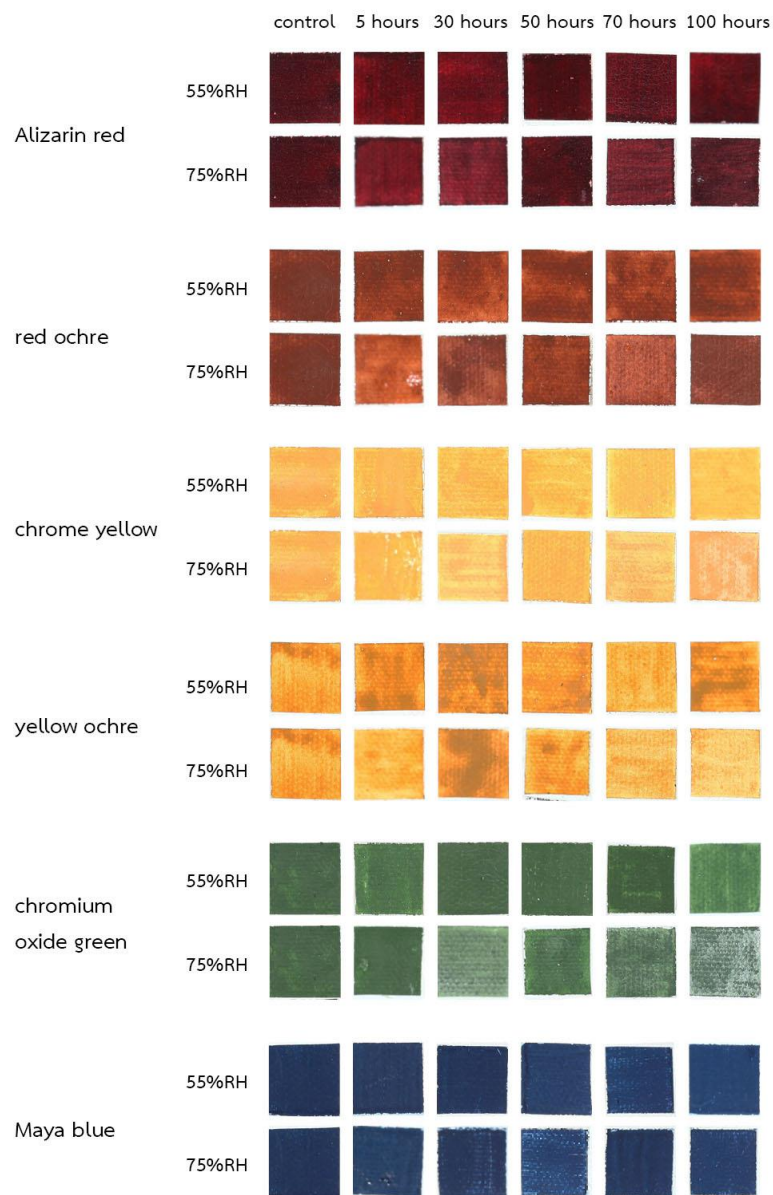
สี	สารสี
ขาว	สารสีสีขาวไททาเนียม สารสีสีขาวสังกะสี
ดำ	สารสีสีดำคาร์บอน สารสีสีดำงาช้าง
น้ำตาล	สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีน้ำตาลไหม้
แดง	สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง
เหลือง	สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง
เขียว	สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์
น้ำเงิน	สารสีสีน้ำเงินมายา

4.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารสี

หลังจากเร่งการเสื่อมสภาพของแผ่นสีตัวอย่างเป็นเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ดังภาพที่ 4-21 และ 4-22 การเปลี่ยนแปลงของสารสีแต่ละชนิดถูกศึกษาด้วยสเปกตรัมการสะท้อนแสงและวิธีการทางเคมี ได้แก่ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและรามานสเปกโทรสโกปี โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดและสเปกตรัมรามานในส่วนของภาคผนวก



ภาพที่ 4-21 สารสีสีขาวไททาเนียม สารสีสีขาวสังกะสี สารสีสีดำคาร์บอน สารสีสีน้ำตาลเข้ม สารสีสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลอัมเบอร์และสารสีสีน้ำตาลไหม้ ในสภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพเป็นเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75%



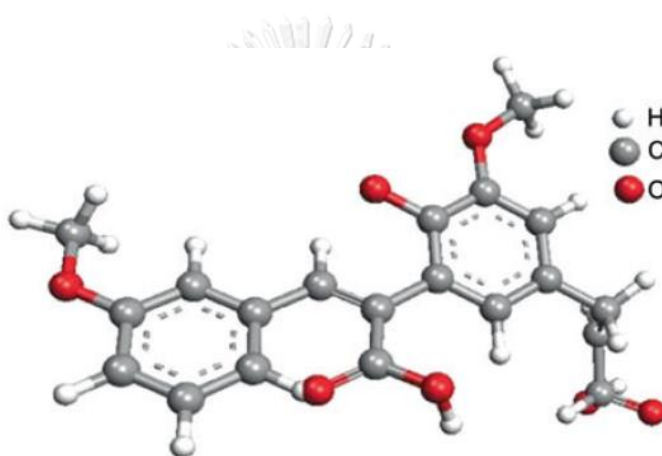
ภาพที่ 4-22 สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์และสารสีน้ำเงินมายา ในสภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพเป็นเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75%

4.2.1 สารสีสีขาวไททาเนียม (titanium white pigment)

สารสีสีขาวไททาเนียมมีชื่อทางเคมีว่าไททาเนียมไดออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ TiO_2

4.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากฐานข้อมูล [23] พบว่าสารสีสีขาวไททาเนียมหรือไททาเนียมไดออกไซด์ ประเภทรูไทล์จะไม่แสดงพีคในอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมของตัวอย่างสีไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองกลับปรากฏพีคที่ 1019, 1227, 1409 และ 1595 cm^{-1} ซึ่งคาดว่า เป็นพีคของกัมอาร์บิกที่ใช้เป็นสารยึด ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ แสดงโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 4-23 เนื่องจากมีลักษณะพีคใกล้เคียงกันที่ 1065, 1225, 1412 และ 1604 cm^{-1}



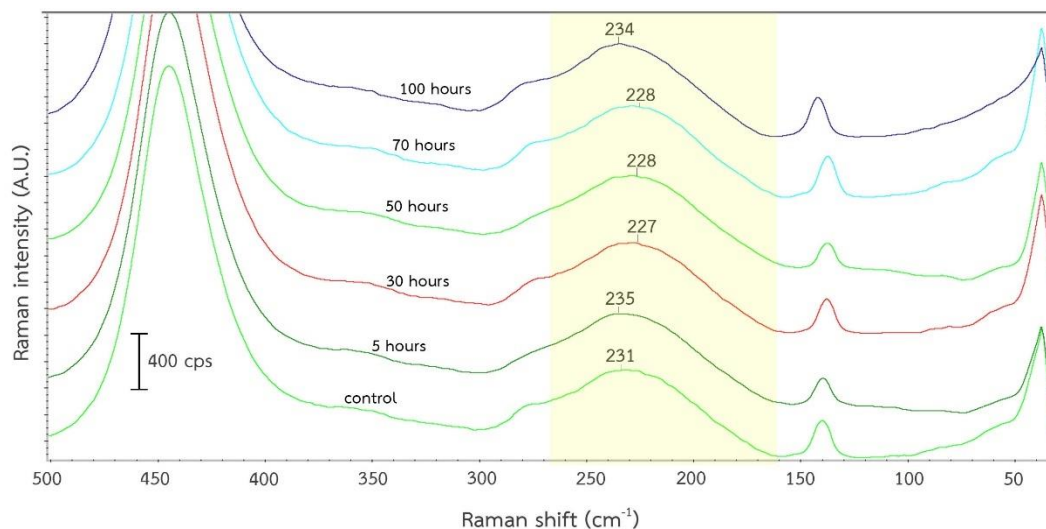
ภาพที่ 4-23 โครงสร้างทางเคมีของกัมอาร์บิก [24]

4.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [25] พบว่าสารสีสีขาวไททาเนียมประเภทรูไทล์จะเกิดพีคที่ 144, 235, 320–360, 448, 612 และ 827 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเกิดจากสารสีบริเวณ 140, 235, 445 และ 607 cm^{-1} ส่วนพีคที่บริเวณ 320–360 และ 827 cm^{-1} เป็นพีคที่อ่อนมาก ทำให้ยากต่อการสังเกต

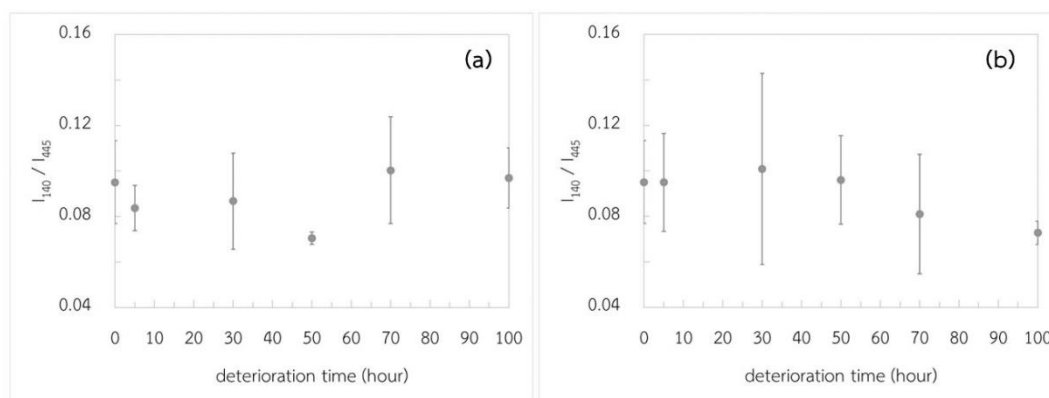
เมื่อสังเกตการณ์การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าสารสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่เวลาการฉายแสง 30 ชั่วโมง เกิดการเลื่อนของพีคจากตำแหน่ง 235 cm^{-1} ไปที่ 228 cm^{-1} จากนั้นจึงการเปลี่ยนแปลงจนกลับมายังตำแหน่งเดิมที่เวลา 100 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4-24 โดยการเลื่อนของพีคนี้ไม่เกิดขึ้นในสารสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พีคตำแหน่ง 235 cm^{-1} ที่พบเป็นลักษณะของพีคกว้างในไททาเนียมไดออกไซด์ประเภทรูไทล์ ในหลายงานวิจัยกล่าวว่าเป็นพีคที่ไม่ปกติ [25] โดยตั้งสมมติฐานว่าเกิดจากขั้นตอนการทำสารสี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวัดค่าการโพลาไรซ์กลับไม่พบหลักฐานยืนยันที่สอดคล้องกับสมมติฐานดังกล่าว Hara และ Nicol [26] ได้เสนอว่าพีคนี้เกิดขึ้นจาก

โครงสร้างผลึกของรูไทล์ที่ไม่เป็นระเบียบซึ่งส่งผลต่อการกระเจิงแบบรามาน ดังนั้นเกิดการเลื่อนของพีคในบริเวณนี้ อาจเกิดจากจากโครงสร้างของผลึกที่ไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างผลึกของสารสี



ภาพที่ 4-24 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 235 cm^{-1} ของสารสีสีขาวไททาเนียมที่สภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 140 , 235 และ 607 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 445 cm^{-1} ($I_{140, 235, 607}/I_{445}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความสูงพีค อัตราส่วนความสูงพีคบริเวณ 140 cm^{-1} เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับ โดยพีคบริเวณ 140 cm^{-1} เป็นช่วงพีคที่เกิดจากโหมดการสั่นแบบ b_{1g} ของไททาเนียมไดออกไซด์ [25] ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะของ Ti-Ti ในโครงสร้างผลึก [27] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ทำให้อนุมานได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีสาเหตุจากการแปรปรวนของการทดลอง ดังภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-25 I_{140}/I_{445} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีสีขาวไททาเนียม เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.1.2 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.39, 0.26, 0.53, 0.26 และ 0.48 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.30, 0.48, 0.11, 0.24 และ 0.38 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 ดังนั้นค่าความแตกต่างสีที่น้อยกว่า 1 หมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี

4.2.2 สารสีสีขาวสังกะสี (zinc white pigment)

สารสีสีขาวสังกะสีมีชื่อทางเคมีว่าสังกะสีออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ ZnO

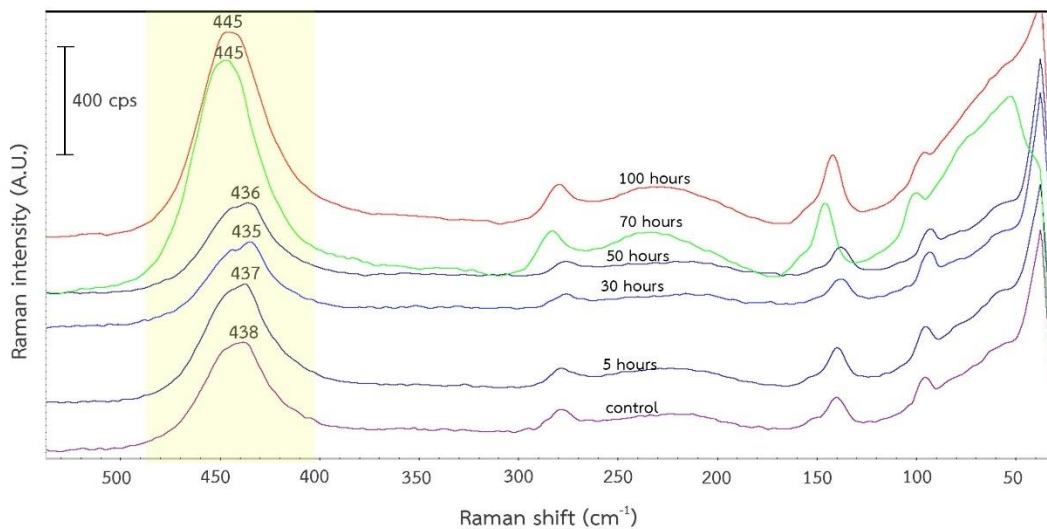
4.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากฐานข้อมูล [23] พบว่าสารสีสีขาวสังกะสีจะเกิดพีคที่ 430 และ 530 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุมกลับไม่พบพีคของสารสี แต่ปรากฏพีคที่ 1012, 1409 และ 1597 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงพีคของกำมะถัน คาดว่าอาจเกิดจากกำมะถันที่มีปริมาณมากกว่าสารสี ทำให้พีคของสารสีแสดงออกมาเป็นพีคอ่อนจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้

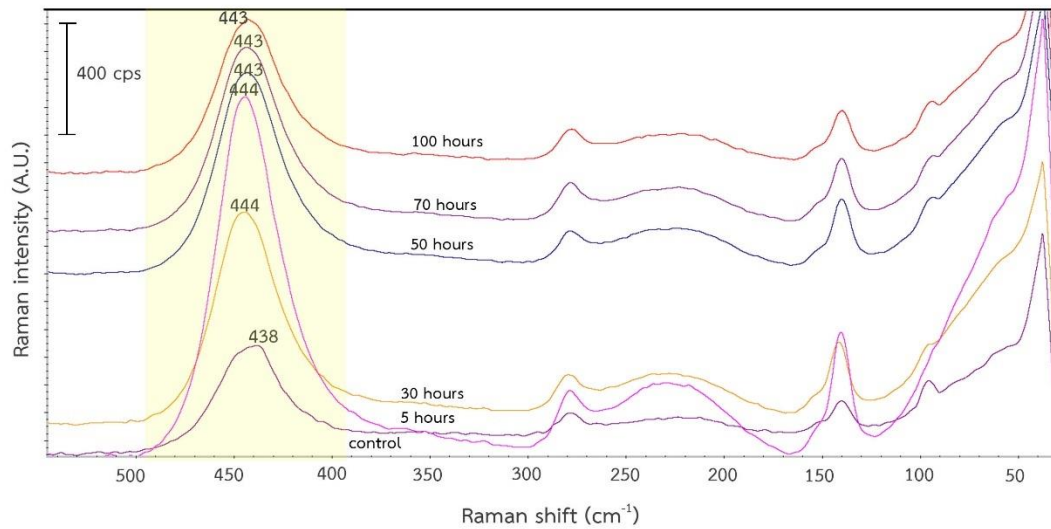
4.2.2.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [28] พบว่าสารสีสีขาวสังกะสีจะปรากฏพีคหลักที่ 437 cm^{-1} และมักวิเคราะห์ร่วมกับพีคบริเวณที่ 98, 339 และ 388 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบพีคที่คาดว่าได้เกิดจากสารสีที่ 94 และ 438 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าสารสีที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ 55% ตั้งแต่ระยะเวลาการฉายแสง 70 ชั่วโมงจนถึง 100 ชั่วโมง พบการเลื่อนของพีค 438 cm^{-1} ไปยัง 446 cm^{-1} ดังภาพที่ 4-26 ในขณะที่สารสีที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ 75% พบการเลื่อนของพีคในตำแหน่งเดียวกันที่ระยะเวลาฉายแสงตั้งแต่ 5 ชั่วโมงไปจนถึง 100 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4-27 เนื่องจากสารสีสีขาวยังสังกะสีหรือสังกะสีออกไซด์มีโครงสร้างแบบ Wurtzite hexagonal [28] พีคบริเวณ 438 cm^{-1} ในสังกะสีออกไซด์ถูกจัดประเภทอยู่ในกลุ่ม E_2 ซึ่งเป็นกลุ่มที่แอกทีฟเฉพาะกับรามานเท่านั้น โดยการที่พีค 438 cm^{-1} เลื่อนตำแหน่งไปยัง 445 cm^{-1} นั้นขึ้นอยู่กับสัณฐานวิทยาของโครงสร้างนาโนที่เกี่ยวข้องกับความเครียดภายในที่ก่อให้เกิดการเติบโตของโครงสร้างผลึกในทิศทางต่างกัน ผลคือจะแสดงการเลื่อนของพีคไปยังเวฟเนัมเบอร์ที่มากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ โดยความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจะเร่งการเกิดการเลื่อนของพีคบริเวณ 438 cm^{-1}

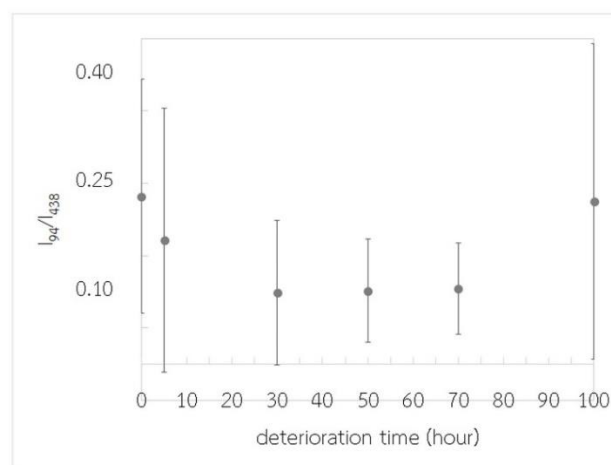


ภาพที่ 4-26 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 438 cm^{-1} ของสารสีสีขาวยังสังกะสีที่สภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-27 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานของพีค 438 cm^{-1} ของสารสีสีขาวยังกะสีที่สภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 94 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 438 cm^{-1} (I_{94}/I_{438}) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าอัตราส่วนความสูงของพีคบริเวณ 94 cm^{-1} มีแนวโน้มความเข้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพมากขึ้น เมื่ออยู่ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ดังภาพที่ 4-28 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนความสูงพีคที่ได้ พบว่ามีการเบี่ยงเบนสูง ทำให้สามารถอนุมานได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการไม่คงที่ของการทดสอบเท่านั้น



ภาพที่ 4-28 I_{94}/I_{438} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีขาวยังกะสี เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.2.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.68, 0.42, 0.41, 0.45 และ 0.58 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.27, 0.55, 0.60, 0.77 และ 0.81 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสี

4.2.3 สารสีสีดำคาร์บอน (carbon black pigment)

สารสีสีดำคาร์บอนมีสูตรทางเคมีคือ C

4.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากฐานข้อมูล [29] พบว่าสารสีสีดำคาร์บอนจะเกิดพีคที่ 1118 และ 1630 cm^{-1} ซึ่งเป็นบริเวณพีคของ C=O และ C-O ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบว่าไม่เกิดพีคที่ใกล้เคียงกับพีคของสารสีในสเปกตรัมอินฟราเรด

4.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากฐานข้อมูล [29] พบว่าสารสีสีดำคาร์บอนจะเกิดพีคที่ 1340 และ 1600 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเกิดจากสารสีที่ 1323 และ 1595 cm^{-1} ซึ่งเป็นปกติของวัตถุที่เป็นสารประกอบของคาร์บอนในบริเวณสเปกตรัมรามานระหว่าง 1000–1800 ที่ให้ข้อมูลทางโครงสร้างของคาร์บอน โดยพีคที่บริเวณ 1500–1600 cm^{-1} จะเรียกว่า G band ที่เกิดจากการยึดของพันธะ C-C ในสารประกอบคาร์บอน และพีคบริเวณ 1300–1400 cm^{-1} จะเรียกว่า D band ที่เกิดจากความไม่เป็นระเบียบของคาร์บอนที่มีไฮบริดเซชันแบบ sp^2

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าบริเวณ G band เกิดการแปรปรวนระหว่าง 1590–1604 cm^{-1} โดยการแปรปรวนเกิดขึ้นภายในระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพเท่ากัน เช่นเดียวกับบริเวณ D band ที่เกิดการแปรปรวนของพีคระหว่าง 1320–1330 cm^{-1} จากผลการทดลอง ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับให้ลักษณะการเลื่อนของพีคที่เหมือนกัน เนื่องจากโครงสร้างของสารประกอบคาร์บอนว่องไวต่อรามานสเปกโทรสโกปี ทำให้ประเภทของเลเซอร์ รวมถึงพารามิเตอร์อื่น ๆ ของการทดลองส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมรามานที่ได้ ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ร่วมกับสัญญาณรบกวนที่ได้จากสารยึดยังส่งผลต่อการระบุการเปลี่ยนของสารสีอีกด้วย [30] ดังนั้นการแปรปรวนของพีคสเปกตรัมที่เกิดขึ้นในการทดลองไม่อาจสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสารสี

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคพบว่าอัตราส่วนของ G band ต่อ D band ($I_{G \text{ band}}/I_{D \text{ band}}$) ของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 55% เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

อยู่ระหว่าง 0.646–0.718 และการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคของความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% อยู่ระหว่าง 0.695–0.747 โดยไม่มีแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการไม่คงที่ของการทดสอบเท่านั้น

4.2.2.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 0.19, 1.36, 1.15, 0.25 และ 0.23 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 0.70, 1.18, 1.58, 0.72 และ 2.68 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยกล่าวไว้ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีในงานศิลปะในระยะยาว พบว่าความแตกต่างสีระหว่างก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณเดียวกันเท่ากับ 4 หน่วย ซึ่งความแตกต่างสีจากงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับอายุงานศิลปะถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี [31]

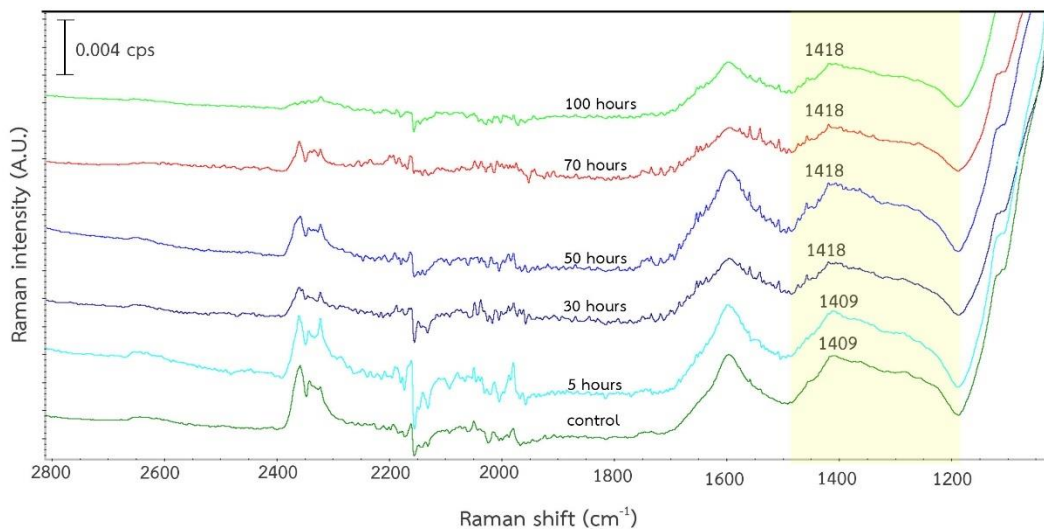
4.2.4 สารสีดำงาช้าง (ivory black pigment)

สารสีดำงาช้างมีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และคาร์บอน (C)

4.2.4.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

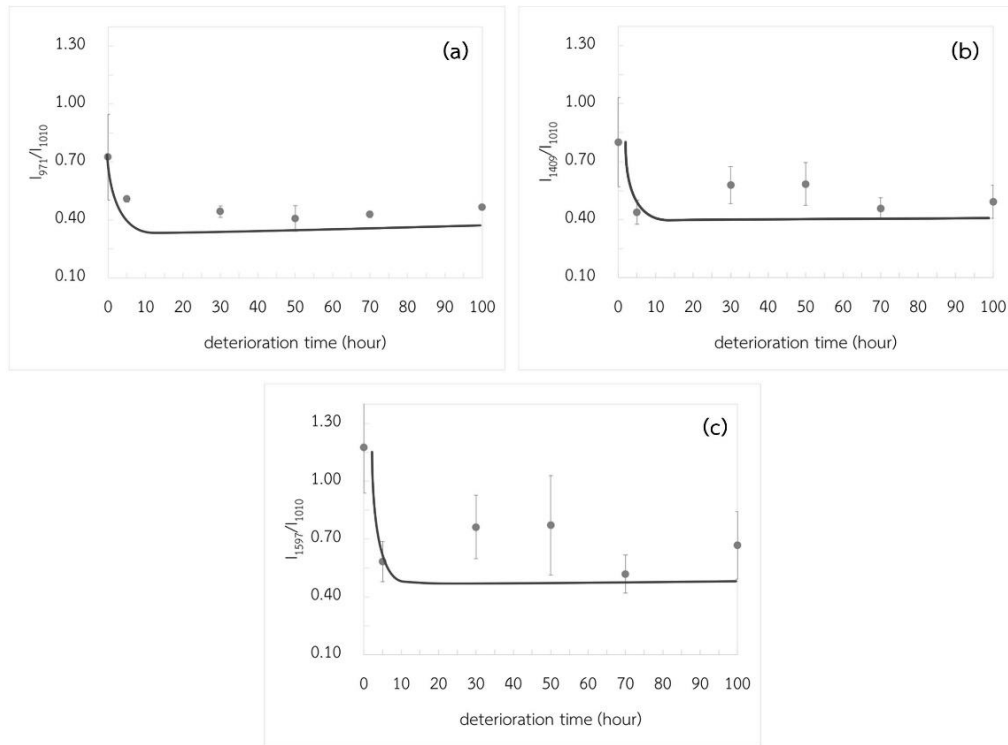
จากฐานข้อมูล [23] พบว่าสารสีดำคาร์บอนจะเกิดพีคที่ 874, 963, 1091, 1410, 1462 และ 1594 cm^{-1} แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบว่าพีคของสารสีที่เห็นได้ชัดเจนที่ 971, 1010, 1409 และ 1597 cm^{-1} และพบพีคที่ 872 cm^{-1} ในบางตัวอย่าง อย่างไรก็ตามพีคที่ 872 cm^{-1} นั้นเป็นพีคที่ไม่ชัดเจนจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% เกิดการเลื่อนของพีค 1409 cm^{-1} ไปยัง 1418 cm^{-1} ที่เวลา 30 ชั่วโมงไปจนถึง 100 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4-29 โดยพีคบริเวณ 1409 cm^{-1} เป็นพีคของ C–C ที่อยู่ภายในวงแหวนของหมู่ฟีนิล [32] การเลื่อนของพีคไปยังเวฟเนมเบอร์ที่มากขึ้นหมายถึงการที่มวลของโมเลกุลนั้นลดลง เนื่องจากยังมีโมเลกุลมีมวลน้อย ความถี่การสั่นพันธะจะสามารถเกิดได้มากขึ้น หรือกล่าวคือความถี่ของการสั่นพันธะจะแปรผกผันกับมวลของโมเลกุล ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าค่าพีคในทุกบริเวณแปรปรวน โดยไม่มีแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจเกิดจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นและส่งผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างของสารสี ทำให้เกิดเป็นสัญญาณที่ไม่คงที่ในสเปกตรัมอินฟราเรด

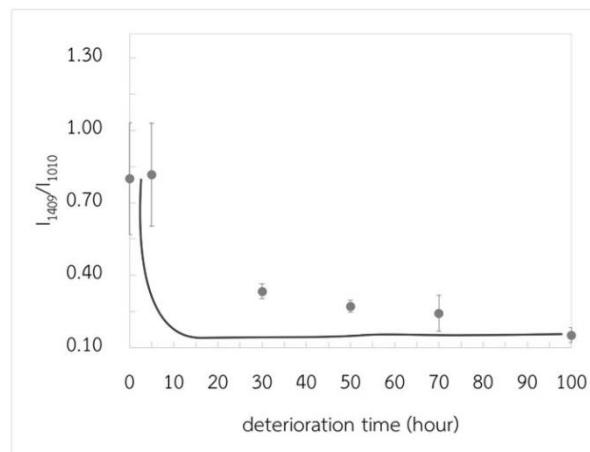


ภาพที่ 4-29 การเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดของพีค 1409 cm^{-1} ของสารลีสี่ด่างข้างที่สภาวะควบคุมและเมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ $971, 1010, 1409$ และ 1597 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1010 cm^{-1} ($I_{971, 1010, 1409, 1597}/I_{1010}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% เมื่อเทียบกับสภาวะควบคุม อัตราส่วนความสูงพีคบริเวณ $971, 1409$ และ 1597 cm^{-1} มีความเข้มพีคลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามในแต่ละเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพไม่ได้มีการลดลงอย่างมีแนวโน้ม ดังภาพที่ 4-30 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าเมื่อเทียบกับสภาวะควบคุม อัตราส่วนความสูงพีคบริเวณ 1409 cm^{-1} มีความเข้มพีคลดลง โดยที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ความเข้มของพีคนี้ใกล้เคียงกับตัวอย่างในสภาวะควบคุม จากนั้นจึงลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้น ดังภาพที่ 4-31 ส่วนพีคบริเวณอื่นไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยยะสำคัญ



ภาพที่ 4-30 (a) I_{971}/I_{1010} (b) I_{1409}/I_{1010} (c) I_{1597}/I_{1010} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีต่างข้าง เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-31 I_{1409}/I_{1010} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีต่างข้าง เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

เนื่องจากสารสีสีต่างข้างถือว่าเป็นสารสีคาร์บอนชนิดหนึ่งที่ได้จากการเผาข้างด้วยความร้อนสูง ทำให้สเปกตรัมรามานของสารสีทั้งสองมีลักษณะเหมือนกัน จากงานวิจัย [30] พบว่าสารสีสีต่างข้างจะเกิดพีคที่ 1348 และ 1585 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเกิดจากสารสีที่ 1328 และ 1595 cm^{-1}

เช่นเดียวกับสารสีสีดำคาร์บอน การเลื่อนของพีคของสารสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ให้ผลที่เหมือนกัน คือมีการเหวี่ยงของพีคระหว่าง 1594–1607 cm^{-1} สำหรับ G band และ 1323–1338 cm^{-1} สำหรับ D band โดยไม่มีแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ ซึ่งอนุมานได้ว่าเกิดจากความว่องไวของโครงสร้างของสารประกอบคาร์บอนต่อรามานสเปกโทรสโกปี ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ถึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพีค

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคพบว่าอัตราส่วนของ G band ต่อ D band ($I_{\text{G band}}/I_{\text{D band}}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกันที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับให้ผลที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคในทุกระดับเวลา

4.2.4.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สถานะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.57, 0.48, 0.42, 0.12 และ 0.33 ตามลำดับ ซึ่งไม่สามารถสังเกตความแตกต่างของสีได้ภายใต้การมองเห็นของมนุษย์ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.98, 3.08, 1.89, 1.36 และ 4.08 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.5 สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ (raw umber pigment)

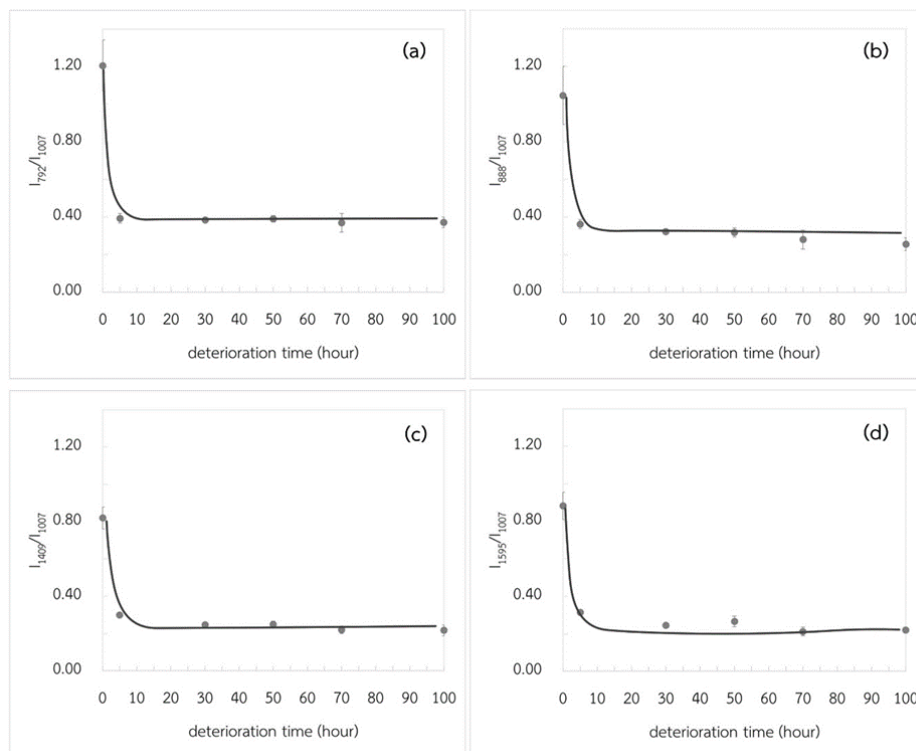
สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ประกอบด้วย เหล็ก(III)ออกไซด์ที่มีความชื้นในบางส่วน ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) แมงกานีสออกไซด์ ($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [7]

4.2.5.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

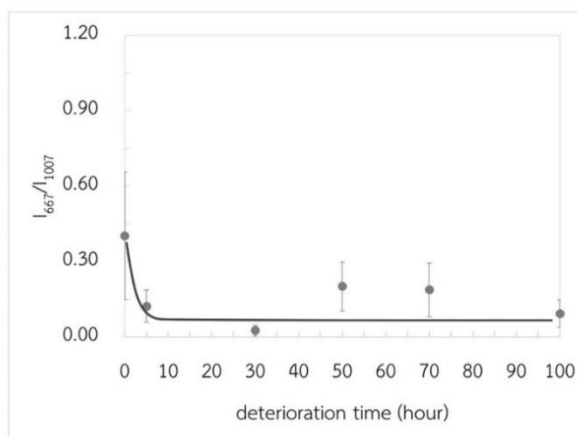
จากฐานข้อมูล [23, 33] พบว่าสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์จะเกิดพีคที่ 465, 667, 798, 898, 1035, 1419 และ 1627 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างในสถานะควบคุม พบว่าปรากฏพีคของสารสีที่ 667, 792, 888, 1007, 1409 และ 1595 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่เกิดการเลื่อนของพีค

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 667, 792, 888, 1409 และ 1595 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1007 cm^{-1} ($I_{667, 792, 888, 1409, 1595}/I_{1007}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 55% อัตราส่วนความสูงพีคบริเวณ 792, 888, 1409 และ 1595 cm^{-1} ของสารสีเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างในสภาวะควบคุมมีอัตราส่วนของพีคลดลง ดังภาพที่ 4-32 โดยมีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงเมื่อการเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5 ชั่วโมงและคงที่จนถึง 100 ชั่วโมง คาดว่าเกิดจากการแห้งตัวของสารยัดเมื่อผ่านการฉายแสง ซึ่งพีคที่ 792 และ 888 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (hydrous ferric oxides) ที่เป็นส่วนสำคัญของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ ส่วนที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพมีเพียงอัตราส่วนของพีคที่ 667 cm^{-1} เท่านั้นที่ลดลง ดังภาพที่ 4-33 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากความไม่คงที่ของการทดลอง



ภาพที่ 4-32(a) I_{792}/I_{1007} (b) I_{888}/I_{1007} (c) I_{1409}/I_{1007} (d) I_{1595}/I_{1007} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

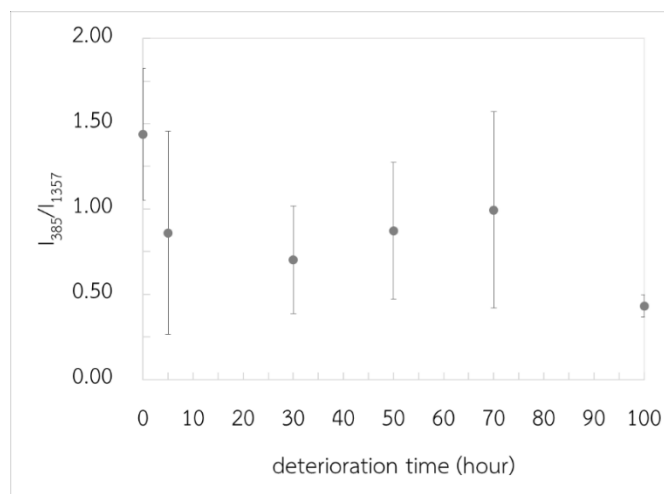


ภาพที่ 4-33 I_{667}/I_{1007} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.5.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากฐานข้อมูล [33] พบว่าสารสีน้ำตาลอัมเบอร์จะเกิดพีกที่ 204, 242, 295, 397, 482 และพีกกว้างที่ 629 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีกที่คาดว่าเกิดจากสารสีที่ 205, 240, 296, 385, 475 และพีกกว้างที่ 617 cm^{-1} อย่างไรก็ตามสเปกตรัมรามานที่ได้เกิดสัญญาณรบกวนจำนวนมาก เกิดจากการใช้เลเซอร์ที่ความเข้ม 780 นาโนเมตร ซึ่งอาจทำให้ชั้นของสารสีเกิดความเสียหายจากความร้อนและก่อให้เกิดความแปรปรวนของสัญญาณ ดังนั้นการวิเคราะห์การเปลี่ยนของพีกจึงทำได้กับพีกที่เห็นได้ชัดเท่านั้น ได้แก่พีกที่ 296 และ 385 cm^{-1} ซึ่งทั้งคู่เป็นพีกที่แสดงลักษณะจำเพาะของไฮเดรตเพอร์ริกออไซด์

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีกสเปกตรัมรามานพบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับพีกของสารสีไม่เกิดการเลื่อนใด ๆ และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีก โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีกที่ 296 และ 385 cm^{-1} ต่อความสูงพีกที่ 1357 cm^{-1} ($I_{296, 385}/I_{1357}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้น 55% อัตราส่วนความสูงพีกบริเวณ 385 cm^{-1} เมื่อเทียบระหว่างแผ่นสีตัวอย่างที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพและแผ่นสีตัวอย่างสีที่สถานะควบคุมแล้วอัตราส่วนของพีกมีค่าลดลงแต่เมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากความไม่คงที่ของการทดลอง ดังภาพที่ 4-34 ส่วนที่ความชื้น 75% ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีกเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่าง



ภาพที่ 4-34 I_{385}/I_{1357} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.5.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.71, 0.65, 0.69, 0.30 และ 0.44 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.13, 1.83, 1.63, 0.10 และ 2.36 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.6 สารสีสีน้ำตาลไหม้ (burnt umber pigment)

เช่นเดียวกับสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีน้ำตาลไหม้ประกอบด้วย เหล็ก (III)ออกไซด์ที่มีความชื้นในบางส่วน ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) แมงกานีสออกไซด์ ($\text{MnO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [7] โดยในสารสีสีน้ำตาลไหม้ แอนไฮดรัสเฟอร์ริกออกไซด์จะมีอิทธิพลต่อพีคของแมงกานีสไดออกไซด์น้อยกว่าในสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เมื่อสังเกตด้วยรามานสเปกโทรสโกปี [33]

4.2.6.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

สารสีสีน้ำตาลไหม้ทำมาหีนอัมเบอร์เช่นเดียวกับสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์เพียงแต่นำมาเผาเพื่อให้ได้สีที่เข้มขึ้น ทำให้พีคของสารสีทั้งสองใกล้เคียงกัน โดยแสดงพีคหลักอยู่ที่

1035 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของแมงกานีสไดออกไซด์ และปรากฏพีคที่ 610, 667, 798 และ 898 cm^{-1} เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างในสภาวะควบคุมพบว่าปรากฏพีคของสารสีที่ 668, 792, 883 และ 1007 cm^{-1} ความแตกต่างของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์และสารสีสีน้ำตาลไหม้ที่เห็นได้ชัดคือความสูงของพีคแมงกานีสไดออกไซด์ โดยสารสีสีน้ำตาลไหม้จะให้พีคบริเวณ 1035 cm^{-1} ที่สูงกว่า เนื่องจากปริมาณของไฮดรอกซิลหรือแอนไฮดรอกซิลเฟอร์ริกออกไซด์ภายในสารสี [33] และพีคอื่นที่ปรากฏในสารสีสีน้ำตาลไหม้อ่อนลง

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน คือในระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5–30 ชั่วโมง ไม่เกิดการเลื่อนของพีค แต่ในระยะเวลา 50–100 ชั่วโมง เกิดการแปรปรวนของพีคบริเวณ 1007 cm^{-1} โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1007–1014 cm^{-1} และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคโดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 668, 792 และ 883 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1007 cm^{-1} ($I_{668, 792, 883}/I_{1007}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่พบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค พีคของสารสีไม่เกิดการเลื่อนใด ๆ และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค

4.2.6.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [33] พบว่าสารสีสีน้ำตาลไหม้จะเกิดพีคที่ 221, 389, 402, 609 และ 651 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเกิดจากสารสีที่ 223, 405, และ 609 cm^{-1} อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สเปกตรัมรามานที่ได้จากการทดลองมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับแสดงพีคที่มีสัญญาณรบกวนมากเกินไปจนจะนำมาวิเคราะห์การเลื่อนของพีคได้

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 223, 405, และ 609 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1347 cm^{-1} ($I_{223, 405, 609}/I_{1347}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับ

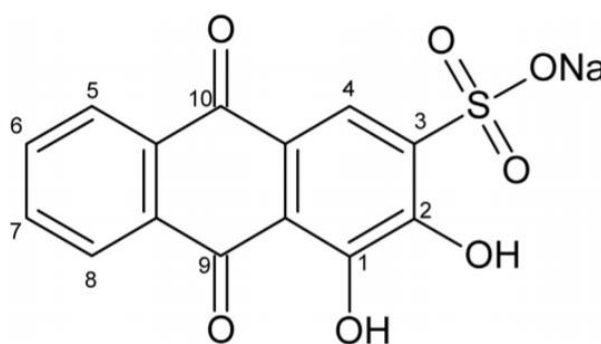
4.2.6.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) ระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.12, 0.30, 1.28, 0.43 และ 0.49 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 1.25, 3.71, 1.06, 0.91 และ 3.41 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์

สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.7 สารสีสีแดงอะลิซาริน (Alizarin red pigment)

สารสีสีแดงอะลิซาริน ($C_{14}H_7NaO_7S$) หรืออะลิซารินคาร์มีนเป็นสารสีที่พัฒนามาจาก 1,2-ไดไฮดรอกซีแอนทราควิโนน แสดงโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 4-35



ภาพที่ 4-35 โครงสร้างทางเคมีสารสีสีแดงอะลิซาริน [34]

4.2.7.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

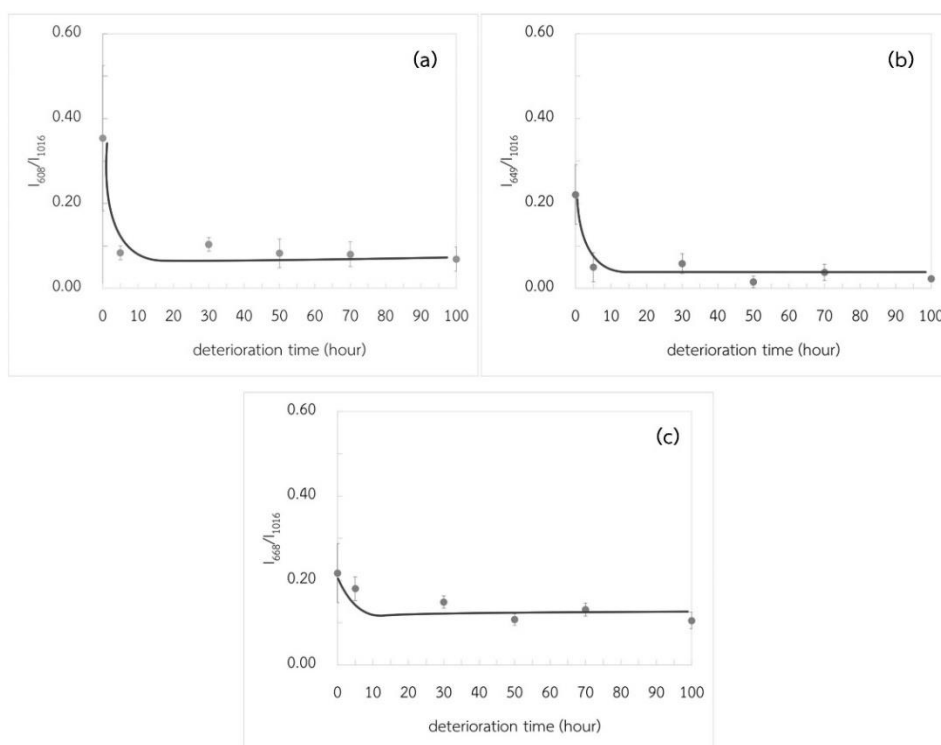
จากฐานข้อมูล [23] พบว่าสารสีสีแดงอะลิซารินจะเกิดพีคที่ 609, 654, 668, 717, 769, 838, 1090, 1186, 1268, 1288, 1349, 1360, 1466, 1526, 1590, 1637, 1716, 2855, 2926 และ 3361 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคของสารสีที่ 608, 652, 668, 716, 768, 837, 1016, 1186, 1265, 1285, 1346, 1464, 1525, 1588, 1636, 2851, 2920 และ 3292 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าไม่เกิดการเลื่อนของพีคในความถี่ทั้งสองระดับ เนื่องจากในสารสีอะลิซารินประกอบด้วยสารอะลิซารินที่สกัดมารากของต้นแมดเดอร์ ซึ่งแต่เดิมรากของต้นแมดเดอร์ถูกสกัดมาเพื่อทำสารสีแดงแมดเดอร์เล็ก แต่ได้มีการค้นพบว่ารากของต้นแมดเดอร์ประกอบด้วยสารให้สี 2 ชนิด ได้แก่ อะลิซาริน (Alizarin) และ เพอร์พูริน (Purpurin) ซึ่งเพอร์พูรินเป็นสารที่ทำให้เกิดการซีดจางในสี จึงทำสารสีที่สกัดเอาเพอร์พูรินออกกลายเป็นสารสีสีแดงอะลิซารินที่มีความเสถียรและคงทนสูง นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Legan และคณะ [34] พบว่าเมื่อสารสีอะลิซารินถูกกระจายภายใต้สารยึดที่เป็นไขมันจะส่งผลต่อการเร่งการเสื่อมสภาพของสารสี เนื่องจากจะเกิดฟิล์มของโซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate, Na_2SO_4) บริเวณผิวหน้าของสีที่ส่งผลต่อรังสียูวี แสงขาวและความชื้นสัมพัทธ์ ทำให้เกิดการเร่งการเสื่อมสภาพด้วย

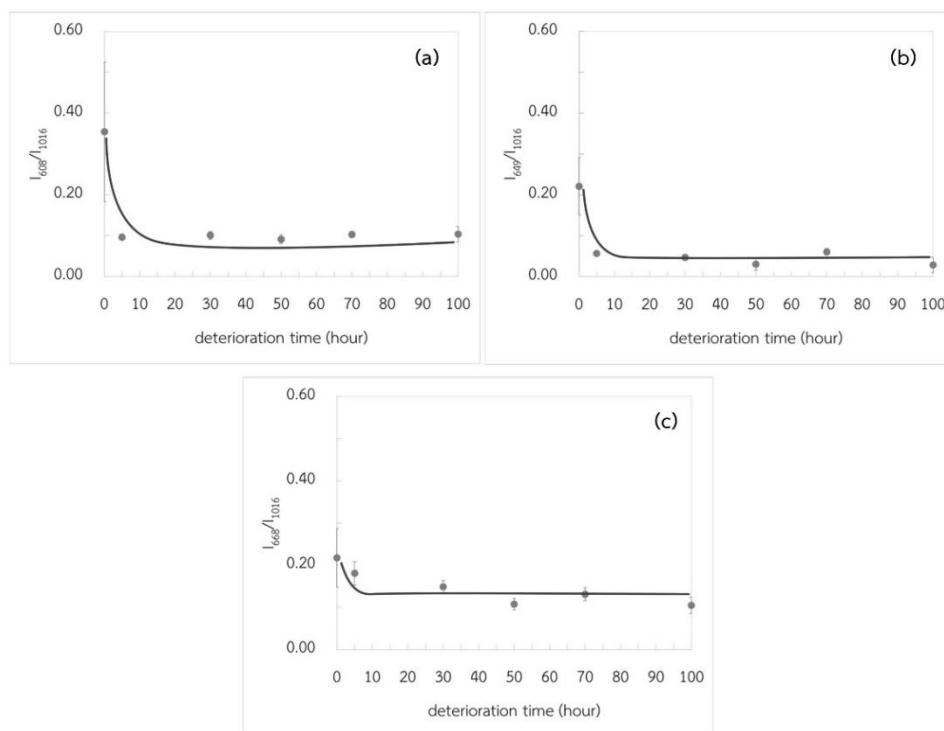
โฟโตออกซิเดชัน (photo-oxidation degradation) อย่างไรก็ตาม ในการทดลองได้ใช้แก๊มอาร์บิกที่เป็นพอลิแซ็กคาไรด์เป็นสารยัด ทำให้ไม่พบผลของการเสื่อมสภาพที่ปรากฏอย่างชัดเจน

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 608, 652, 668, 716, 768, 837, 1186, 1265, 1285, 1346, 1464, 1525, 1588, 1636, 2851, 2920 และ 3292 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1016 cm^{-1} ($I_{608, 652, 668, 716, 768, 837, 1186, 1265, 1285, 1346, 1464, 1525, 1588, 1636, 2851, 2920, 3292}/I_{1016}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับ พีคบริเวณ 608, 649 และ 668 cm^{-1} มีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพตั้งแต่ 5 ชั่วโมง แต่ไม่มีแนวโน้มการลดลงของพีคหลังจากเพิ่มระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแห้งตัวของสารยัดเมื่อผ่านการฉายแสง โดยความชื้นที่ 55% ดังภาพที่ 4-36 และความชื้นที่ 75% ดังภาพที่ 4-37

ซึ่ง 608 และ 649 cm^{-1} เป็นบริเวณที่แสดงลักษณะการสั่นที่เกี่ยวข้องกับการยืดหดและเปลี่ยนรูปร่างของสายโซ่คาร์บอน ส่วนพีคที่ 668 cm^{-1} แสดงถึงการงอของพันธะ C=C ในระนาบ หรือการงอของพันธะ CCC นอกระนาบ [34]



ภาพที่ 4-36 (a) I_{608}/I_{1016} (b) I_{649}/I_{1016} (c) I_{668}/I_{1016} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีสีแดง อะลิซารินเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-37 (a) I_{608}/I_{1016} (b) I_{649}/I_{1016} (c) I_{668}/I_{1016} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของสารสีสีแดง อะลิซารินเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.7.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากฐานข้อมูล [18] พบว่าสารสีสีแดงอะลิซารินจะเกิดพีคที่ 1290, 1365 และ 1585 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสภาวะควบคุม พบพีคของสารสีที่ 1290, 1326 และ 1479 cm^{-1}

เช่นเดียวกับในสเปกตรัมอินฟราเรด ไม่พบการเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามานในความชื้นทั้งสองระดับ เนื่องจากความเสถียรของสารสีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารย้อม

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 1290 และ 1326 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1479 cm^{-1} ($I_{1290, 1326}/I_{1479}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับไม่มีการเปลี่ยนความเข้มของพีคเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพ

4.2.7.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.13, 1.22, 0.98, 0.51 และ 0.56 ตามลำดับ ส่วนที่

ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 3.08, 3.79, 3.83, 4.67 และ 4.88 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.8 สารสีจากดินแดง (red ochre pigment)

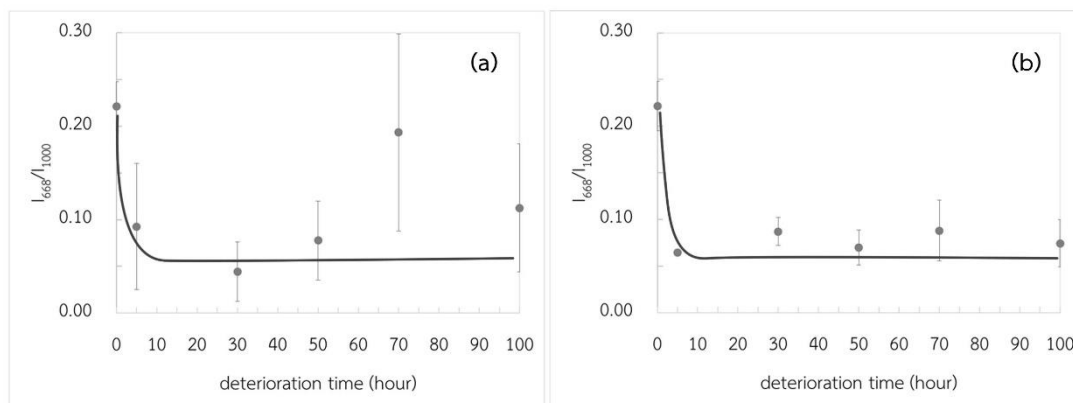
สารสีจากดินแดงประกอบด้วยแอนไฮดรอสเหล็ก(III)ออกไซด์ (Fe_2O_3) กับซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ได้จากดินขาว (kaolinite) ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

4.2.8.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากงานวิจัย [35] พบว่าสารสีจากดินแดงจะเกิดพีคที่ 510, 675, 793, 912, 937, 1009, 1036, 1115, 3617, 3647 และ 3690 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคของสารสีที่ 524, 668, 788, 908, 935, 1000, 1023, 1111, 3618, 3650 และ 3690 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับ พีคบริเวณ 788 cm^{-1} เกิดความแปรปรวน โดยเกิดการเลื่อนของพีคระหว่าง $776\text{--}788\text{ cm}^{-1}$ ในทุกระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ ซึ่งเกิดจากการสั่นของพันธะ Si-O-Al [35]

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 524, 668, 788, 908, 935, 1023, 1111, 3618, 3650 และ 3690 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1000 cm^{-1} ($I_{524, 668, 788, 908, 935, 1023, 1111, 3618, 3650, 3690}/I_{1000}$) ที่สถานะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับ พีคบริเวณ 668 cm^{-1} มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของเข้มพีคเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สถานะควบคุม โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับ ความเข้มของพีคลดลงตั้งแต่ระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5 ชั่วโมงและมีค่าคงที่จนถึงระยะเวลาการเร่งเสื่อมสภาพ 100 ชั่วโมง โดยคาดว่าเกิดจากการแห้งตัวของสารยึดเมื่อผ่านการฉายแสง ดังภาพที่ 4-38



ภาพที่ 4-38 I_{668}/I_{1000} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีจากดินแดงเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.8.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [33] พบว่าสารสีจากดินแดงจะเกิดพีคที่ 223, 240, 292, 405, 463, 496, 610, 658 และพีคกว้างที่ 815 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคของสารสีที่ 223, 292, 409, 441 และ 610 cm^{-1} แต่กลับไม่พบพีคบริเวณ 658 cm^{-1} ที่เป็นพีคสำคัญของสารสีจากดินแดง ซึ่งพบว่าพีคบริเวณ 658 cm^{-1} เป็นพีคของพันธะ Al-O-Si มักปรากฏอย่างชัดเจนในดินขาว ซึ่งใช้เป็นส่วนผสมของสารสีจากดินแดง จึงเป็นไปได้สารสีจากดินแดงที่ใช้เป็นสารสีจากดินแดงสังเคราะห์ที่ไม่ได้ทำมาจากดินขาว

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมรามาน พบว่าที่ความชื้นทั้งสองระดับไม่มีการเลื่อนพีคในทุกตำแหน่ง และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 223, 409, 441 และ 610 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 292 cm^{-1} ($I_{223, 409, 441, 610}/I_{292}$) ที่สถานะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความสูงพีคเมื่อเทียบกับแผ่นตัวอย่างภายใต้สถานะควบคุม

4.2.8.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สถานะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.80, 0.85, 0.20, 0.54 และ 0.70 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 5.26, 2.65, 4.80, 9.72 และ 2.98 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงาน

อนุรักษัระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

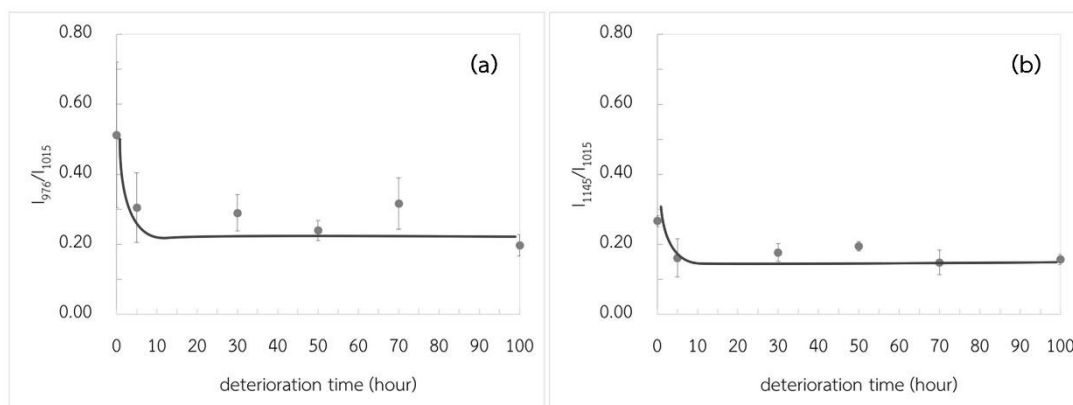
4.2.9 สารสีเหลืองโครเมียม (chrome yellow pigment)

สารสีเหลืองโครเมียมมีชื่อทางเคมีว่าโพแทสเซียม เฮกซะไนไตรโตโคบอลเตด(III) มีสูตรทางเคมีคือ $K_3[Co(NO_2)_6] \cdot H_2O$

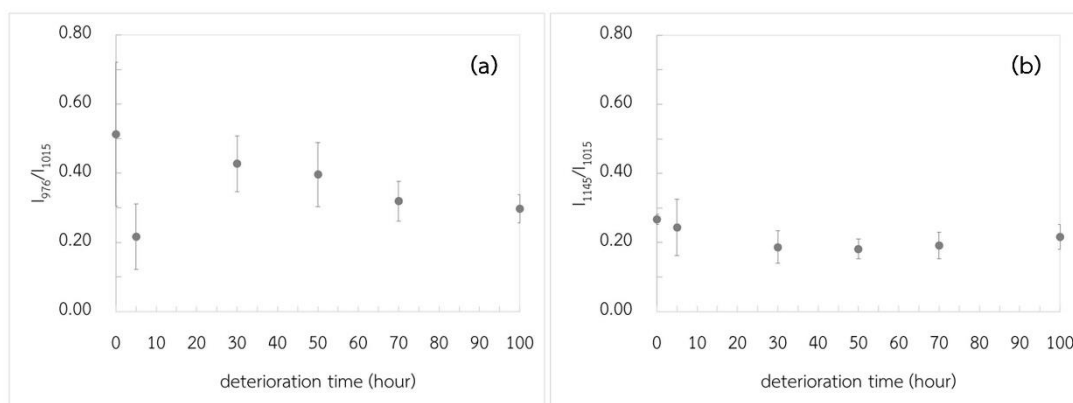
4.2.9.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากฐานข้อมูล [23] พบว่าสารสีเหลืองโครเมียมจะเกิดพีคที่ 595, 627, 831, 853, 967, 1040, 1095 และ 1173 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเป็นของสารสีที่ 870, 976, 1015, 1067 และ 1145 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรด พบว่าไม่มีการเลื่อนของพีคสารสีที่ความชื้นทั้งสองระดับ แต่กลับพบพีคเกิดใหม่บริเวณ 1250 cm^{-1} ที่ระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ 5 ชั่วโมงของสารสีภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 75% เท่านั้น โดยคาดว่าเป็นพีคของพันธะระหว่าง C-N หรือเอมีน และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 870, 976, 1067 และ 1145 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1015 cm^{-1} ($I_{870, 976, 1067, 1145}/I_{1015}$) ที่สถานะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สถานะควบคุม อัตราส่วนความสูงของพีคบริเวณ 976 และ 1145 cm^{-1} ลดลง เมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพ 5 ชั่วโมง แต่หลังจากเร่งการเสื่อมสภาพมากขึ้น ไม่ได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่แปรผันกับระยะเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ดังภาพที่ 4-39 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอัตราส่วนความสูงพีคที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ทำให้สามารถอนุมานได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีคเกิดขึ้นจากความแปรปรวนที่เกิดจากการทดลอง ดังภาพที่ 4-40



ภาพที่ 4-39 (a) I_{976}/I_{1015} และ (b) I_{1145}/I_{1015} ที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ 55% ของสารสีซีเหลืองโครเมียมเมื่อ
 เร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-40 (a) I_{976}/I_{1015} และ (b) I_{1145}/I_{1015} ที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ 75% ของสารสีซีเหลืองโครเมียมเมื่อ
 เร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.9.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากฐานข้อมูลพบว่าสารสีซีเหลืองโครเมียมจะเกิดพีคที่ 342, 359, 375, 405, 844 และ 972 cm^{-1} แต่จากผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมรามานไม่ปรากฏพีคของสารสีซีเหลืองโครเมียม โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

4.2.9.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 0.49, 1.22, 4.04, 0.68 และ 2.09 ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000})

เท่ากับ 1.19, 2.17, 0.84, 1.76 และ 4.49 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.10 สารสีจากดินเหลือง (yellow ochre pigment)

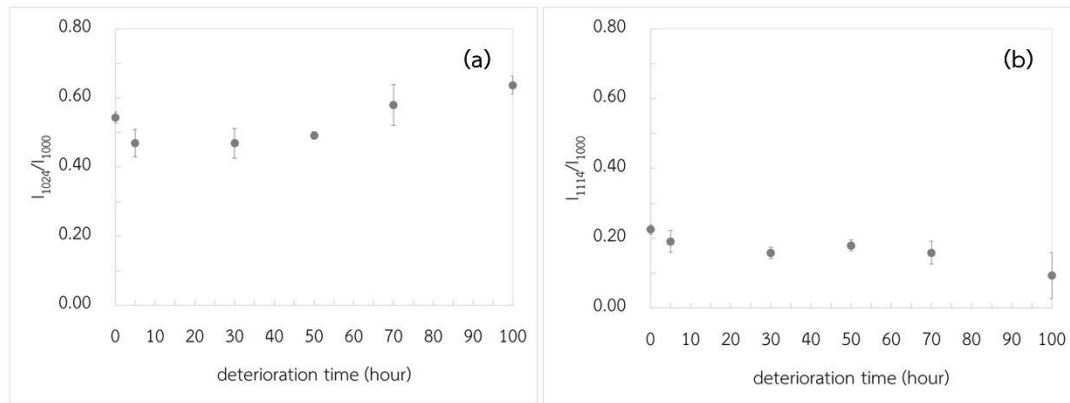
สารสีจากดินเหลืองมีชื่อทางเคมีว่าเหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ $\text{FeO}(\text{OH})$

4.2.10.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากฐานข้อมูล [33] พบว่าสารสีจากดินเหลืองจะเกิดพีคที่ 466, 534, 695, 797, 914, 936, 1008, 1032, 1106, 3150 และ 3436 cm^{-1} และเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเป็ของสารสีที่ 529, 688, 794, 908, 934, 1000, 1024 และ 1114 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเลื่อนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าไม่มีการเลื่อนของพีคสารสีที่ความชื้นทั้งสองระดับ และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 529, 688, 794, 908, 934, 1024 และ 1114 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1000 cm^{-1} ($I_{529, 688, 794, 908, 934, 1024, 1114} / I_{1000}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ย บริเวณพีค 1024 cm^{-1} อัตราส่วนความสูงพีคของตัวอย่างสารสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพจะลดลงจนถึงที่เวลา 50 ชั่วโมง จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 70–100 ชั่วโมง ส่วนบริเวณพีค 1114 cm^{-1} พบว่ามีอัตราส่วนความสูงพีคแปรผกผันกับระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่าปริมาณน้อยและเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการแปรปรวนของการทดลอง ดังภาพที่ 4-41

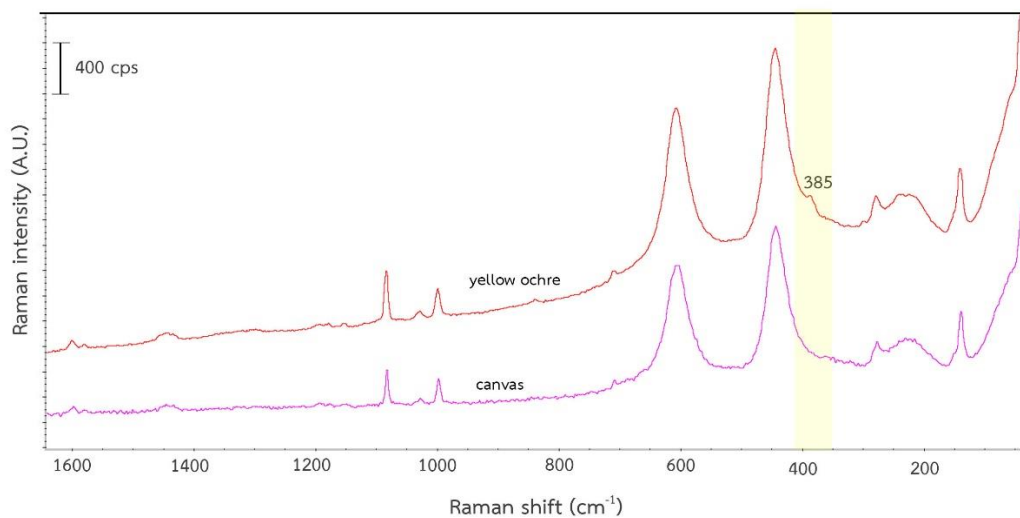
จากงานวิจัยพบว่าพีคบริเวณ 1024 cm^{-1} มีความเกี่ยวข้องกับการสั่นของพันธะ Si–O–Al และ Si–O–Si ที่เป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของดินเหลือง [36] และพีคบริเวณ 1114 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะซิลเฟต ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของพีคอาจเกิดจากการออกซิเดชันของซิลเฟต หรือถูกเจือจางด้วยไอออนของซิลเฟต [37]



ภาพที่ 4-41 (a) I_{1024}/I_{1000} และ (b) I_{1114}/I_{1000} ที่ความเข้มข้นสัมพันธ์ 75% ของสารสีจากดินเหลืองเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.10.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากฐานข้อมูล [33] พบว่าสารสีจากดินเหลืองจะเกิดพีคที่ 203, 245, 299, 393, 481, 555 และ 693 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับแร่ไลโมนไนท์ (limonite) ที่ประกอบด้วยเหล็กออกไซด์ เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์พีคที่ได้ของสารสีจากแผ่นสีตัวอย่างพบว่าไม่มีเพียงพีคบริเวณ 385 cm^{-1} ที่เป็นพีคของ Fe-O ปรากฏในสเปกตรัมของสารสี เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของสารสีจากดินเหลืองที่ได้จากการทดลองและสเปกตรัมของผ้าใบ ดังภาพที่ 4-42 พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าพีคที่เกิดขึ้นบนสเปกตรัมของสารสีจากดินเหลืองในการทดลองเกิดจากสัญญาณของผ้าใบที่ใช้เป็นวัสดุรองพิมพ์ที่มีความเข้มสูงกว่าสัญญาณของสารสี ทำให้พีคของสารสีถูกกดทับและปรากฏเพียงพีคของวัสดุรองพิมพ์



ภาพที่ 4-42 สเปกตรัมรามานของผ้าใบและสารสีจากดินเหลือง

เมื่อสังเกตการเลือนของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าที่ความถี่สัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่พบการเลือนของพีคของสารสีที่ 385 cm^{-1} และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 385 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 444 cm^{-1} (I_{385}/I_{444}) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมแล้ว อัตราส่วนความสูงพีคที่ความถี่สัมพัทธ์ทั้งสองระดับเกิดความแปรปรวน ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลของวัสดุรองรับ

4.2.10.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความถี่สัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 2.42, 1.75, 5.41, 5.58 และ 2.29 ตามลำดับ ส่วนที่ความถี่สัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 5.71, 3.66, 5.20, 5.05 และ 2.83 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.11 สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์ (chromium oxide green pigment)

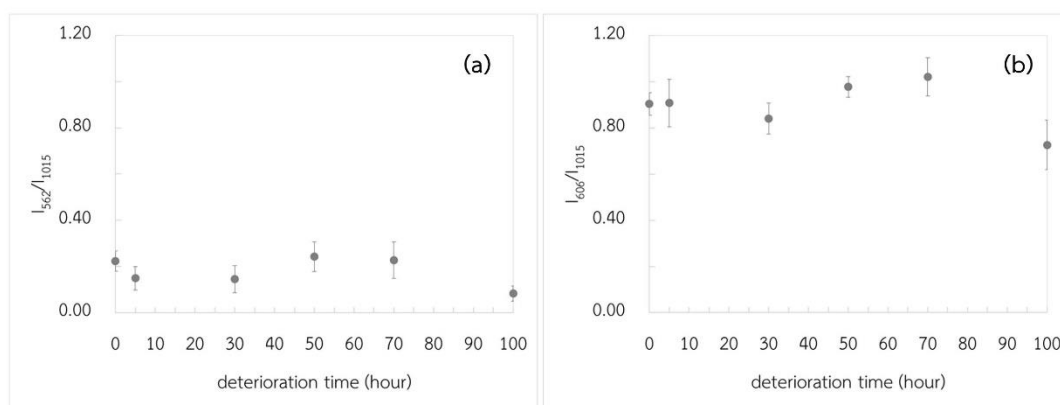
สารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์มีชื่อทางเคมีว่าโครเมียม(III)ออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ Cr_2O_3

4.2.11.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากงานวิจัย [38] พบว่าสารสีสีเขียวโครเมียมออกไซด์จะเกิดพีคหลักที่ 582 cm^{-1} ซึ่งแสดงของพันธะ Cr-O พีคที่ 631 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงลักษณะออสซิลเลชันของโครเมียมไดออกไซด์ และพีคที่ 1026 โดยเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมแล้วพบว่าปรากฏพีคที่คาดว่าเป็นพีคของสารสีที่ 562 และ 606 cm^{-1} โดยพีคบริเวณ 562 cm^{-1} นั้นเป็นพีคที่อ่อนมาก คาดว่าเกิดจากอิทธิพลของสารยึดที่ทำให้สัญญาณของพีคของสารสีปรากฏไม่ชัดเจน ส่วนพีคเล็กอื่นที่เกิดขึ้นบนสเปกตรัมอาจเกิดขึ้นจากพันธะของอะตอมของ Cr และ O ในสัญญาณที่แตกต่างกันภายในออกไซด์

เมื่อสังเกตการเลือนของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความถี่สัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่พบการเลือนของพีคของสารสี และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 562 และ 606 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1015 cm^{-1} ($I_{562, 606}/I_{1015}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าเมื่อเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมแล้ว ที่

ความชื้นสัมพัทธ์ 55% บริเวณ 562 และ 606 cm^{-1} ที่ระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ 100 ชั่วโมง มีอัตราส่วนของพีคลดลง แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่าปริมาณน้อยและมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง เนื่องจากข้อมูลมีการกระจายตัว ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการแปรปรวนของการทดลอง ดังภาพที่ 4-43 ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าอัตราส่วนของพีคมีความแปรปรวนและไม่มีแนวโน้มที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ



ภาพที่ 4-43 (a) I_{562}/I_{1015} และ (b) I_{606}/I_{1015} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ของสารสีซีเขียวโครเมียม ออกไซด์เมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.11.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [39] พบว่าสารสีซีเขียวโครเมียมออกไซด์จะเกิดพีคที่ 299, 351, 555 และ 613 cm^{-1} และเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม จะพบพีคของสารสีที่ 295, 348, 551 และ 611 cm^{-1} เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพีคสเปกตรัมรามานพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่พบการเลื่อนของพีคของสารสีและการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความสูงพีค เมื่อเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 295, 348 และ 611 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 551 cm^{-1} ($I_{295, 348, 611}/I_{551}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน

4.2.11.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.98, 0.58, 2.70, 2.74 และ 3.23 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 3.86, 4.03, 2.59, 2.45 และ 5.43 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงาน

อนุรักษัระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.2.12 สารสีสีน้ำเงินมายา (Maya blue pigment)

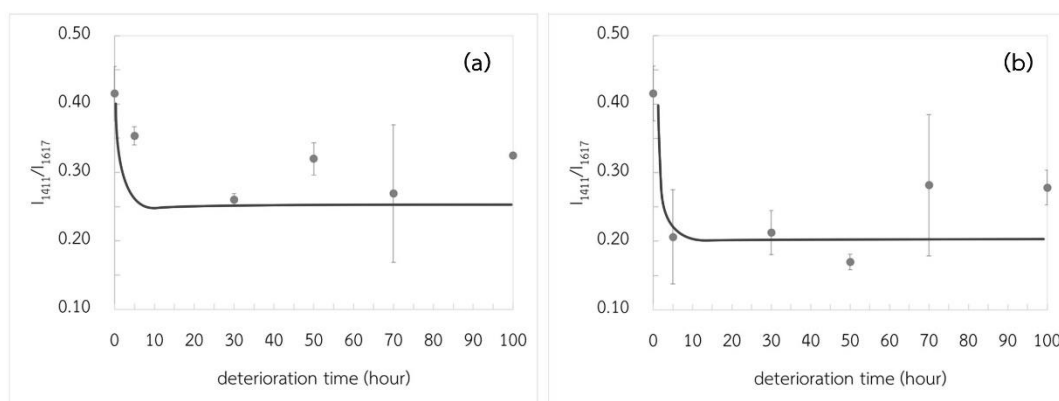
สารสีสีน้ำเงินมายาประกอบด้วยคราม ($C_{16}H_{10}N_2O_2$) และแร่พาลีโอร์ชไกต์ ($Si_8O_{20}Mg_5(OH)_2(H_2O)_4 \cdot 4H_2O$)

4.2.12.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

จากงานวิจัย [40] พบว่าสารสีสีน้ำเงินมายาจะเกิดพีคที่ 1306, 1414, 1464, 1491, 1622 และ 1651 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นตัวอย่างสีในสถานะควบคุม พบพีคที่คาดว่าเป็นของสารสีที่ 1304, 1411, 1460, 1488, 1617 และ 1653 cm^{-1}

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพีคสเปกตรัมอินฟราเรดพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับไม่พบการเลื่อนของพีคของสารสี และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค โดยเทียบอัตราส่วนความสูงพีคที่ 1304, 1411, 1460, 1488 และ 1653 cm^{-1} ต่อความสูงพีคที่ 1617 cm^{-1} ($I_{1304, 1411, 1460, 1488, 1653}/I_{1617}$) ที่สภาวะการเร่งการเสื่อมสภาพเดียวกัน พบว่าเมื่อเทียบกับสารสีจากแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุม พีคบริเวณ 1411 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับการยึดแบบไม่สมมาตรของพันธะคาร์บอนเนต [41] ในแผ่นสีตัวอย่างที่ผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพมีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงเมื่อผ่านระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพที่ 5 ชั่วโมง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแห้งตัวของสารยึดเมื่อผ่านการฉายแสง โดยเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 75% สารสีมีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงมากกว่าสารสีภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ดังภาพที่ 4-44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-44 I_{1411}/I_{1617} ที่ความชื้นสัมพัทธ์ (a) 55% และ (b) 75% ของสารสีสีน้ำเงินมายาเมื่อเร่งการเสื่อมสภาพด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน

4.2.12.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

จากงานวิจัย [38] พบว่าสารสีสีน้ำเงินมายาจะเกิดพีคที่ 1017, 1128, 1253, 1380, 1490, 1593, 1633 และ 1680 cm^{-1} แต่จากผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมรามานไม่ปรากฏพีคของสารสีสีน้ำเงินมายา โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

4.2.12.3 ความแตกต่างสี

เมื่อศึกษาความแตกต่างสีระหว่างตัวอย่างสีภายใต้สภาวะควบคุมและตัวอย่างสีที่ถูกเร่งการเสื่อมสภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.49, 1.48, 1.58, 3.36 และ 2.98 ตามลำดับ ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% ที่ระยะเวลา 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง มีค่าความแตกต่างสี (ΔE_{2000}) เท่ากับ 1.18, 1.31, 3.13, 1.61 และ 1.79 ตามลำดับ โดยความแตกต่างสีต่ำที่สุดที่การมองเห็นของมนุษย์สามารถแยกแยะได้เท่ากับ 1 อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ระยะยาว พบว่าเมื่อพิจารณาเกณฑ์ความแตกต่างสีปกติ ถ้าเทียบกับอายุงานศิลปะแล้วถือว่าไม่มีความแตกต่างสี [31]

4.3 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์

จากการคำนวณระยะเวลาปีพิพิธภัณฑ์ ดังสมการที่ 3-1 โดยกำหนดให้ 1 ปีพิพิธภัณฑ์เท่ากับการฉายแสงที่ความส่องสว่าง 150 ลักซ์ เป็นเวลา 2,950 ชั่วโมง สามารถสรุประยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพเทียบกับระยะเวลาปีพิพิธภัณฑ์ได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพและระยะเวลาปีพิพิธภัณฑ์

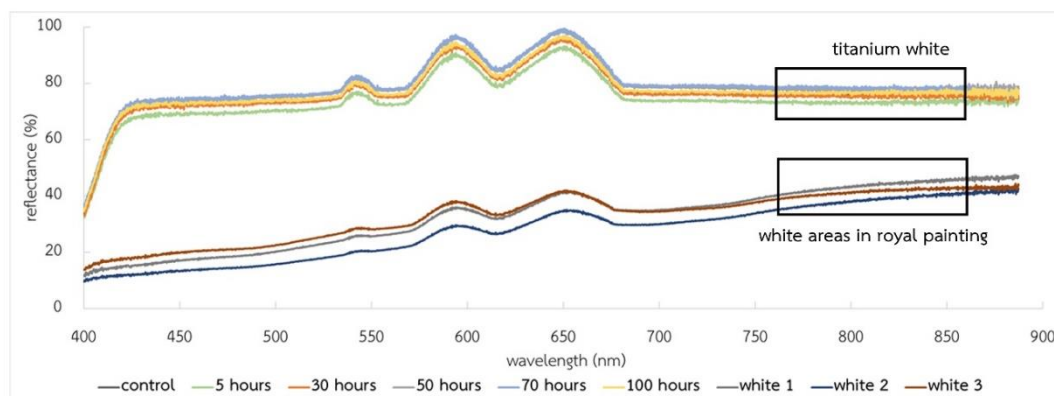
Accelerated deterioration time (hour)	Museum year (museum year)
control	0
5	1
30	6
50	10
70	14
100	20

4.3.1 สีขาว

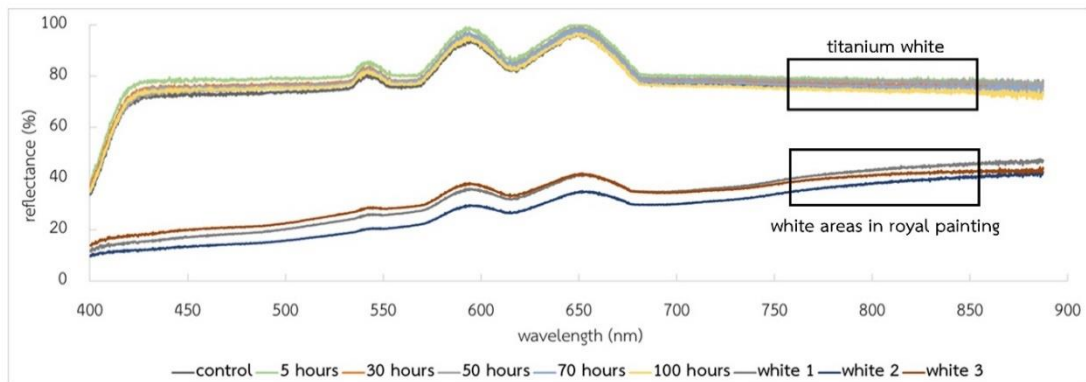
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวไททานเนียม ดังภาพที่ 4-45 และ 4-46 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และสีขาวสังกะสี ดัง

ภาพที่ 4-47 และ 4-48 จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง พบว่าสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์เป็นสีขาวในโทนเหลือง โดยมีการเสื่อมสภาพมากกว่าสีขาวในแผ่นสีตัวอย่าง จึงคาดจากการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์ว่ามีการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์มากกว่า 20 ปี จำนวนปีนี้มาจากการเทียบเวลาการจำลองการเสื่อมสภาพจากแสงในงานวิจัยนี้ที่ทำไว้สูงสุดเทียบได้กับ 20 ปี พิพิธภัณฑ์ เปอร์เซนต์การสะท้อนแสงสูงสุดที่ได้จากสเปกตรัมในช่วงแสงขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์มีค่าไม่เกิน 40% ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ ฝุ่นที่สะสมบนผิวหน้าของงานศิลปะ วาร์นิชที่ทำจากเรซินเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลต่อการงานศิลปะ หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารสีเนื่องจากสภาพแวดล้อม [42]

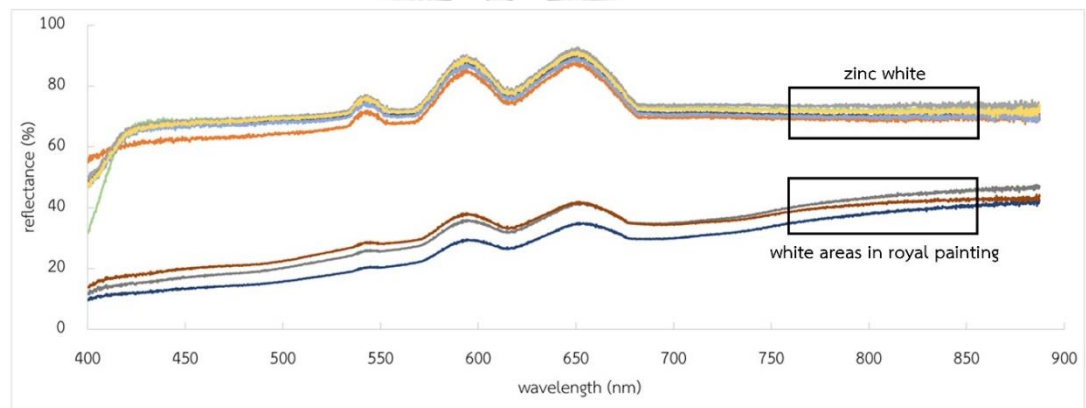
เมื่อพิจารณาการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400–425 นาโนเมตร พบว่าสีขาวไททาเนียมมีการดูดกลืนแสงมากกว่าสีขาวสังกะสี และเมื่อพิจารณาร่วมกับสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์แล้ว พบว่าการดูดกลืนแสงช่วงนี้ใกล้เคียงกับสีขาวสังกะสี จึงเป็นไปได้ว่าบริเวณสีขาวในภาพตรงตำแหน่งที่วัดเป็นสีขาวสังกะสี ส่วนการสะท้อนแสงที่พิกัด 586 และ 648 นาโนเมตร น่าจะเป็นผลมาจากวัสดุรองรับซึ่งเป็นผ้าใบ เนื่องจากในตัวอย่างที่ทำขึ้นและในพระบรมสาทิสลักษณ์มีพิกัดนี้ และสังเกตเห็นได้ในทุกสีที่วัดสเปกตรัมการสะท้อนแสง โดยจะมีพิกัดต่ำหากสีนั้นมีความทึบแสงสูงสังเกตได้จากสีตัวอย่างในภาพที่ 4-21 และ 4-22 เทียบกับสเปกตรัมการสะท้อนแสงในหัวข้อ 4.3 นี้ อีกทั้งสเปกตรัมการกระจายพลังงานของแหล่งแสงและกัมมอราบิก [43] ก็ไม่พบพิกัดนี้



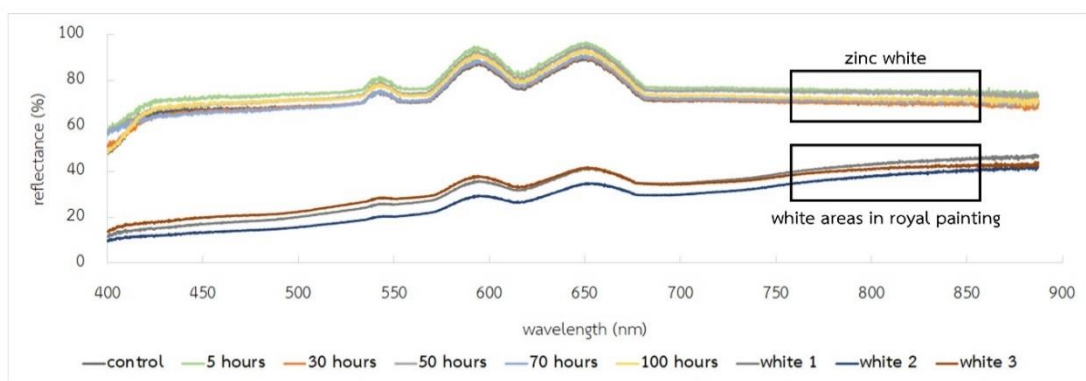
ภาพที่ 4-45 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวไททาเนียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-46 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวไททาเนียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



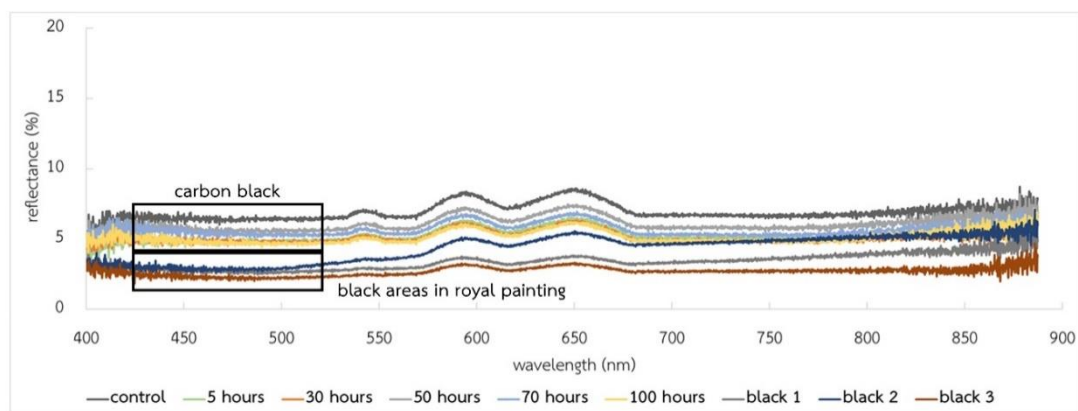
ภาพที่ 4-47 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวสังกะสีที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



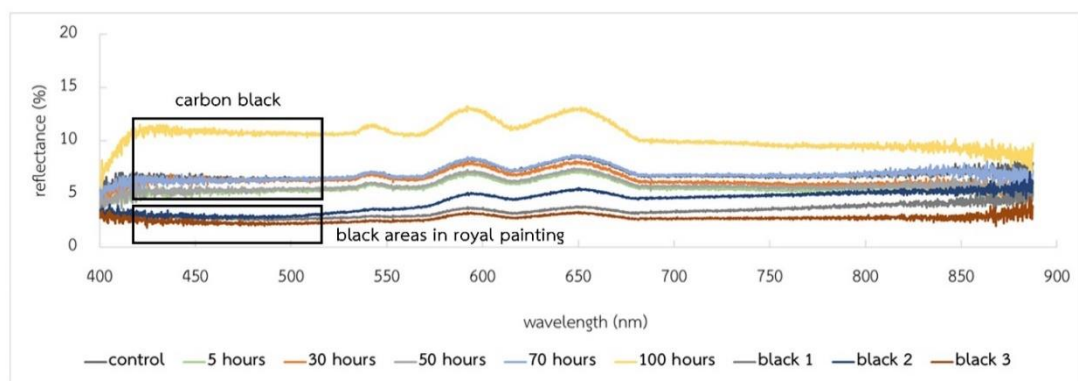
ภาพที่ 4-48 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีขาวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีขาวสังกะสีที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

4.3.2 สีดำ

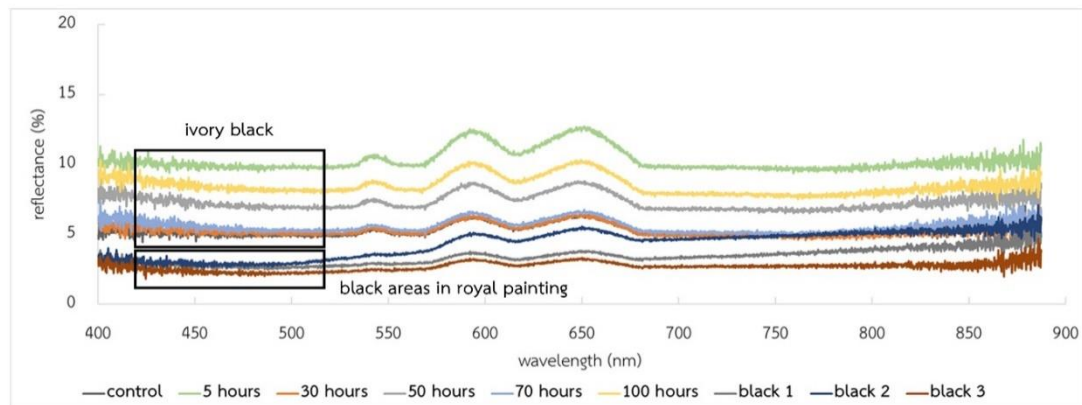
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีดำคาร์บอนดังภาพที่ 4-49 และ 4-50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และสีดำข้างเคียงภาพที่ 4-51 และ 4-52 จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง พบว่าสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างน้อยกว่าสีดำในแผ่นตัวอย่างสีในทุกระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ จึงคาดจากการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์ว่ามีการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์มากกว่า 20 ปี



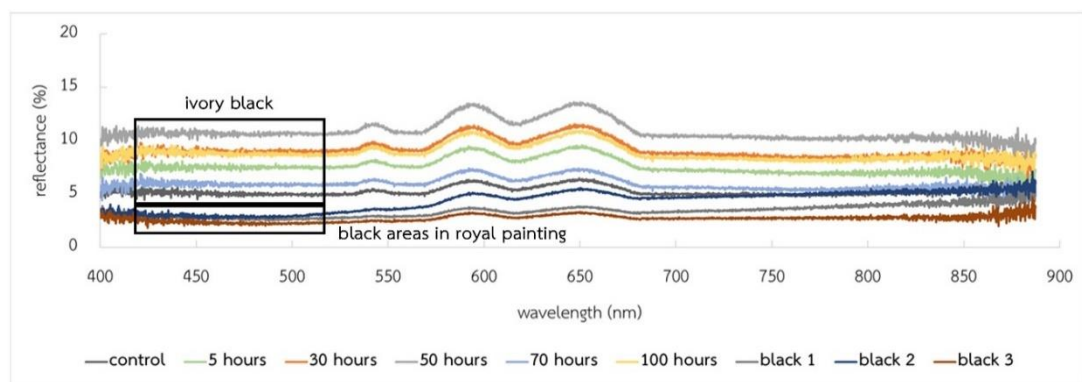
ภาพที่ 4-49 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีดำคาร์บอนที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-50 ภาพที่ 4.48 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีดำคาร์บอนที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



ภาพที่ 4-51 ภาพที่ 4.49 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีดำข้างข้างที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

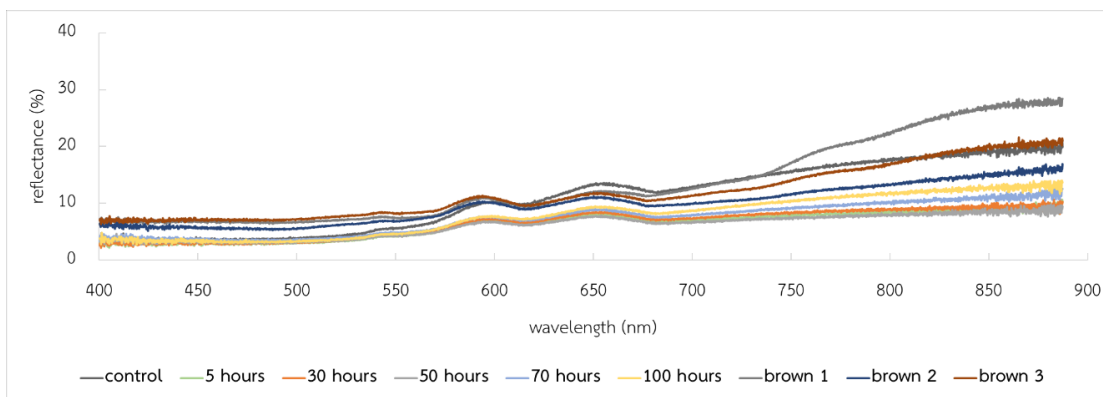


ภาพที่ 4-52 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีดำในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีดำข้างข้างที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

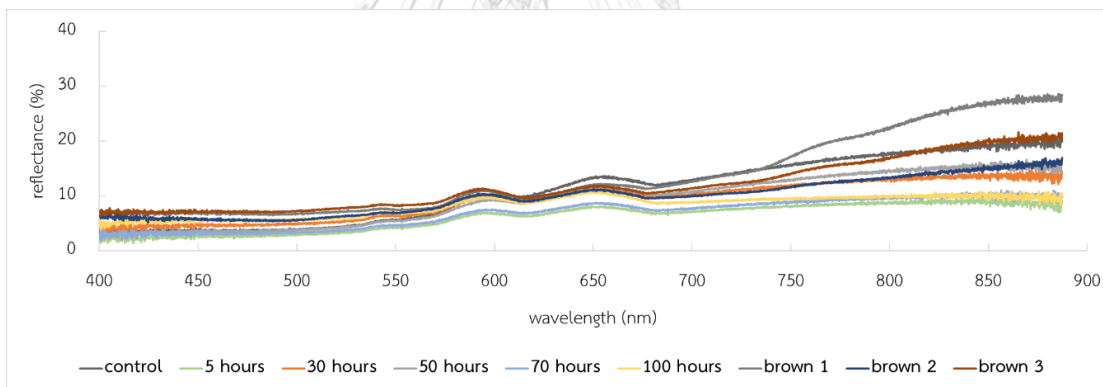
4.3.3 สีน้ำตาล

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำตาลอัมเบอร์ ดังภาพที่ 4-53 และ 4-54 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และสีน้ำตาลใหม่ ดังภาพที่ 4-55 และ 4-56 จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง พบว่าสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างมากกว่าสีน้ำตาลใหม่ในแผ่นตัวอย่างสีในทุกระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ จึงคาดจากการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์ว่ามีการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์มากกว่า 20 ปี ซึ่งอาจเกิดการเสื่อมสภาพที่เกิดจากรังสียูวี ทำให้เกิดการย่อยสลายด้วยแสง (photodegradation) ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงของโครโมฟอร์ (chromophore) และปรากฏให้เห็นเป็นการซีดจางของสี [44]

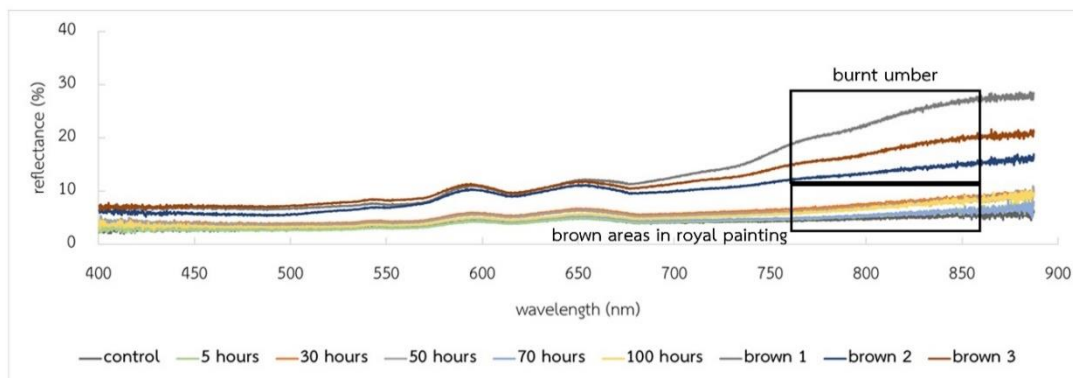
สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำตาลอัมเบอร์มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์ในช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร สอดคล้องกับผลที่ได้จากการถ่ายภาพเชิงเทคนิค



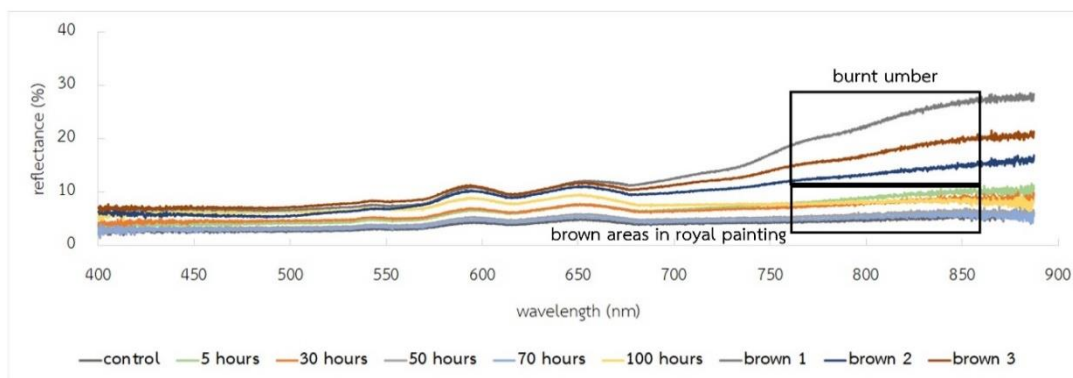
ภาพที่ 4-53 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำตาลอัมเบอร์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-54 ภาพที่ 4.52 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำตาลอัมเบอร์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



ภาพที่ 4-55 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำตาลใหม่ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

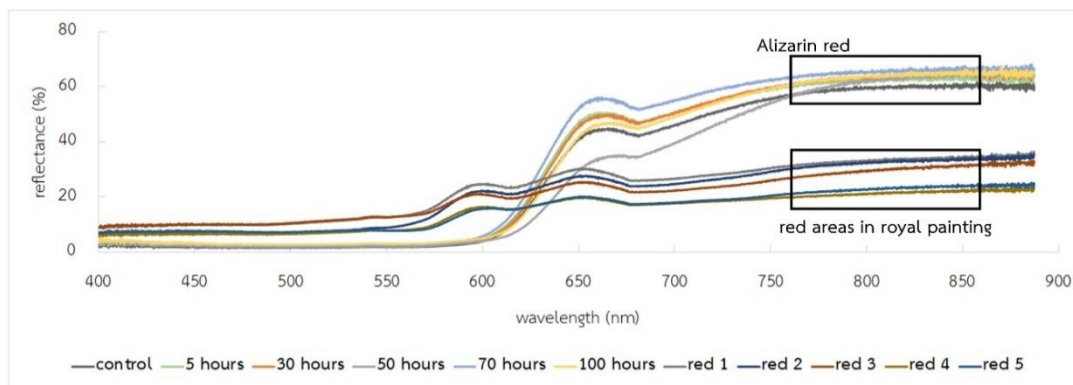


ภาพที่ 4-56 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำตาลในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำตาลใหม่ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

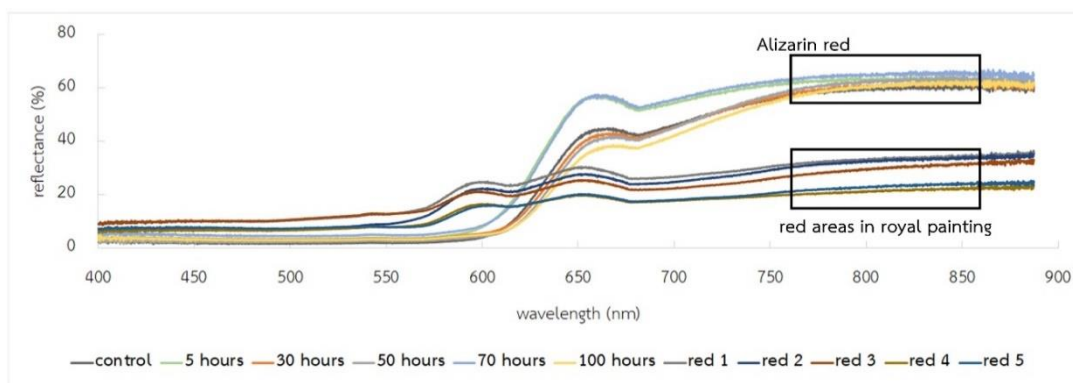
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.4 สีแดง

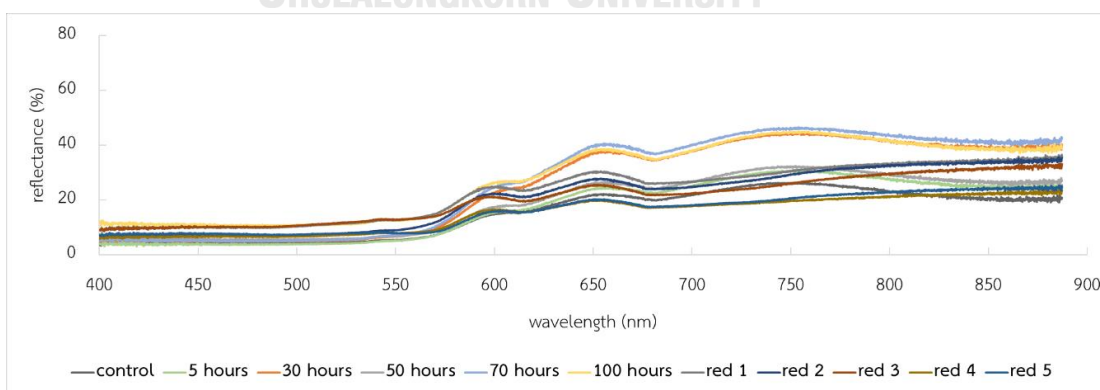
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงอะลิซาริน ดังภาพที่ 4-57 และ 4-58 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และสีแดงจากดินแดง 4-59 และ 4-60 จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง พบว่าสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างน้อยกว่าสีแดงทั้งสองชนิด จึงคาดว่ามีการเสื่อมสภาพมากกว่าการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์เป็นเวลา 20 ปี อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของสเปกตรัมการทอนแสงที่ 400–700 นาโนเมตร พบว่าสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์ใกล้เคียงกับสีดินแดงที่มีสีแดงออกส้มมากกว่าสีแดงอะลิซาริน ทำให้สามารถอนุมานได้ว่าหนึ่งในสีแดงที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์คือสีดินแดง



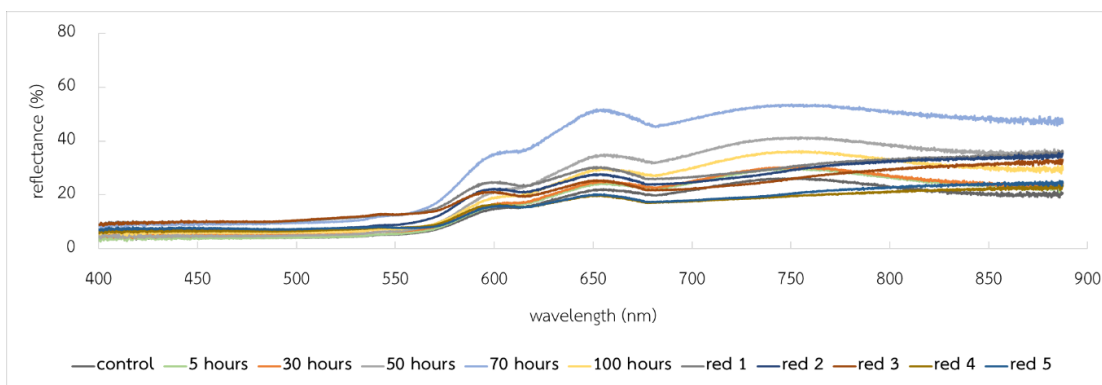
ภาพที่ 4-57 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงอะลิซารินที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-58 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงอะลิซารินที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



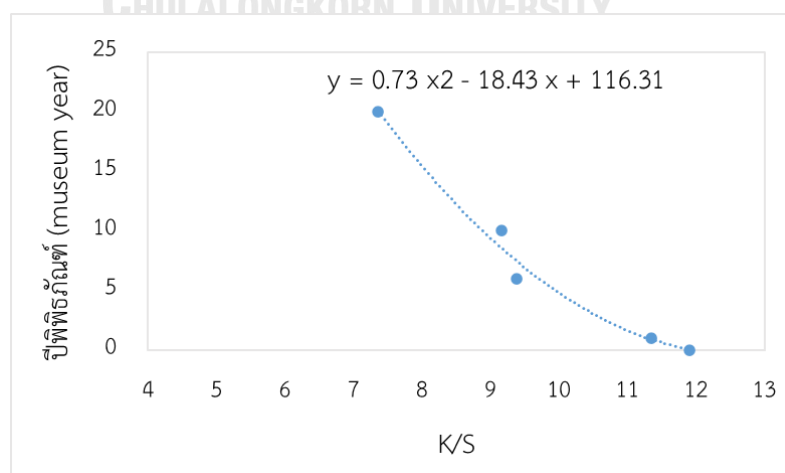
ภาพที่ 4-59 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงจากดินแดงที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-60 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีแดงจากดินแดงที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

เมื่อใช้สมการคูเบลคา-มังก์ (สมการที่ 3.2) คำนวณค่าการดูดกลืนแสงที่ 470.02 นาโนเมตร (ให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงินอมเขียวสูงสุด) ของสีแดงดินแดงที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 0 (ตัวอย่างควบคุม), 5, 30, 50 และ 100 ชั่วโมง ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเทียบกับการกระเจิงแสง (K/S) เป็น 11.91, 11.35, 9.38, 9.16, 7.36 ตามลำดับ เมื่อเทียบระยะเวลาเสื่อมสภาพกับปีพิพิธภัณฑ์ ดังตารางที่ 4-11 จึงหาความสัมพันธ์ระหว่าง K/S และ ปีพิพิธภัณฑ์ ได้ดังภาพที่ 4-61 และเมื่อประมาณปีพิพิธภัณฑ์เฉลี่ยจากสีแดงในภาพพระบรมสาทิสลักษณ์ 5 ตำแหน่ง โดยคำนวณค่า K/S ของสีแดงทุกตำแหน่งที่ 470.02 นาโนเมตร พบว่ามีค่าอยู่ที่ 39.0 ± 13.7 ปี

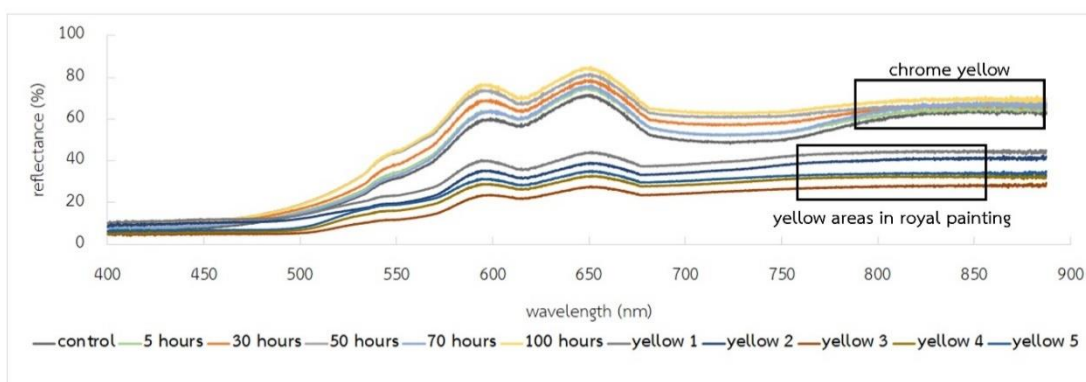
การประมาณค่าปีพิพิธภัณฑ์ในวิธีนี้เป็นเพียงการประมาณและแนวทางเท่านั้น จะต้องมีการทวนสอบกับภาพที่ทราบปีในการวาดเพื่อหาแบบจำลองที่แม่นยำต่อไป



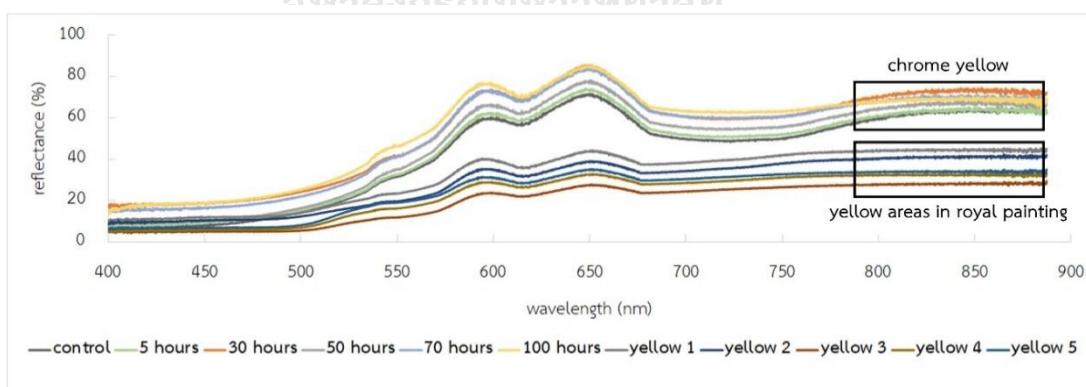
ภาพที่ 4-61 ความสัมพันธ์ระหว่าง K/S และ ปีพิพิธภัณฑ์ ของสารสีแดงดินแดง

4.3.5 สีเหลือง

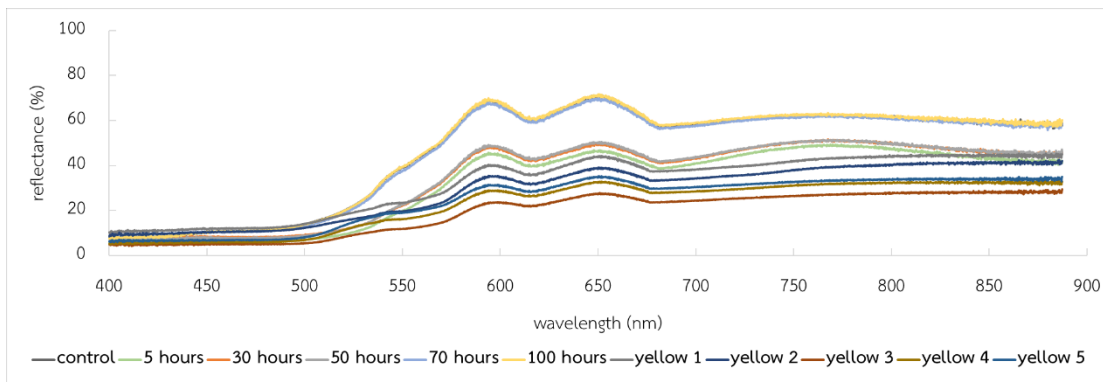
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองโครเมียม ดังภาพที่ 4-62 และ 4-63 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และสีเหลืองจากดินเหลือง ดังภาพที่ 4-64 และ 4-65 จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง พบว่าสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างน้อยกว่าสีเหลืองทั้งสองชนิด จึงคาดว่าการเสื่อมสภาพมากกว่าการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์เป็นเวลา 20 ปี และเมื่อสังเกตลักษณะของสเปกตรัมที่ 400–700 นาโนเมตร พบว่าสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์เป็นสีเหลืองที่มีโทนแดง ซึ่งใกล้เคียงกับสเปกตรัมของสารสีจากดินเหลืองมากกว่าสีเหลืองโครเมียม



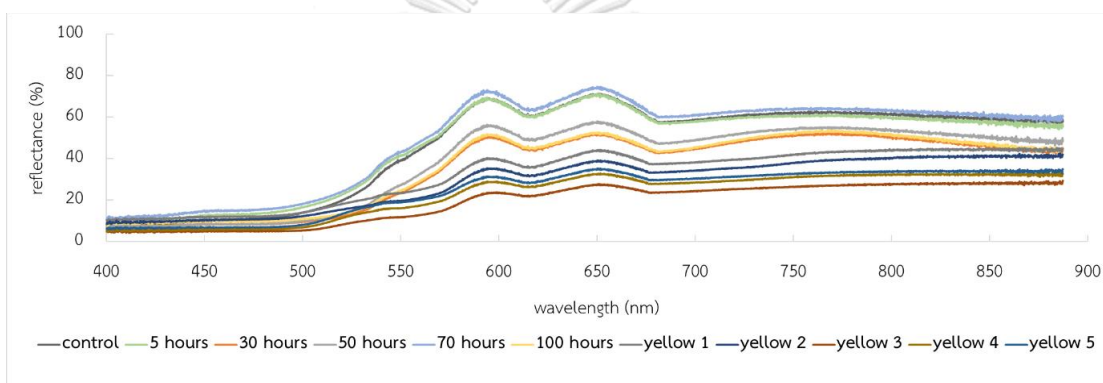
ภาพที่ 4-62 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองโครเมียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-63 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองโครเมียมที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



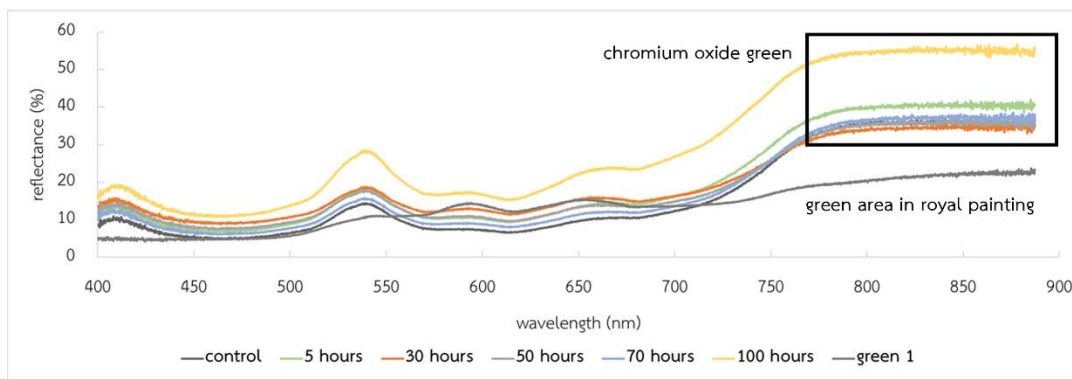
ภาพที่ 4-64 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองจากดินเหลืองที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



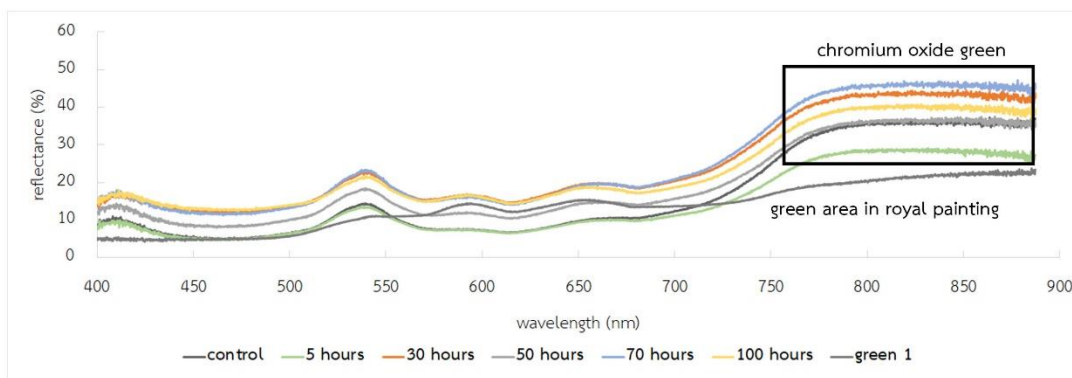
ภาพที่ 4-65 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเหลืองในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเหลืองจากดินเหลืองที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

4.3.6 สีเขียว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเขียวโครเมียมออกไซด์จากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-66 และ 4-67 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ พบว่าสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างน้อยกว่าสีเขียวในแผ่นสีตัวอย่าง โดยมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงไม่ถึง 20% จึงคาดว่าการเสื่อมสภาพมากกว่าการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์เป็นเวลา 20 ปี และเมื่อสังเกตสเปกตรัมของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์พบว่าไม่มีสเปกตรัมแตกต่างจากสีเขียวโครเมียมออกไซด์ จึงเป็นไปได้ว่าสีเขียวที่ใช้ในพระบรมสาทิสลักษณ์เป็นสีเขียวชนิดอื่นที่ไม่ใช่สีเขียวโครเมียมออกไซด์



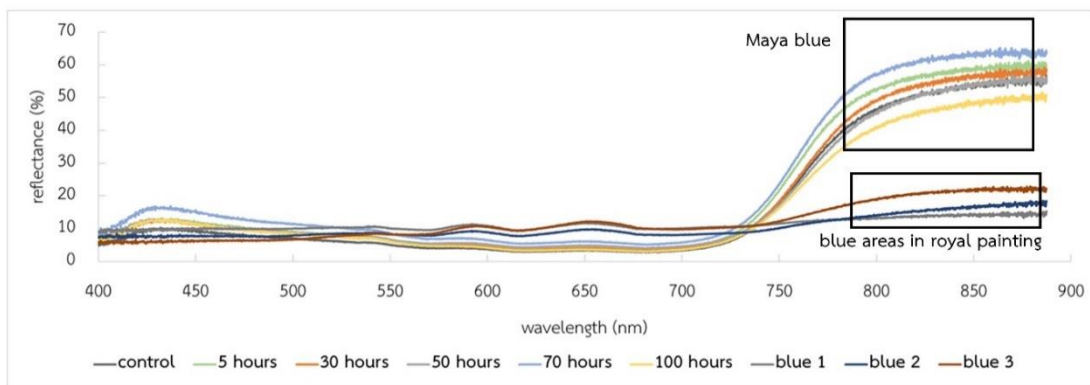
ภาพที่ 4-66 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเขียวโครเมียม ออกไซด์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



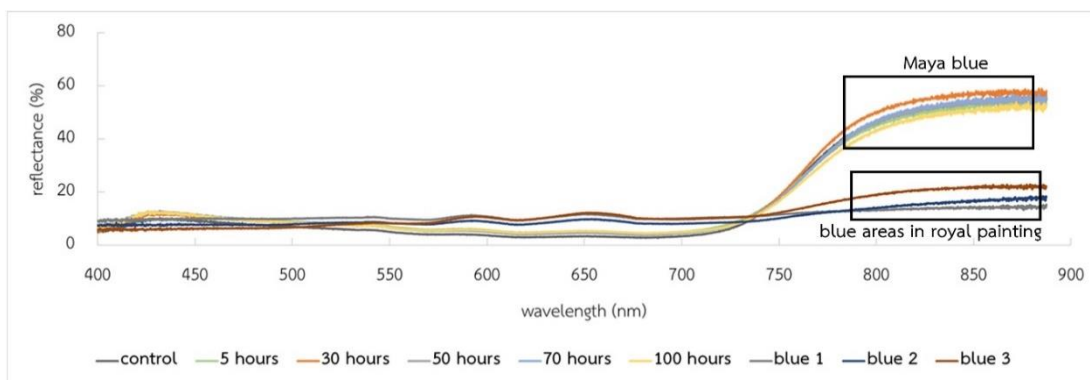
ภาพที่ 4-67 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเขียวในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีเขียวโครเมียม ออกไซด์ที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

4.3.7 สีน้ำเงิน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมของสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำเงิน มาจากการจำลองการเสื่อมสภาพในแผ่นสีตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-68 และ 4-69 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และ 75% ตามลำดับ และพบว่าสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์มีความสว่างใกล้เคียงสีน้ำเงิน ในแผ่นสีตัวอย่าง โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ 400–700 นาโนเมตรสูงสุดไม่เกิน 30 ซึ่ง ใกล้เคียงกับความสว่างของสีดำและไม่มีการสะท้อนแสงอย่างชัดเจนที่ในบริเวณสีฟ้า ทำให้คาดการณ์ ว่ามีการเสื่อมสภาพมากกว่าการเก็บไว้ในพิพิธภัณฑ์เป็นเวลา 20 ปี โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และผลจากอิทธิพลของวาร์นิช



ภาพที่ 4-68 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำเงินมายาที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ 4-69 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำเงินในพระบรมสาทิสลักษณ์และสีน้ำเงินมายาที่ระยะเวลาการเสื่อมสภาพ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของการจำลองการเสื่อมสภาพที่มีสาเหตุจากแสงและความชื้นต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารสีที่คาดว่าจะมีการใช้งานในพระบรมสาทิสลักษณ์รัชกาลที่ 5 และพระบรมราชินีนาถ ที่หอประวัติจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้แก่ สารสีสีขาวยุโรปาเนียม สารสีสีขาวยังกะสี สารสีสีดำคาร์บอน สารสีสีด่างข้าง สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีน้ำตาลไหม้ สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง สารสีสีเขียวโครเมียม ออกไซด์และสารสีสีน้ำเงินมายา โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรด

สารสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมอินฟราเรด ได้แก่ สารสีสีด่างข้าง สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ สารสีสีแดงอะลิซาริน สารสีจากดินแดง สารสีสีเหลืองโครเมียม สารสีจากดินเหลือง และสารสีสีน้ำเงินมายา

จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดที่ได้จากแผ่นสีตัวอย่างที่ผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุม เมื่อพิจารณาการเลื่อนของพีคพบว่า สารสีสีด่างข้างเกิดการเลื่อนของพีคบริเวณ 1409 cm^{-1} (C-C) เมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพด้วยแสงตั้งแต่เวลา 30 ชั่วโมง และคงที่ไปจนถึงระยะเวลา 100 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงพีค พบว่าสารสีสีด่างข้าง ($I_{971,1409,1597}/I_{1010}$) ที่ความชื้น 55% สารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ ($I_{792,888,1409,1007,1595}/I_{1007}$) ที่ความชื้น 55% (I_{667}/I_{1007}) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% สารสีสีเหลืองโครเมียม ($I_{976,1145}/I_{1015}$) ที่ความชื้น 55% สารสีสีแดงอะลิซาริน ($I_{608,649,668}/I_{1016}$) สารสีจากดินแดง (I_{668}/I_{1000}) และสารสีสีน้ำเงินมายา (I_{1411}/I_{1617}) ที่ความชื้นทั้งสองระดับ มีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพด้วยแสงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และคงที่ไปจนถึงระยะเวลา 100 ชั่วโมง ส่วนสารสีสีด่างข้าง (I_{1409}/I_{1010}) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีอัตราส่วนความสูงพีคลดลงเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพด้วยการฉายแสงเป็นเวลา 30 ชั่วโมง และคงที่ไปจนถึงระยะเวลาการฉายแสง 100 ชั่วโมง โดยคาดว่าเกิดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของสารยึดที่แห้งตัวเมื่อผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพด้วยแสง

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามาน

สารสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมรามาน ได้แก่ สารสีสีขาวยุโรปาเนียมและสารสีสีขาวยังกะสีจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานที่ได้จากแผ่นสีตัวอย่างที่ผ่านการเร่ง

การเสื่อมสภาพเทียบกับแผ่นสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุม พบว่าสารสีสีขาวยุททาเนียมเกิดการเลื่อนของพีคบริเวณ 235 cm^{-1} (โครงสร้างผลึก) ที่ระยะเวลาการเร่งการเสื่อมสภาพ 30 ชั่วโมง และกลับมายังตำแหน่งเดิมที่เวลา 100 ชั่วโมง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 55% สารสีสีขาวสังกะสีเกิดการเลื่อนของพีคบริเวณ 438 cm^{-1} (โหมด E_2 ในโครงสร้างแบบ Wurtzite hexagonal) ที่ระยะเวลา 70 จนถึง 100 ชั่วโมง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 55% และตั้งแต่ระยะเวลา 5 ชั่วโมงไปจนถึง 100 ชั่วโมง ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

5.1.3 ความแตกต่างสี

เมื่อพิจารณาปัจจัยของความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าตัวอย่างสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีแนวโน้มที่จะให้ความแตกต่างสีมากกว่าตัวอย่างสีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% ยกเว้นตัวอย่างสีของสารสีสีขาวยุททาเนียมและสารสีสีขาวสังกะสีที่มีความแตกต่างสีระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองระดับใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาปัจจัยของระยะเวลาในการเร่งการเสื่อมสภาพพบว่า ระยะเวลาในการเร่งการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความแตกต่างสี อย่างไรก็ตามในแง่ของการวิเคราะห์ความแตกต่างสีในงานอนุรักษ์ เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีในงานศิลปะในระยะยาว พบว่าความแตกต่างสีระหว่างก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณเดียวกันเท่ากับ 4 หน่วย ซึ่งความแตกต่างสีที่ระดับนี้เมื่อเทียบกับอายุงานศิลปะถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี

5.1.4 การทำนายการเสื่อมสภาพของพระบรมสาทิสลักษณ์

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีจากพระบรมสาทิสลักษณ์ โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีในแผ่นสีตัวอย่างแล้วพบว่า มีความแตกต่างที่ทุกระดับความชื้นและระดับระยะเวลาการฉายแสง ซึ่งคาดว่าความแตกต่างนี้น่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมี อันเนื่องมาจากปัจจัยภายในและภายนอกทำให้สีเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงอาจสรุปได้ว่าสีในพระบรมสาทิสลักษณ์มีการเสื่อมสภาพมากกว่าการเก็บรักษางานศิลปะไว้ในพิพิธภัณฑ์เป็นเวลา 20 ปี ของการเก็บรักษางานศิลปะไว้ในพิพิธภัณฑ์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงจากการจำลองการเสื่อมสภาพนี้ยังไม่มากพอที่จะใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงในพระบรมสาทิสลักษณ์ได้อย่างแม่นยำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเร่งระยะเวลาการเสื่อมสภาพที่ 5, 30, 50, 70 และ 100 ชั่วโมง แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารสีได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงควรเพิ่มระยะเวลาในการเร่งการเสื่อมสภาพ

5.2.2 ความบริสุทธิ์ของสารสีมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ทางเคมี ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้ควรเป็นสารสีที่ไม่มีการปนเปื้อนของสิ่งอื่นที่อาจทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณของสารสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิคทางเคมี

5.2.3 สภาพแวดล้อมส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับสารสี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อย่าง เฝียบพลันระหว่างสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันมากจะเร่งการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าควบคุมสภาพแวดล้อมไว้ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งซึ่งเป็นปัจจัยที่น่าศึกษา



บรรณานุกรม

1. Brown, S., et al., *Guidelines for environmental control in cultural institutions*. 2002.
2. Pagliarino, A. *Environmental Guidelines*. 2019 [cited 2019 10 December]; Available from: <https://aiccm.org.au>.
3. Cosentino, A., *Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method*. *Heritage Science*, 2014. 2(1): p. 8.
4. Cosentino, A. *Technical Photography (TP)*. 2019 [cited 2020 6 June]; Available from: <https://chsopensource.org/>.
5. อรุษา สรวารี, สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์). 2001: ศูนย์หนังสือจุฬาฯ.
6. Burmester, A., *Artists' pigments. A handbook of their history and characteristics, Volume 3*. 2000, JSTOR.
7. Douma, M., curator,, *Pigments through the Ages*. 2008.
8. Eastaugh, N., et al., *Pigment compendium: a dictionary of historical pigments*. 2007: Routledge.
9. Feller, R.L., *Artist's pigments: a handbook of their history and characteristics. Vol. 1. Vol. 1*. 1986.
10. Theophanides, T., *Introduction to infrared spectroscopy*. *Infrared Spectroscopy- Materials Science, Engineering and Technology*, 2012.
11. Smith, E. and G. Dent, *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. 2005.
12. *X-ray Fluorescence*. Available from: <https://projects.exeter.ac.uk>.
13. Beckhoff, B., et al., *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. 2007: Springer Science & Business Media.
14. Cosentino, A., et al., *Technical photography for mural paintings: the newly discovered frescoes in Aci Sant'Antonio (Sicily, Italy)*. *Conservar Património*, 2014(20): p. 23-33.
15. Feller, R.L., *Accelerated aging: photochemical and thermal aspects*. 1995: Getty Publications.

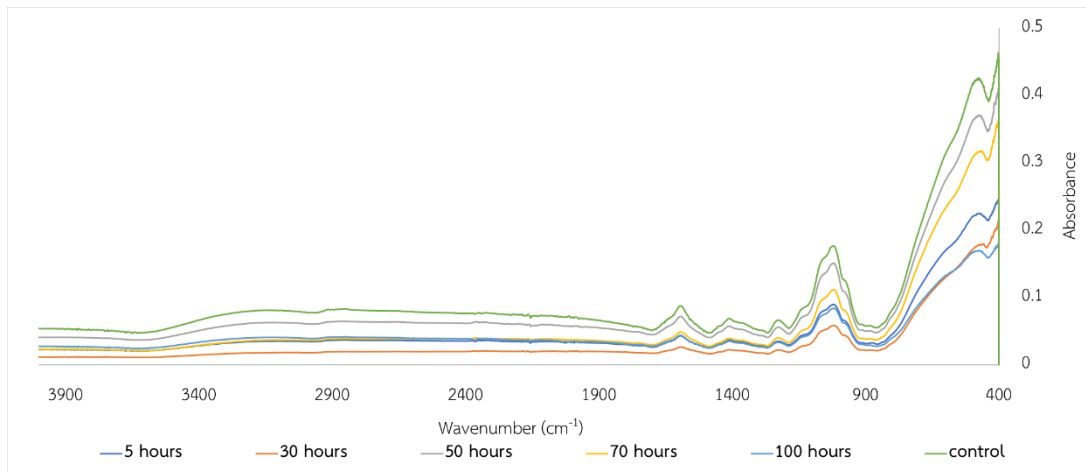
16. Saunders, D., *Museum Lighting: A Guide for Conservators and Curators*. 2020: Getty Publications.
17. Whitmore, P.M. and V.G. Colaluca, *The natural and accelerated aging of an acrylic artists' medium*. *Studies in Conservation*, 1995. 40(1): p. 51-64.
18. Caggiani, M., A. Cosentino, and A. Mangone, *Pigments Checker version 3.0, a handy set for conservation scientists: A free online Raman spectra database*. *Microchemical Journal*, 2016. 129: p. 123-132.
19. Larsen, R., N. Coluzzi, and A. Cosentino, *FREE XRF SPECTROSCOPY DATABASE OF PIGMENTS CHECKER*. *International Journal of Conservation Science*, 2016. 7(3).
20. Liang, H., D. Saunders, and J. Cupitt, *A new multispectral imaging system for examining paintings*. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2005. 49(6): p. 551-562.
21. ฝ่ายกรรมวิธีข้อมูล, สถิติภูมิอากาศของประเทศไทย ในคาบ 30 ปี (พ.ศ. 2504 - 2533). รายงาน ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเลขที่ 551.582-02-2537..
22. Caravá, S., et al., *Investigation of modern oil paints through a physico-chemical integrated approach. Emblematic cases from Valencia, Spain*. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020. 240: p. 118633.
23. Institutions, I.C., *Infrared & Raman Users Group*.
24. Musa, H.H., A.A. Ahmed, and T.H. Musa, *Chemistry, biological, and pharmacological properties of gum Arabic*. *Bioactive Molecules in Food*; Springer: Berlin, Germany, 2018: p. 1-18.
25. Balachandran, U. and N. Eror, *Raman spectra of titanium dioxide*. *Journal of Solid State Chemistry*, 1982. 42(3): p. 276-282.
26. Hara, Y. and M. Nicol, *Raman spectra and the structure of rutile at high pressures*. *physica status solidi (b)*, 1979. 94(1): p. 317-322.
27. Boda, M.A. and M.A. Shah, *Fabrication mechanism of compact TiO₂ nanotubes and their photo-electrochemical ability*. *Materials Research Express*, 2017. 4(7): p. 075908.
28. Khan, A., *Raman spectroscopic study of the ZnO nanostructures*. *J. Pak. Mater. Soc*, 2010. 4(1).
29. Zappiello, C.D., et al., *Solid phase extraction to on-line preconcentrate trace*

- cadmium using chemically modified nano-carbon black with 3-mercaptopropyltrimethoxysilane. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2016. 27(10): p. 1715-1726.*
30. Coccato, A., et al., *Raman spectroscopy for the investigation of carbon-based black pigments. Journal of Raman Spectroscopy, 2015. 46(10): p. 1003-1015.*
 31. Martinez, K., et al., *Ten years of art imaging research. Proceedings of the IEEE, 2002. 90(1): p. 28-41.*
 32. *IR Spectrum Table & Chart.*
 33. Bikiaris, D., et al., *Ochre-differentiation through micro-Raman and micro-FTIR spectroscopies: application on wall paintings at Meteora and Mount Athos, Greece. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2000. 56(1): p. 3-18.*
 34. Legan, L., K. Retko, and P. Ropret, *Vibrational spectroscopic study on degradation of alizarin carmine. Microchemical Journal, 2016. 127: p. 36-45.*
 35. Čiuladienė, A., et al., *Investigation of the chemical composition of red pigments and binding media. Chemija, 2018. 29(4).*
 36. Balakhnina, I., et al., *Variations in the IR spectra of yellow ochre due to mixing with binding medium and drying. Journal of Applied Spectroscopy, 2011. 78(2): p. 183-188.*
 37. Silva, C.E., et al., *Diffuse reflection FTIR spectral database of dyes and pigments. Analytical and bioanalytical chemistry, 2006. 386(7-8): p. 2183-2191.*
 38. Ivanova, T., et al. *Structural transformations and their relation to the optoelectronic properties of chromium oxide thin films. in Journal of Physics: Conference Series. 2008. IOP Publishing.*
 39. Coccato, A., et al., *Raman spectroscopy of green minerals and reaction products with an application in Cultural Heritage research. Journal of Raman Spectroscopy, 2016. 47(12): p. 1429-1443.*
 40. Leona, M., et al., *Identification of the Pre-Columbian Pigment Mayablue on Works of Art by Noninvasive UV-Vis and Raman Spectroscopic Techniques. Journal of the American Institute for Conservation, 2004. 43(1): p. 39-54.*

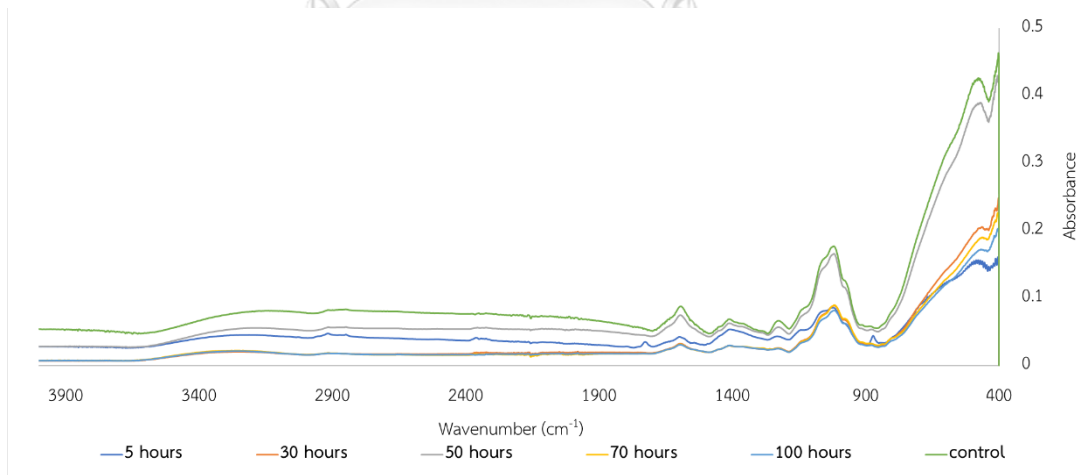
41. Godleman, J., M.J. Almond, and W. Matthews, *An infrared microspectroscopic study of plasters and pigments from the Neolithic site of Bestansur, Iraq*. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016. 7: p. 195-204.
42. (MCI), S.s.M.C.I. *WHAT MAKES THE PAINTING IMAGE CHANGE?* [cited 2020 30 August]; Available from: www.si.edu.
43. Cosentino, A., *FORS spectral database of historical pigments in different binders*. *E Conserv. J*, 2014: p. 54-65.
44. Congress, L.o. *Why does ultraviolet light cause color to fade?* 2010 [cited 2020 1 September]; Available from: www.loc.gov.



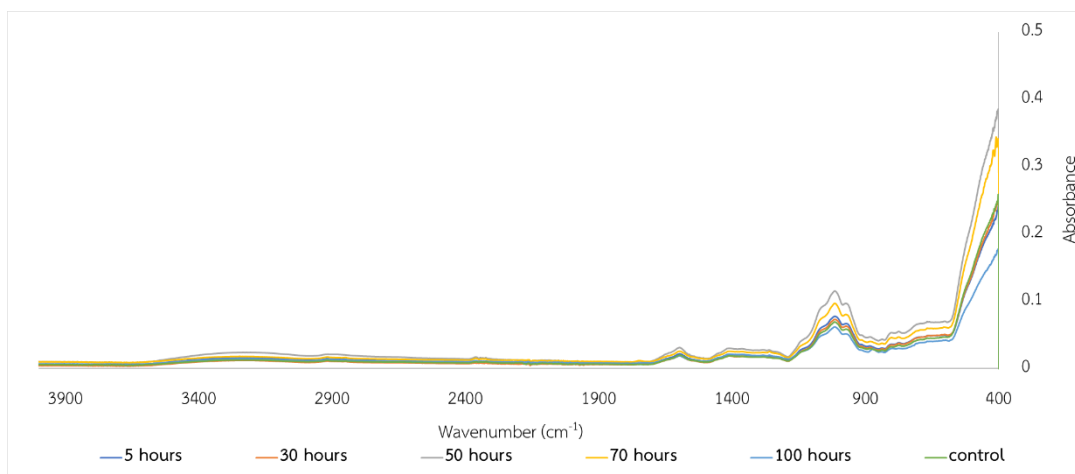
ภาคผนวก ก
การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสี



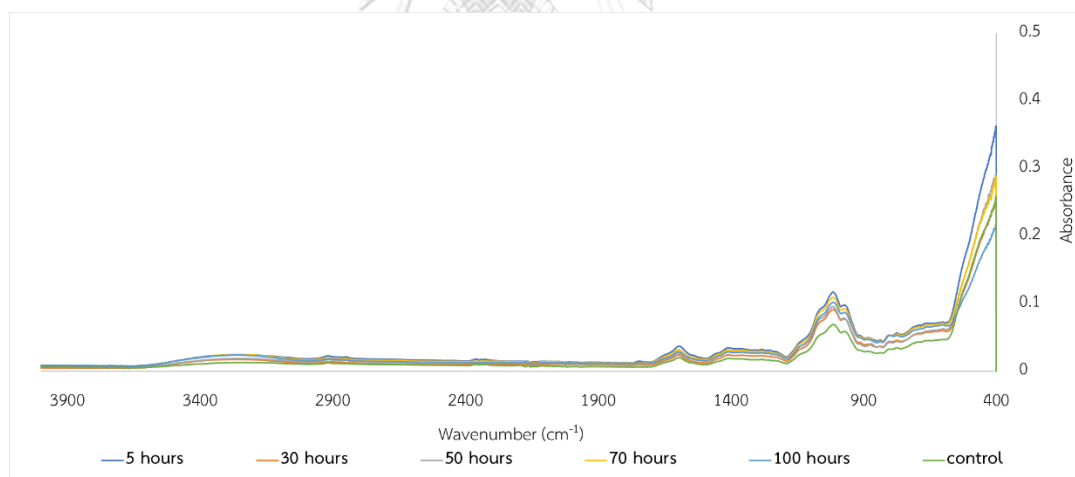
ภาพที่ ก-1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีขาวไททาเนียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



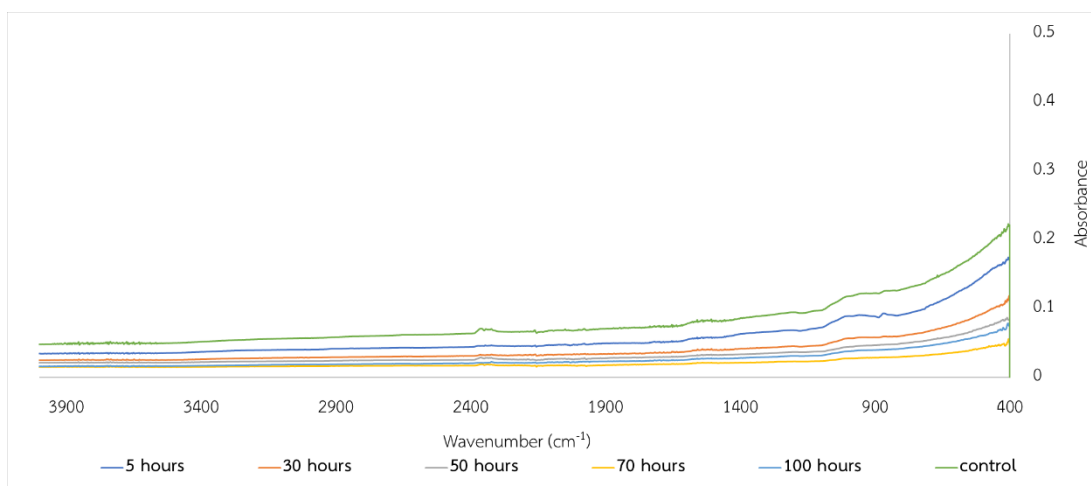
ภาพที่ ก-2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีขาวไททาเนียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



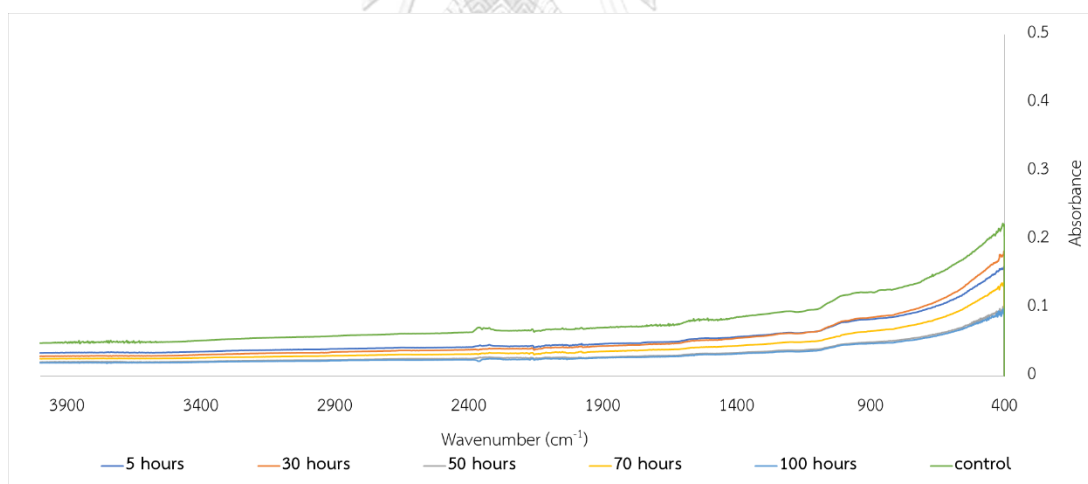
ภาพที่ ก-3 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีขาวสังกะสี เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



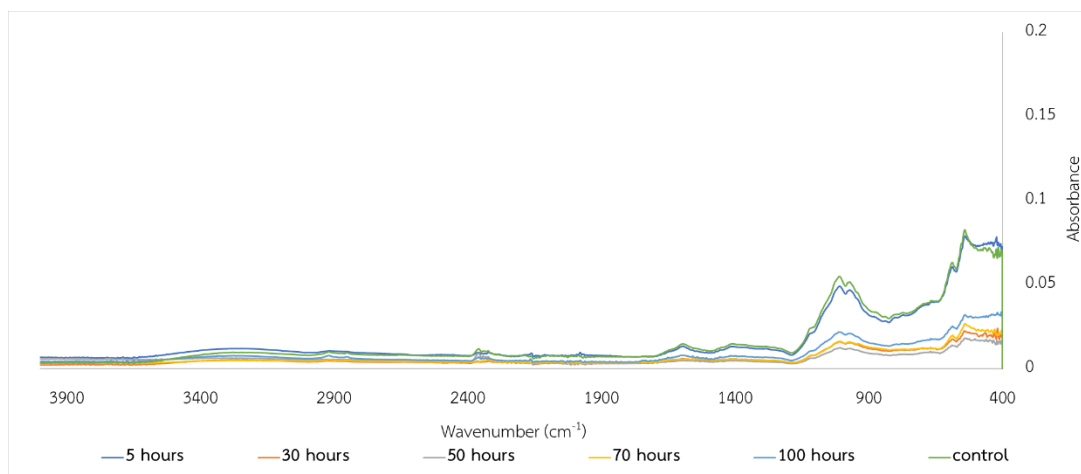
ภาพที่ ก-4 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีขาวสังกะสี เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



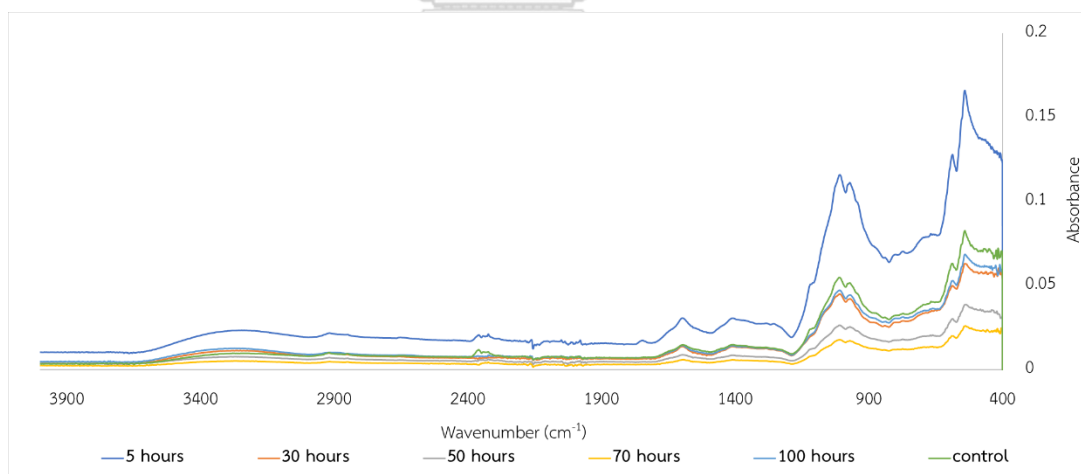
ภาพที่ ก-5 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีดำคาร์บอน เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



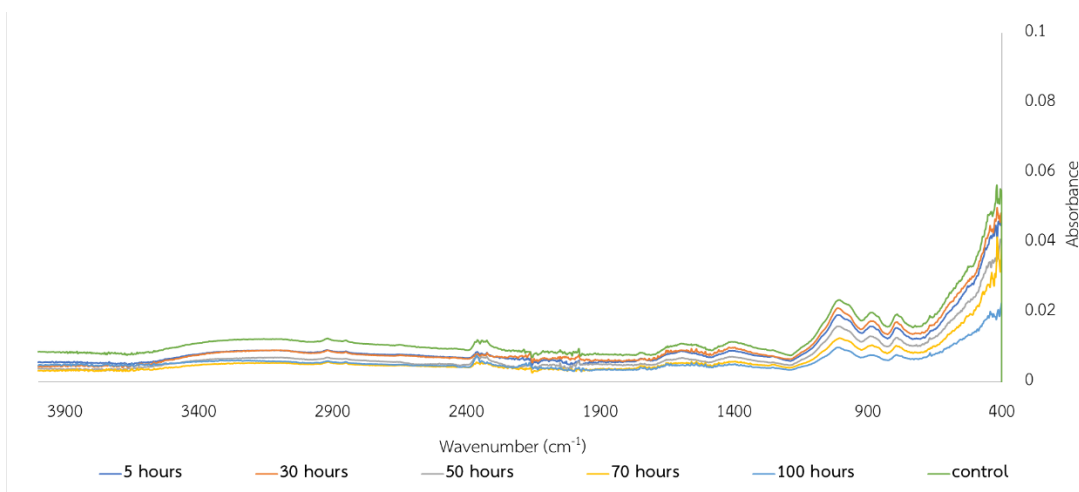
ภาพที่ ก-6 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีดำคาร์บอน เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



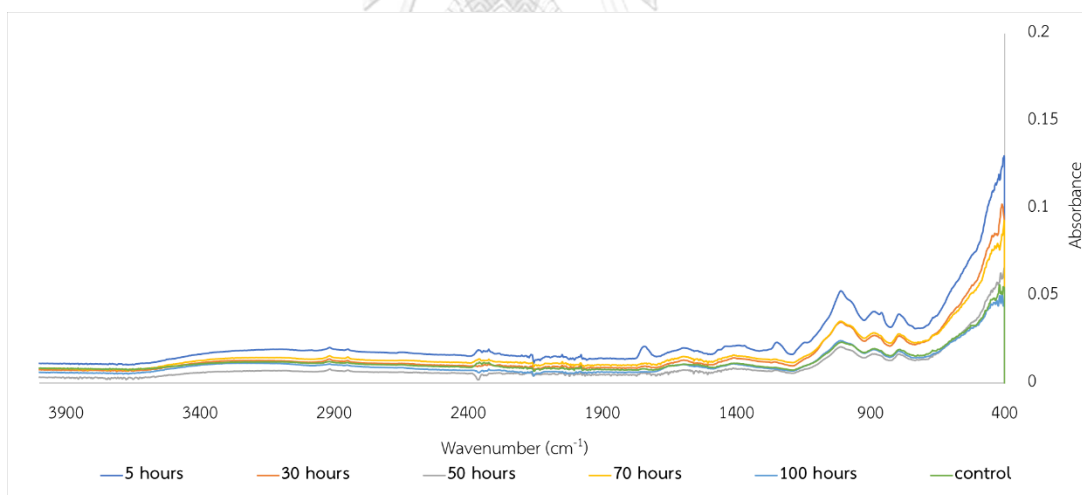
ภาพที่ ก-7 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีต่างข้าง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



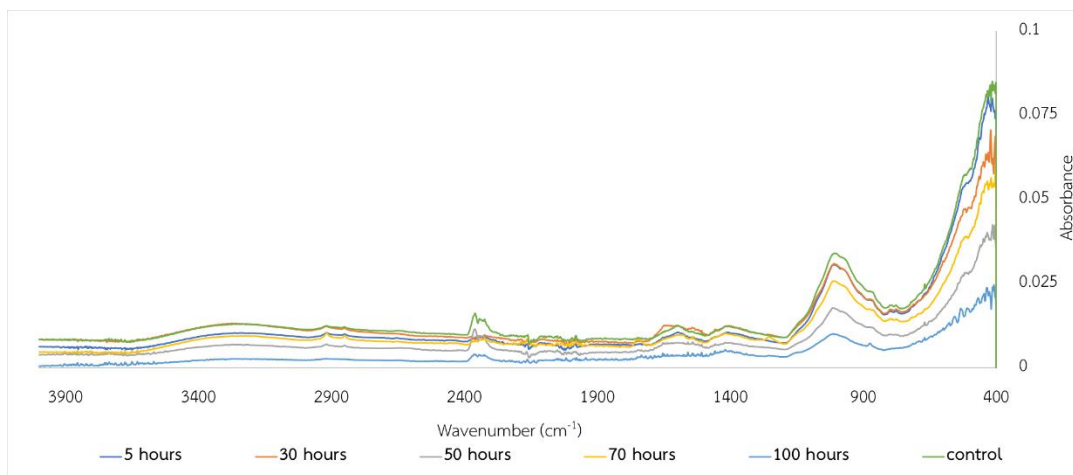
ภาพที่ ก-8 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีต่างข้าง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



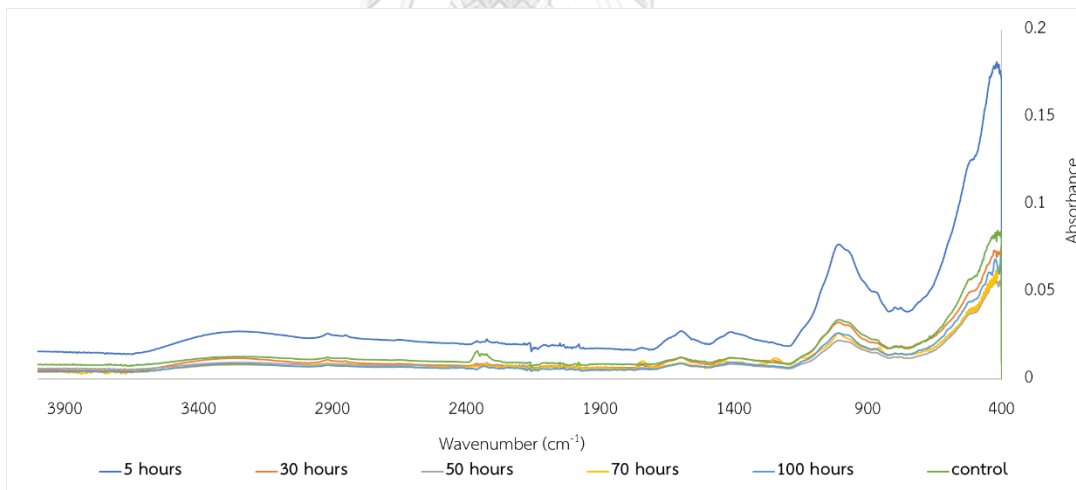
ภาพที่ ก-9 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีน้ำตาลอัมเบอร์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



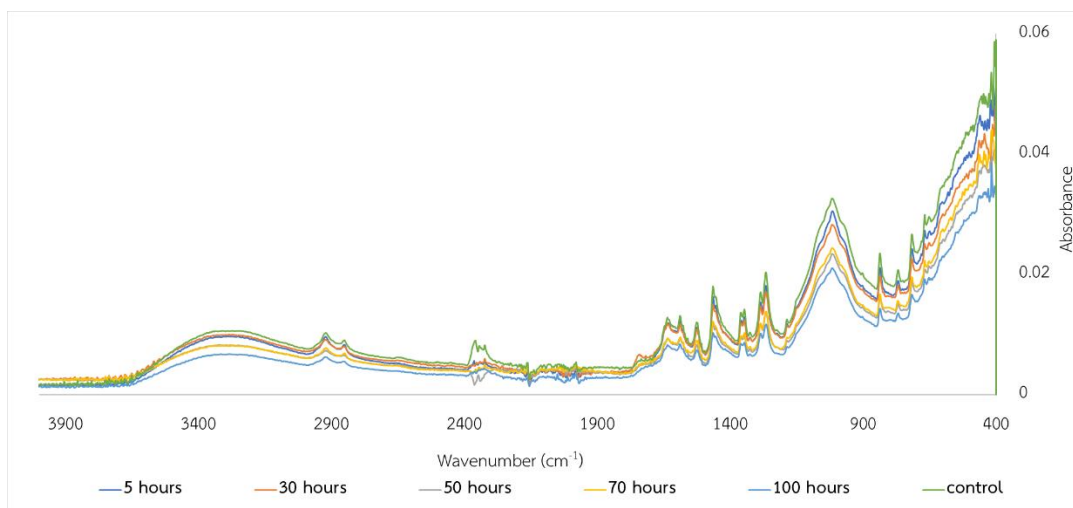
ภาพที่ ก-10 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีน้ำตาลอัมเบอร์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



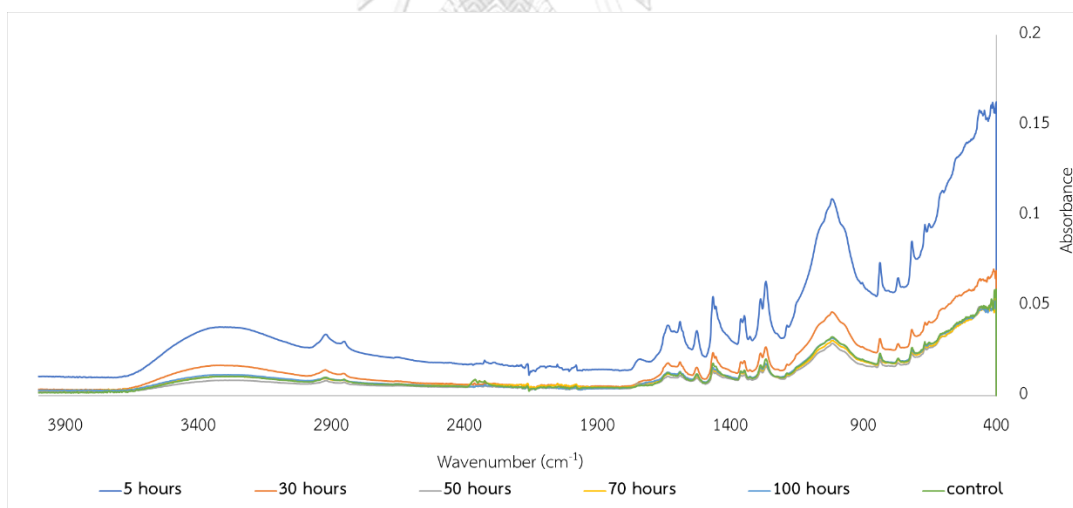
ภาพที่ ก-11 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีน้ำตาลไหม้ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ
ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



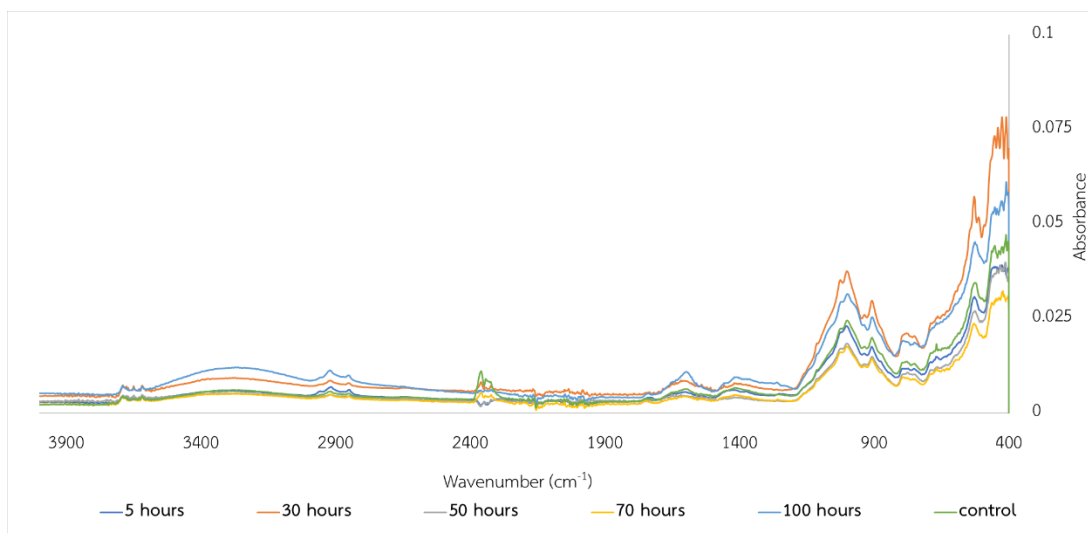
ภาพที่ ก-12 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีน้ำตาลไหม้ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ
ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



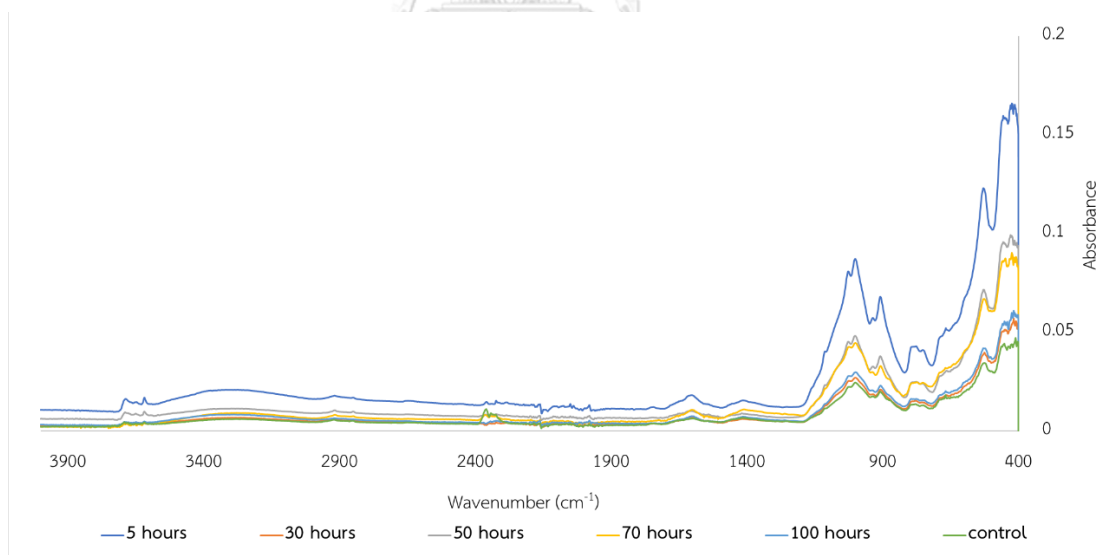
ภาพที่ ก-13 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีแดงอะลิซาริน เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



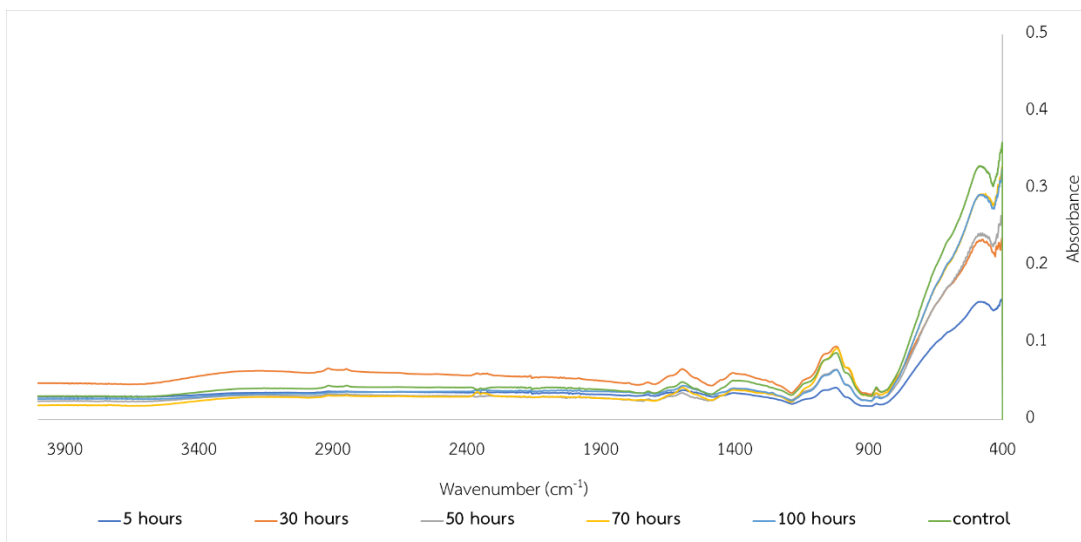
ภาพที่ ก-14 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีสีแดงอะลิซาริน เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



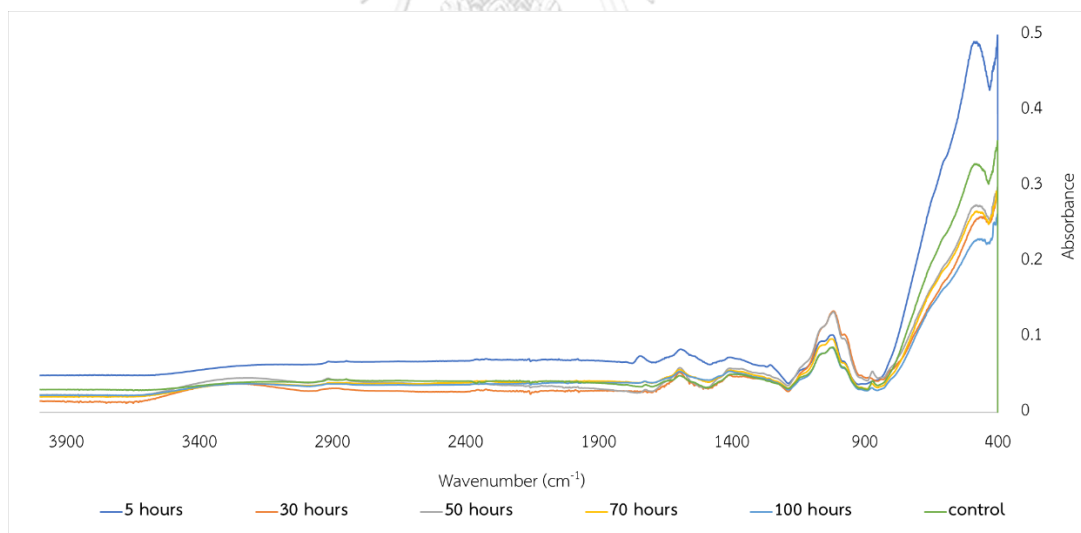
ภาพที่ ก-15 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีจากดินแดง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



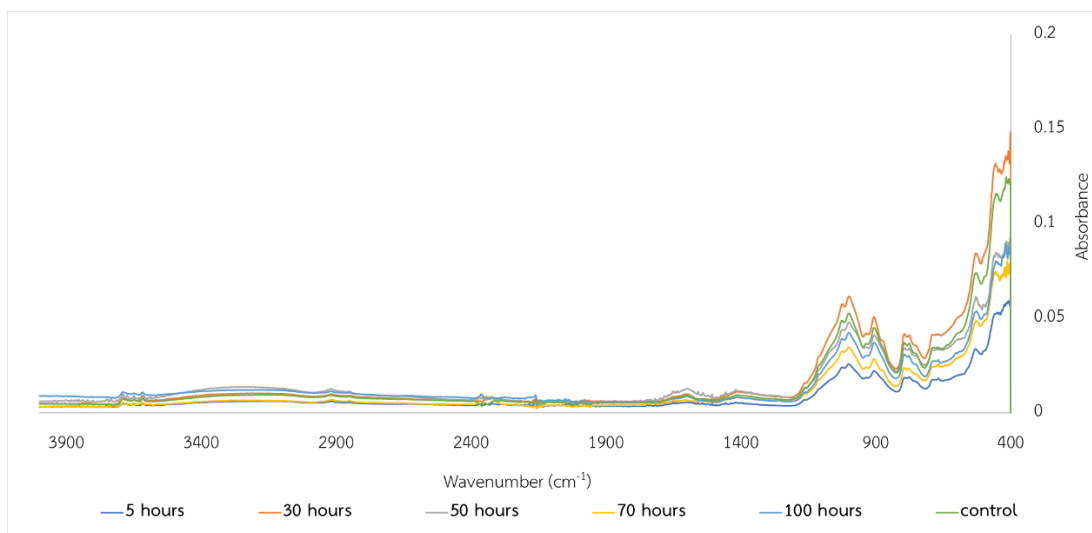
ภาพที่ ก-16 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีจากดินแดง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



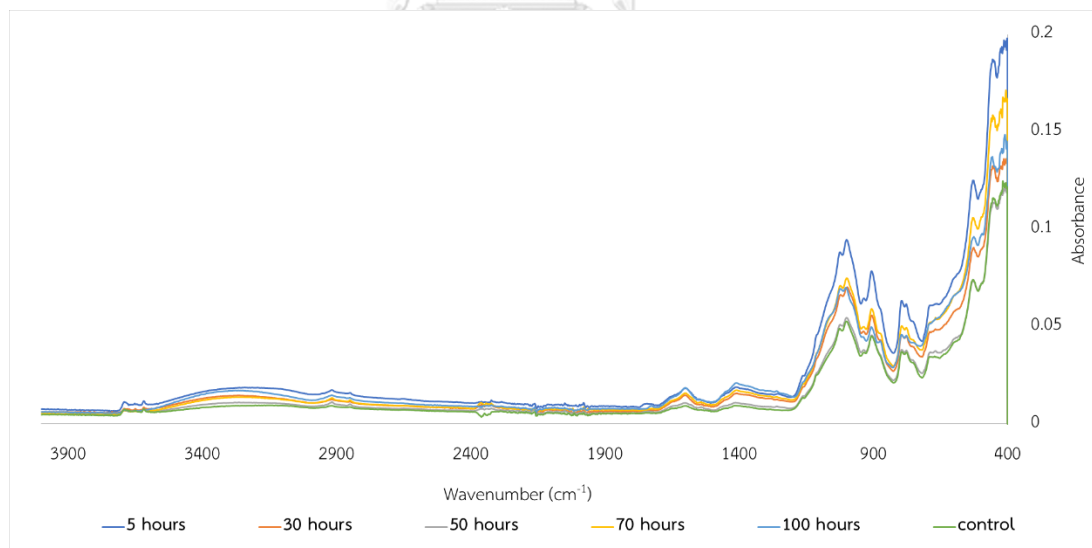
ภาพที่ ก-17 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีเหลืองโครเมียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



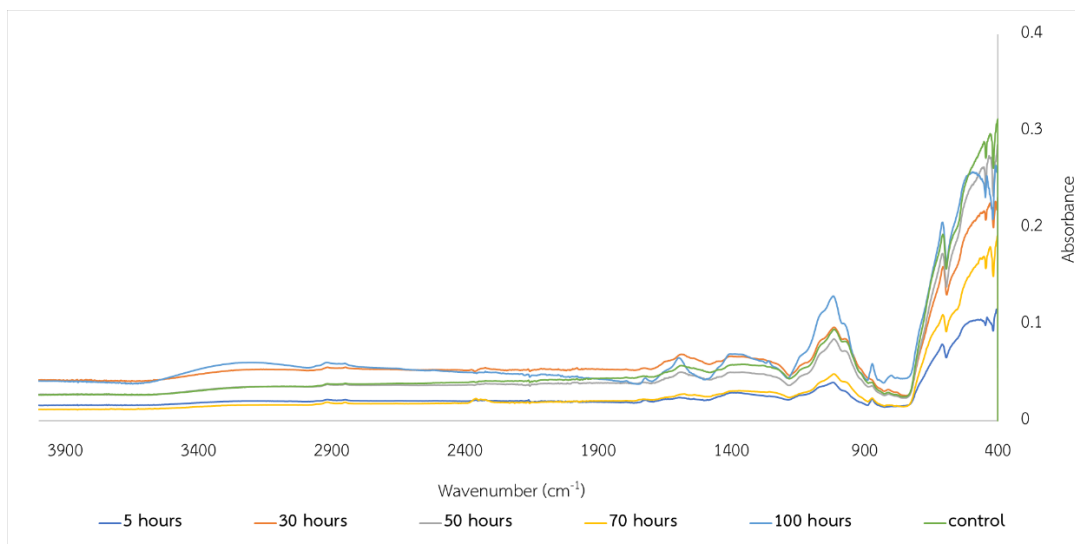
ภาพที่ ก-18 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีเหลืองโครเมียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



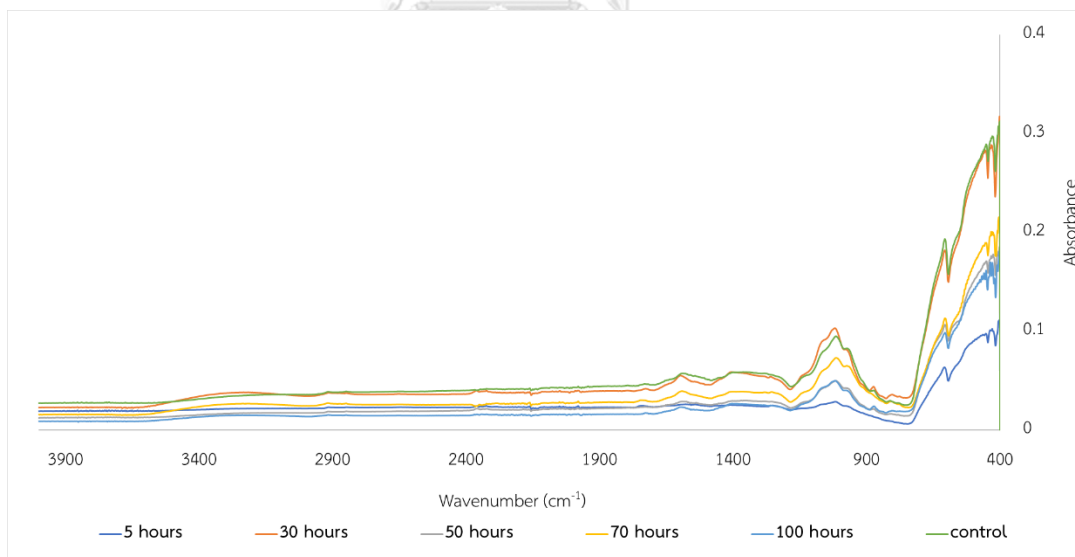
ภาพที่ ก-19 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีจากดินเหลือง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



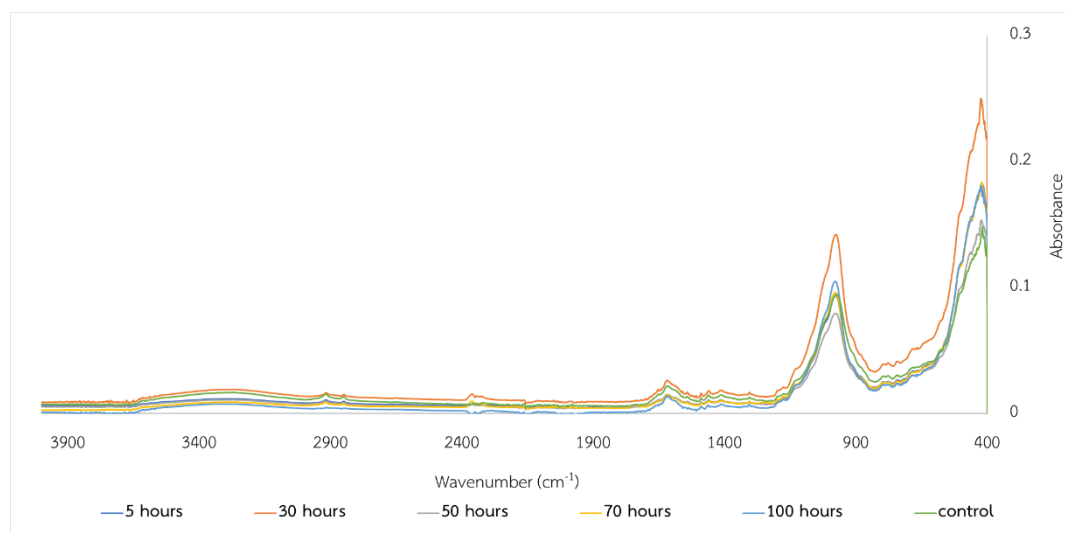
ภาพที่ ก-20 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีจากดินเหลือง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



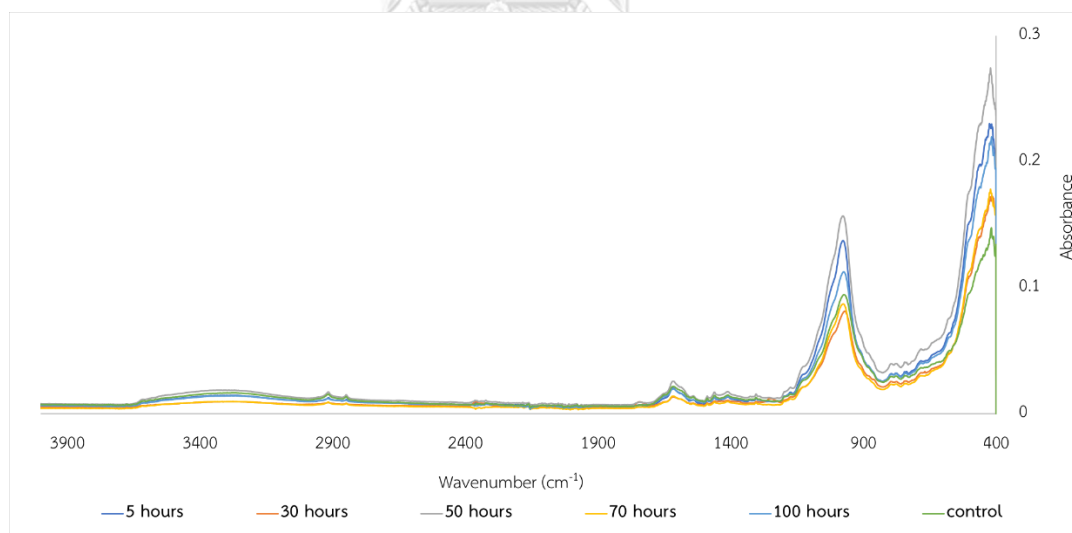
ภาพที่ ก-21 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารลีสึเขียวโครเมียมออกไซด์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ ก-22 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารลีสึเขียวโครเมียมออกไซด์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

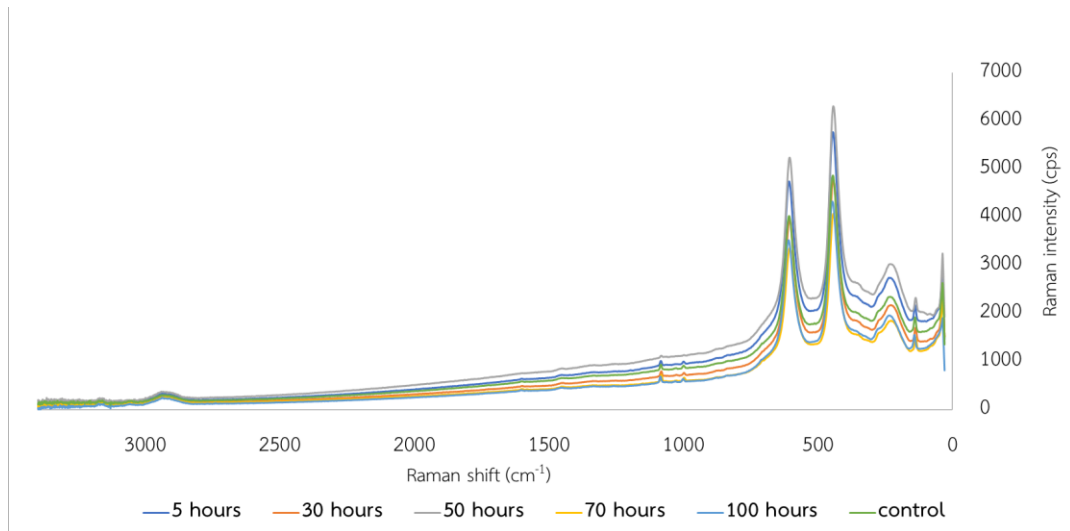


ภาพที่ ก-23 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีน้ำเงินมายา เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%

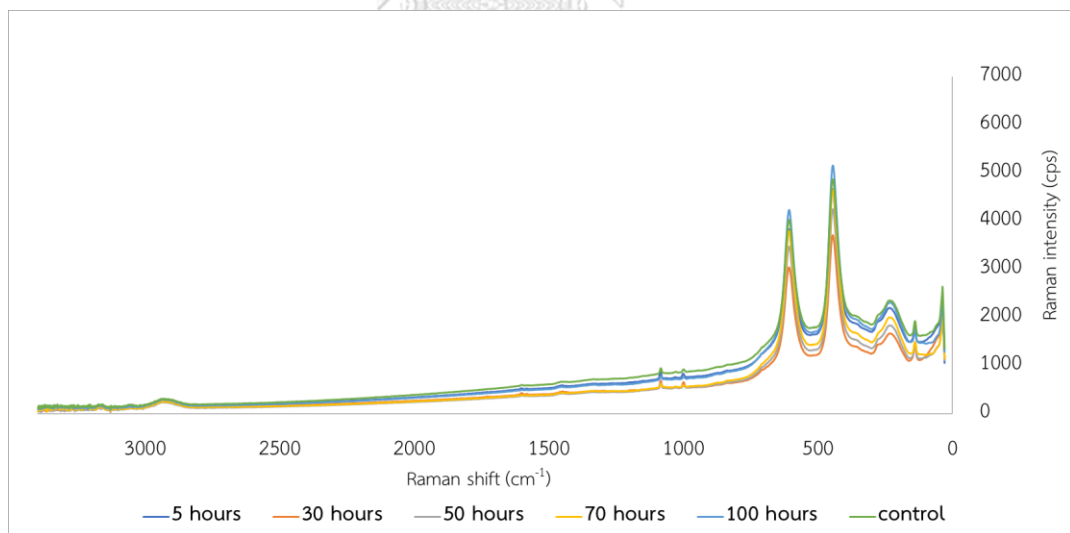


ภาพที่ ก-24 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมอินฟราเรดของสารสีน้ำเงินมายา เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพ ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%

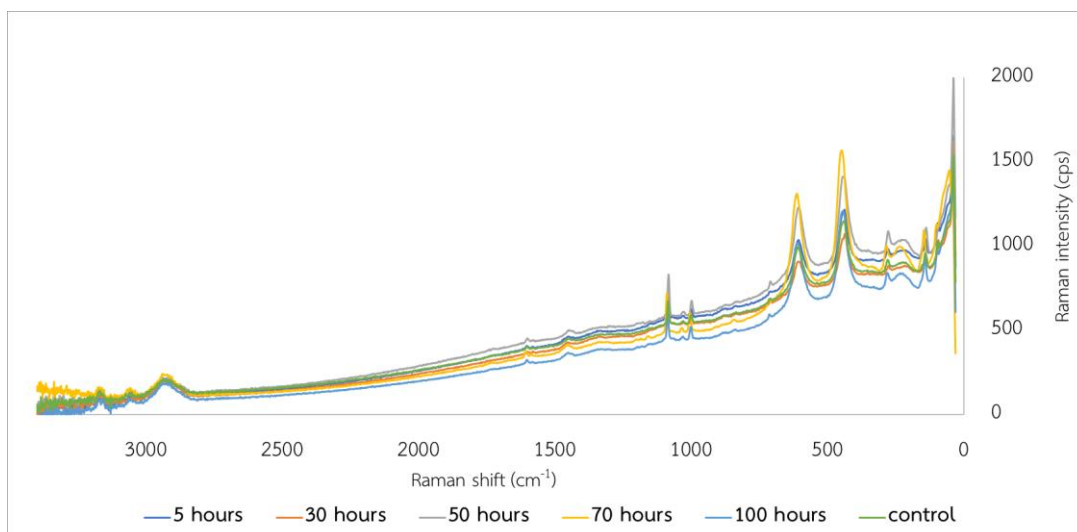
ภาคผนวก ข
การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสี



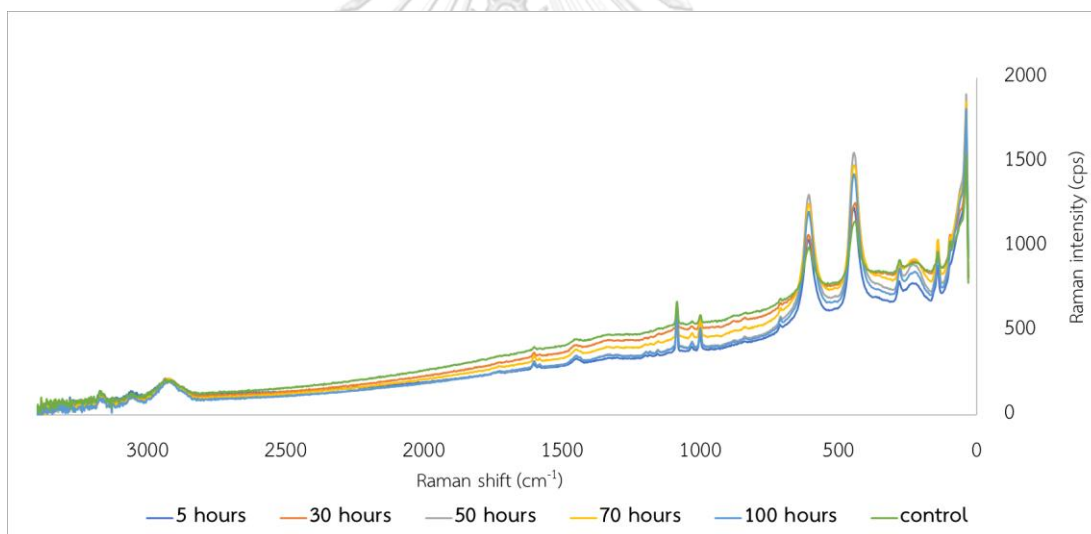
ภาพที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีสีขาวยุทธาเนียม เมื่อถูกเรงการเสียมสภาพใน เวลาตางกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



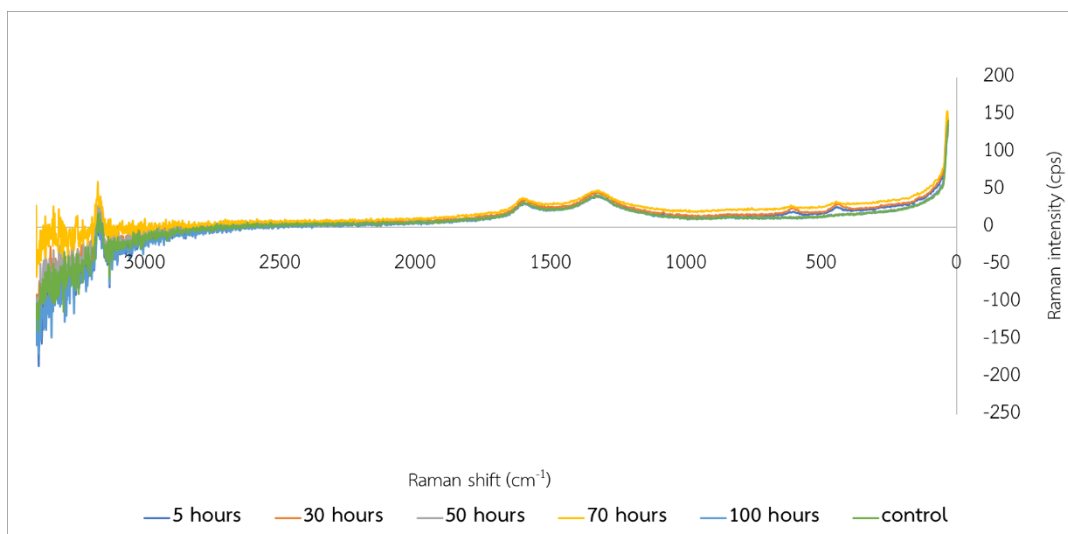
ภาพที่ ข-2 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีสีขาวยุทธาเนียม เมื่อถูกเรงการเสียมสภาพใน เวลาตางกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



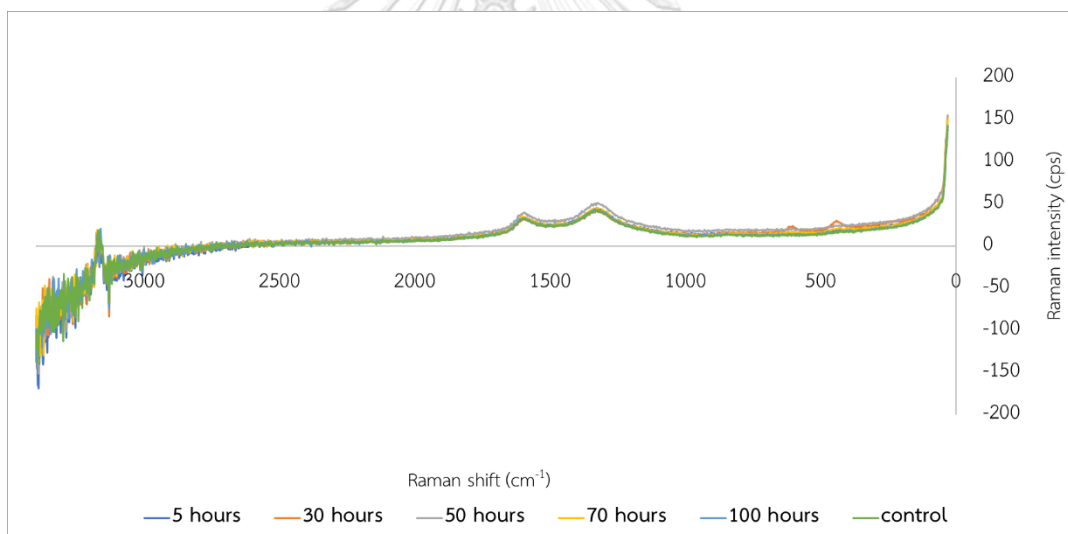
ภาพที่ ข-3 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสึสี่ขาวสังกะสี เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



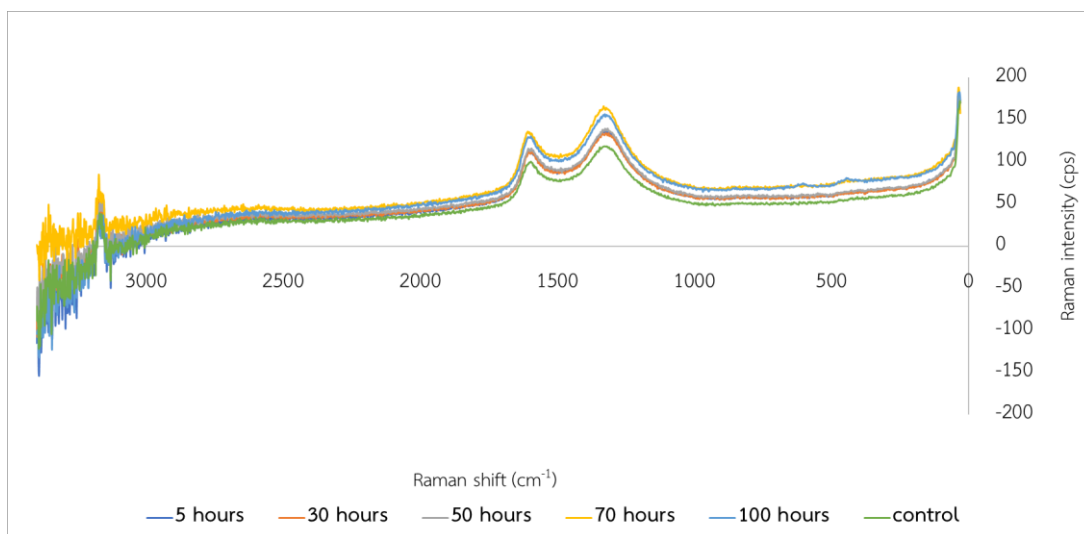
ภาพที่ ข-4 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสึสี่ขาวสังกะสี เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



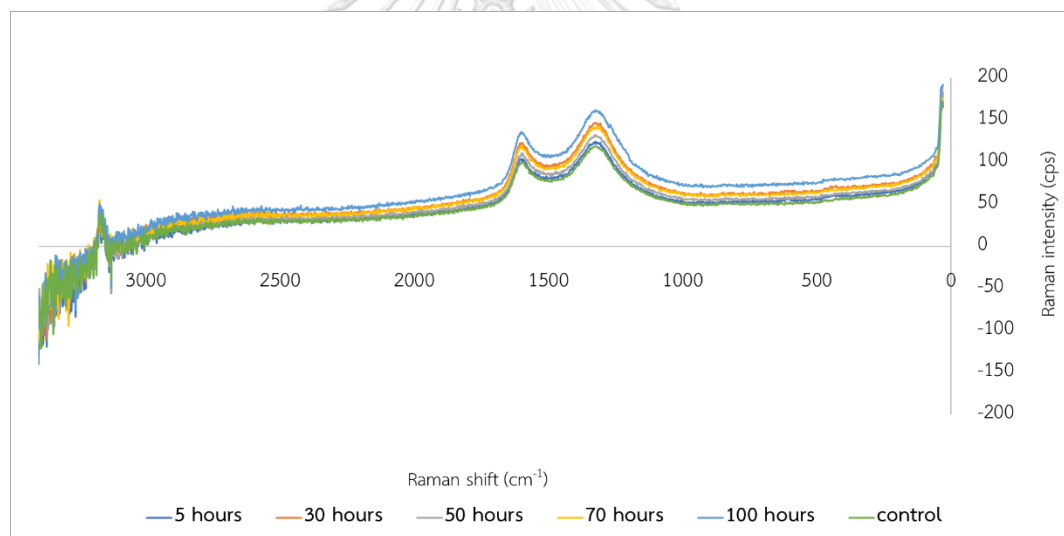
ภาพที่ ข-5 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสี่สีดำคาร์บอน เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



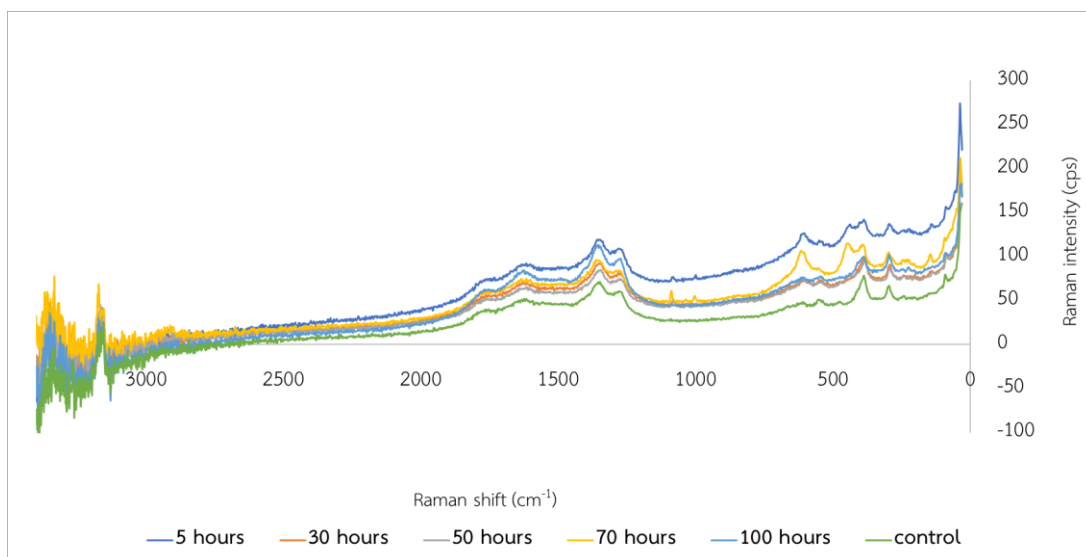
ภาพที่ ข-6 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสี่สีดำคาร์บอน เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



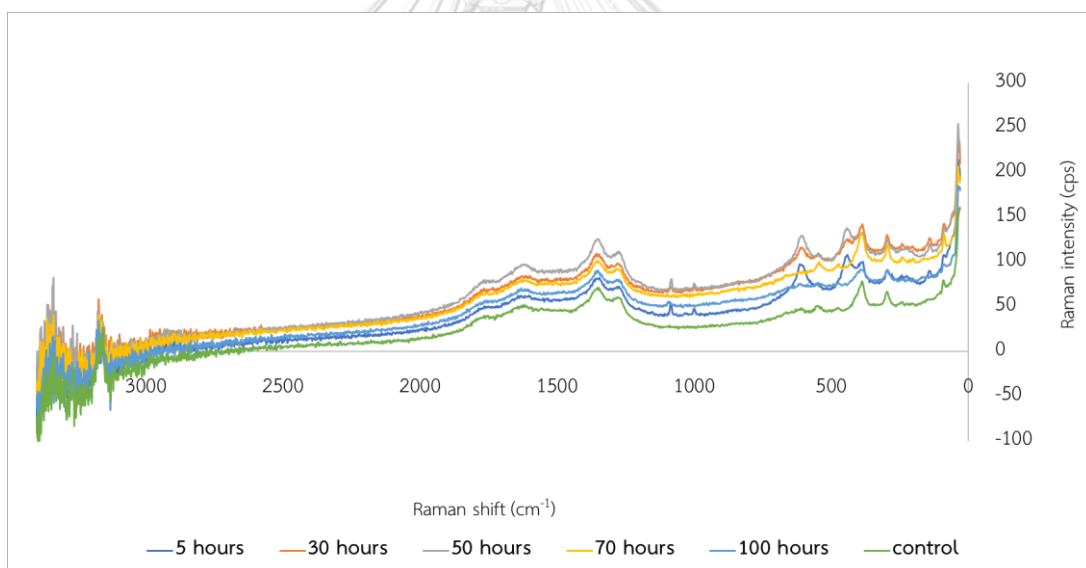
ภาพที่ ข-7 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีต่างข้าง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



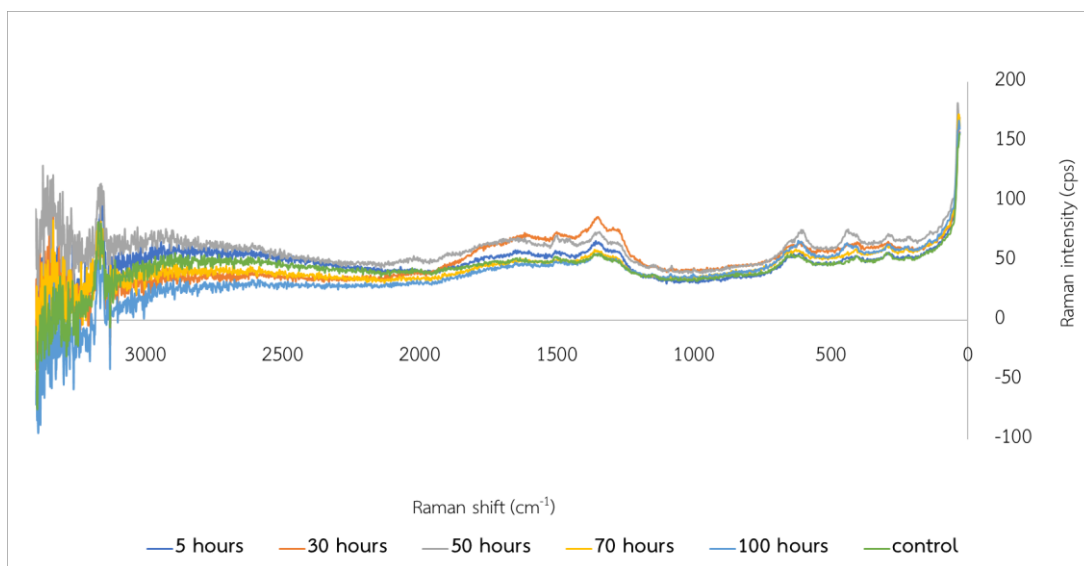
ภาพที่ ข-8 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีต่างข้าง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



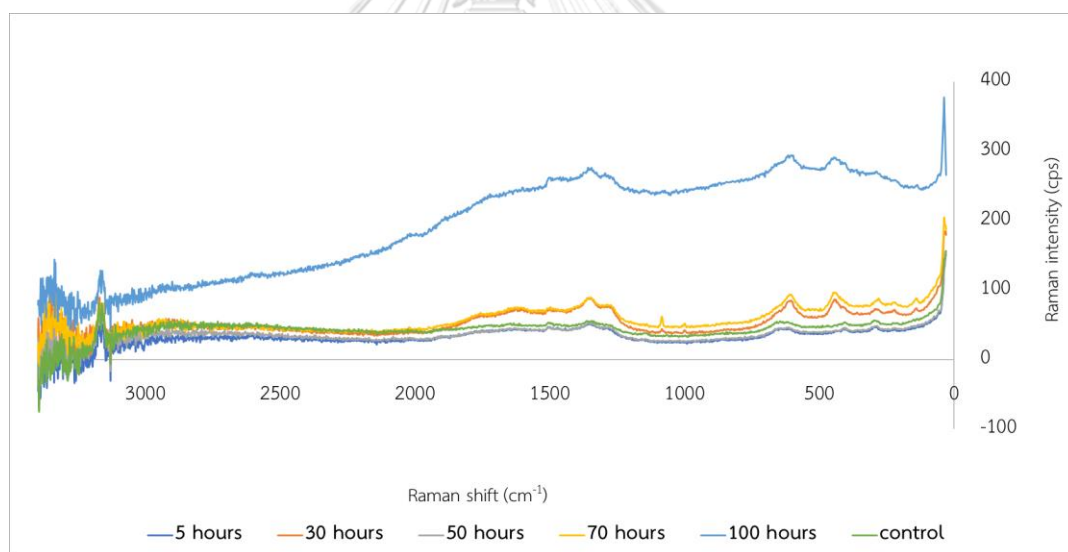
ภาพที่ ข-9 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาที่ต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



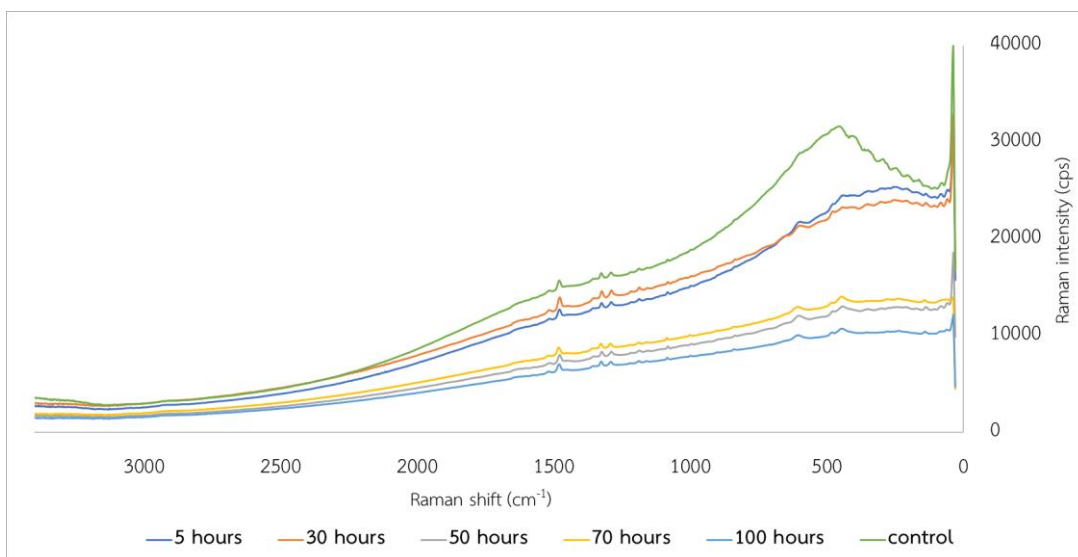
ภาพที่ ข-10 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีสีน้ำตาลอัมเบอร์ เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาที่ต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



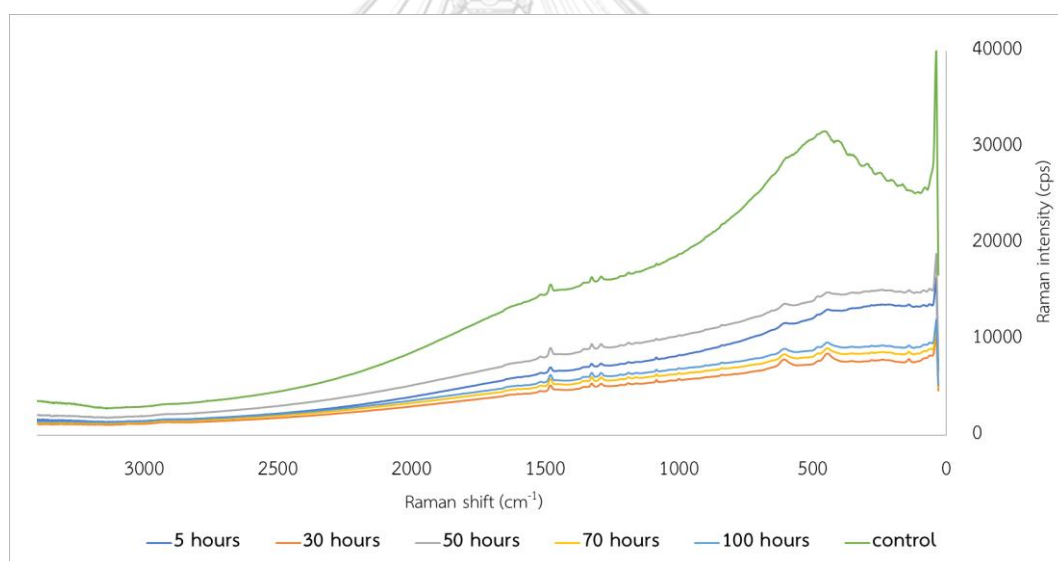
ภาพที่ ข-11 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีน้ำตาลไหม้ เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



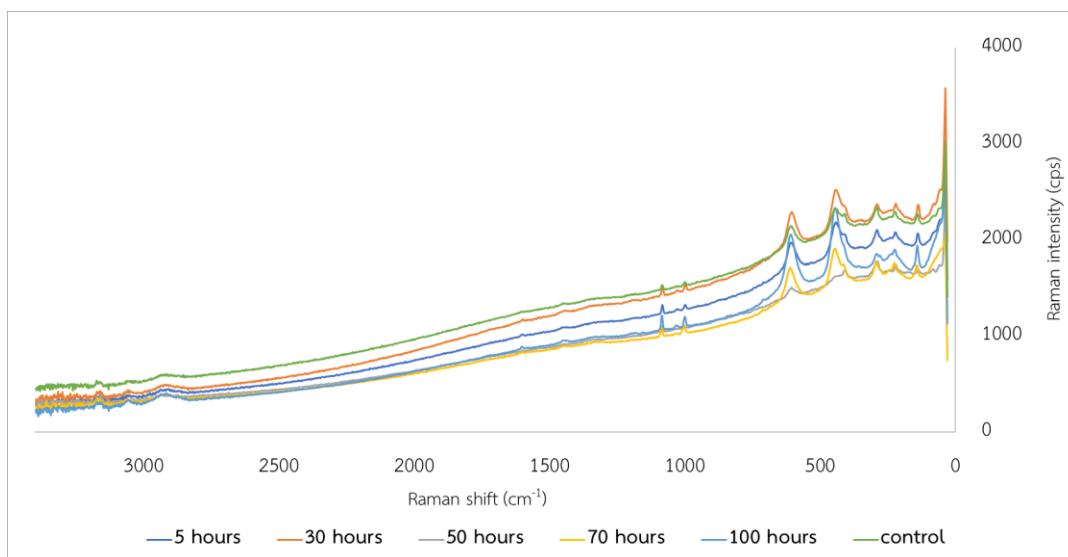
ภาพที่ ข-12 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีน้ำตาลไหม้ เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



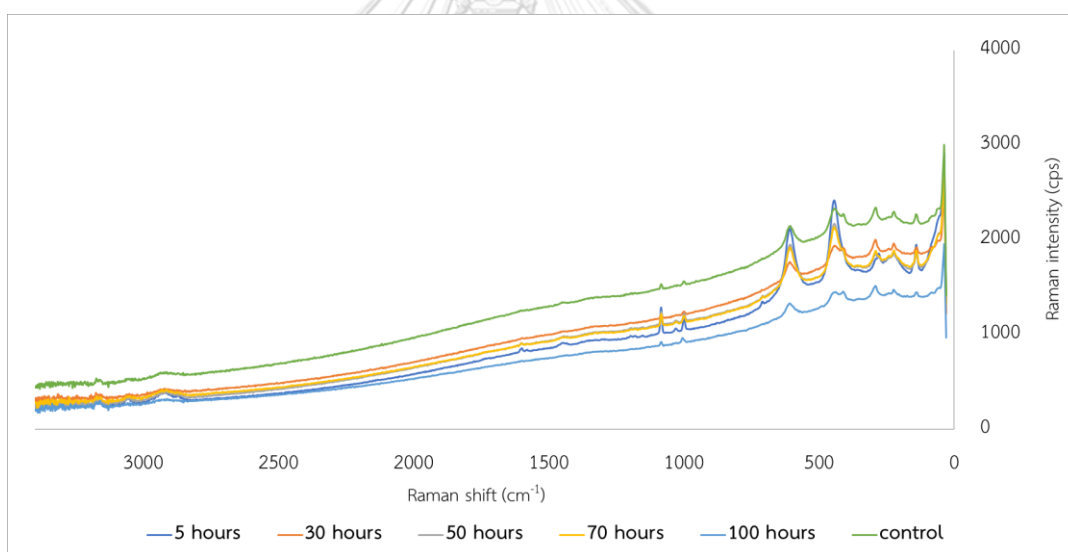
ภาพที่ ข-13 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีซีแดงอะลิซาริน เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



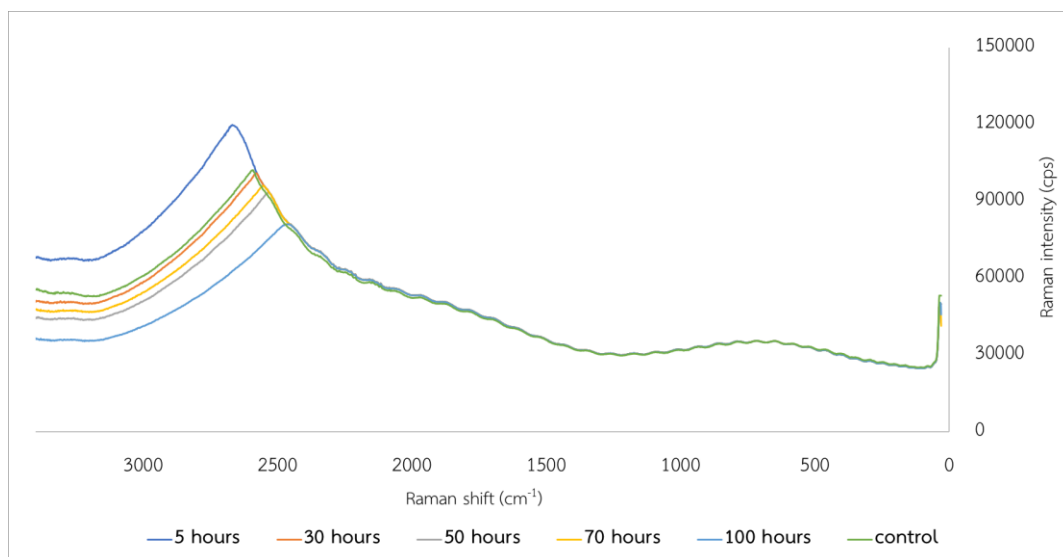
ภาพที่ ข-14 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีซีแดงอะลิซาริน เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพใน เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



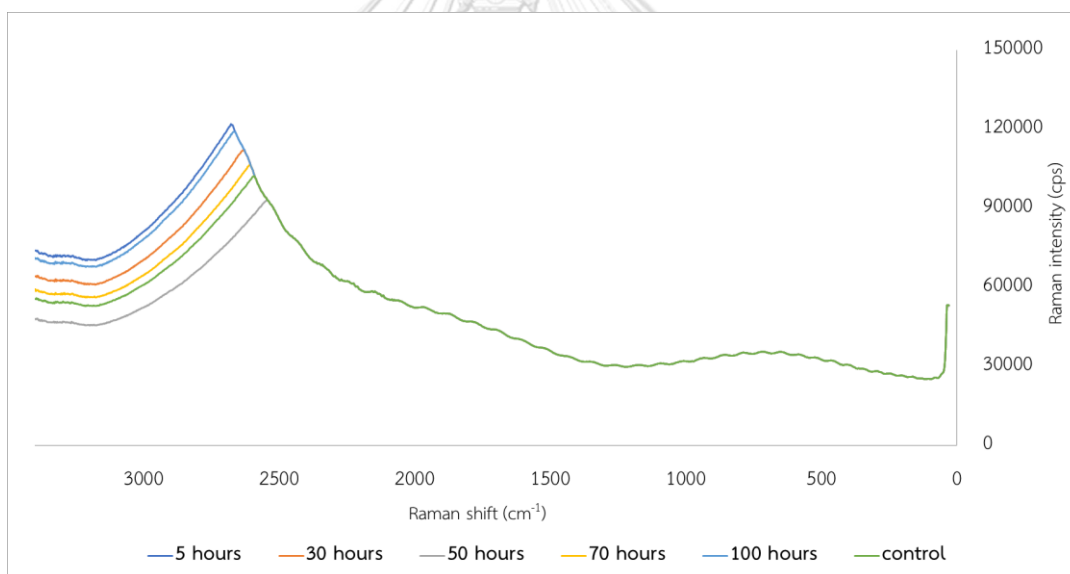
ภาพที่ ข-15 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีจากดินแดง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



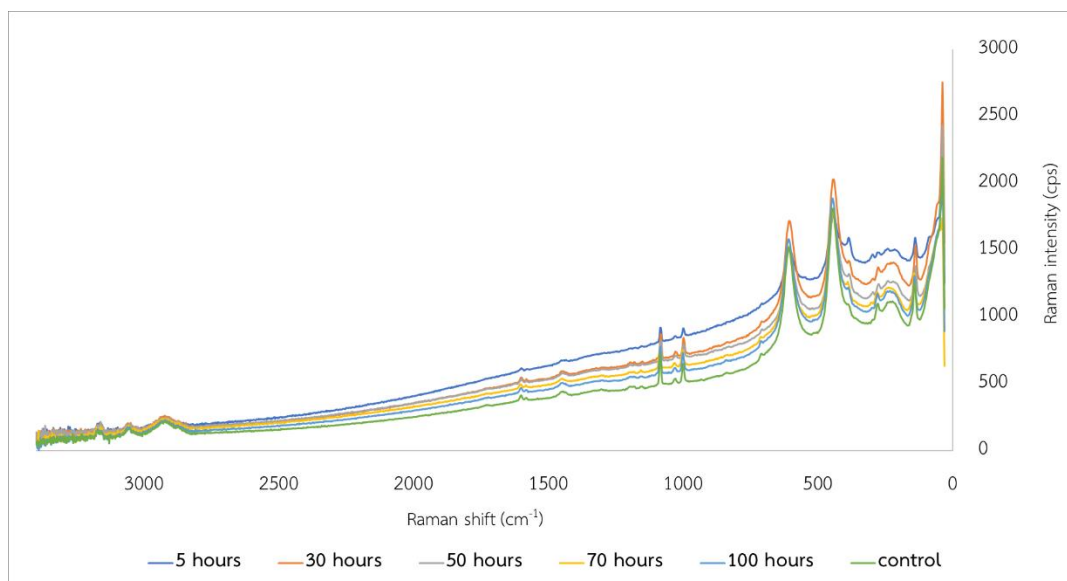
ภาพที่ ข-16 การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมรามานของสารสีจากดินแดง เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพใน
เวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



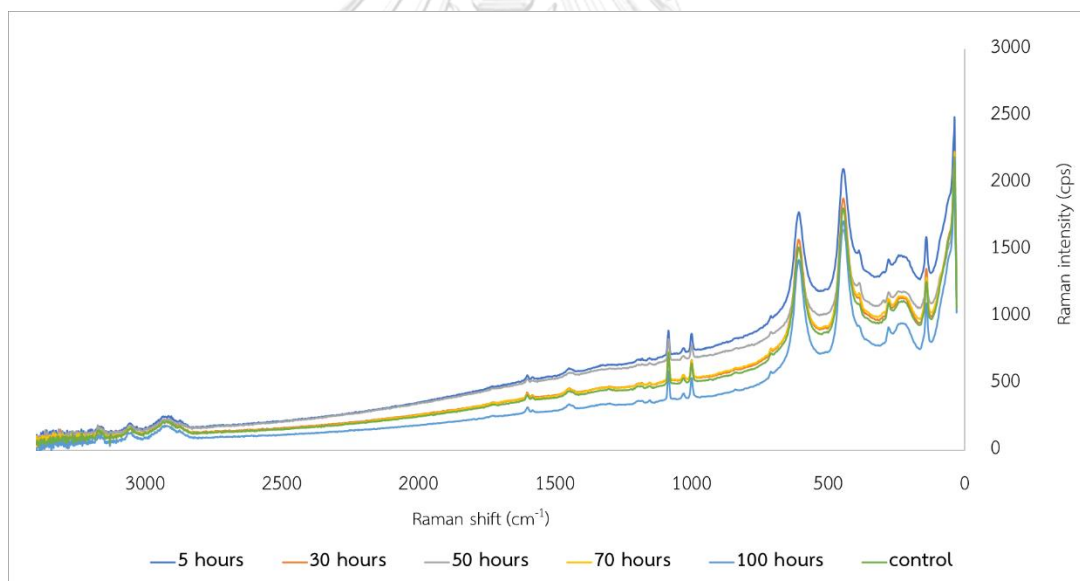
ภาพที่ ข-17 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีเหลืองโครเมียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์



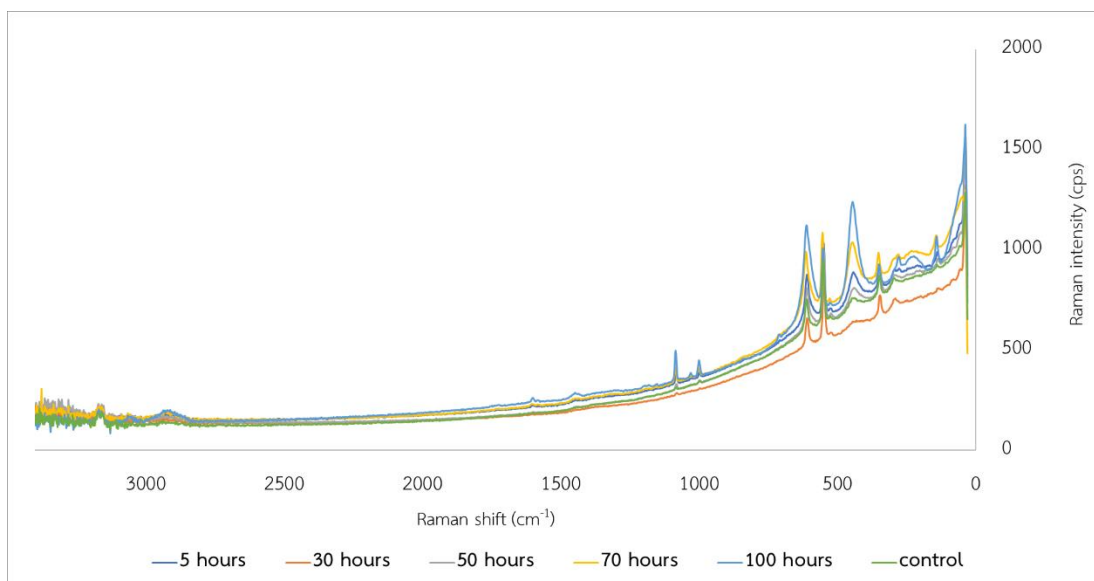
ภาพที่ ข-18 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีเหลืองโครเมียม เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์



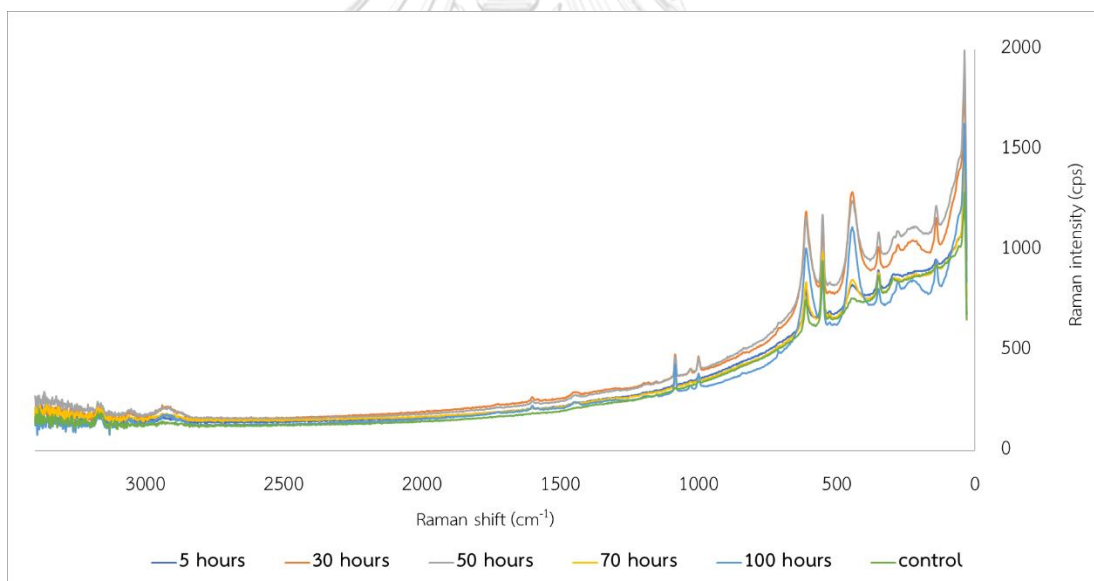
ภาพที่ ข-19 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีจากดินเหนียว เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพ
ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55%



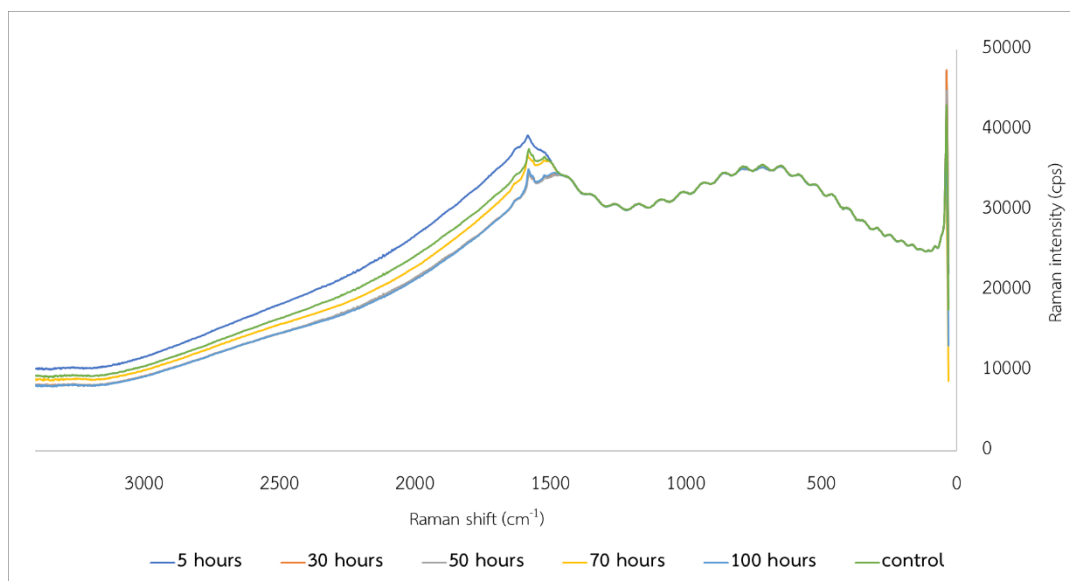
ภาพที่ ข-20 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีจากดินเหนียว เมื่อถูกแรงการเสื่อมสภาพ
ในเวลาต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



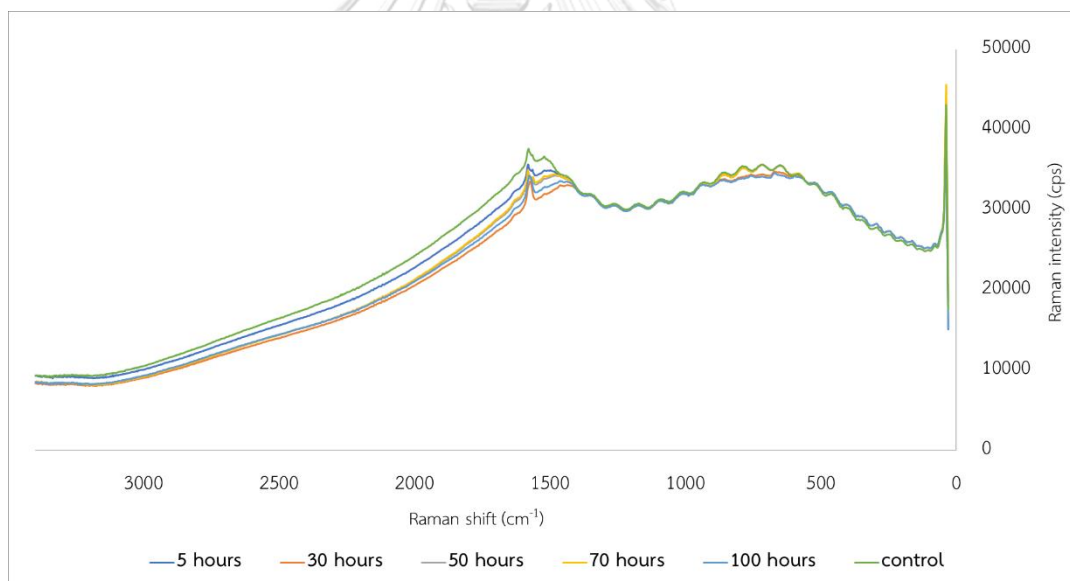
ภาพที่ ข-21 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารซิสีวโครเมียมออกไซด์ เมื่อถูกแรงการ
 เสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ 55%



ภาพที่ ข-22 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารซิสีวโครเมียมออกไซด์ เมื่อถูกแรงการ
 เสื่อมสภาพในเวลาต่างกัน ที่ความเข้มข้นสัมพัทธ์ 75%



ภาพที่ ข-23 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีน้ำเงินมายา เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาที่ต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 55% โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์



ภาพที่ ข-24 การเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมรามานของสารสีน้ำเงินมายา เมื่อถูกเร่งการเสื่อมสภาพในเวลาที่ต่างกัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% โดยให้ผลเป็นการเกิดฟลูออเรสเซนซ์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เดือนเต็มดวง เดชสุภา
วัน เดือน ปี เกิด	06 พฤศจิกายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2560 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพและ การพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	107 ซ.รังสิตนครนายก64 หมู่บ้านชมพูฟ้า ถ.รังสิตนครนายก ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY