

การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัม



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SPECTRAL REFLECTANCE ESTIMATION OF COLORS IN THAI MURAL PAINTINGS FROM
MULTISPECTRAL IMAGE

Mr. Rathapol Buathet



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Imaging Technology

Department of Imaging and Printing Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีใน จิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัม
โดย	นายรัฐพล บัวเทศ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาล คุร์พิพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. โนริมิชิ ชิโมะระ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาล คุร์พิพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. โนริมิชิ ชิโมะระ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สือประสาร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ พรทิวี พึ่งรัมย์)

รัฐพล บัวเทศ : การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทย จากภาพมัลติสเปกตรัม (SPECTRAL REFLECTANCE ESTIMATION OF COLORS IN THAI MURAL PAINTINGS FROM MULTISPECTRAL IMAGE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: ผศ. ดร. ขวาล คุรุพิพัฒน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. โนริมิชิ ชิโมะระ, 85 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัมของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยในพระอุโบสถ ด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์เจลละติน ทั้งหมด 5 แผ่น ได้แก่ BPB42, BPB45, BPB50, BPB55 และ BPB60 โดยมีแผ่นฟิลเตอร์ที่ตัดแสงในช่วงอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ตบังหน้าเลนส์ใช้แหล่งแสงฟลูออเรสเซนต์ที่มีอุณหภูมิสีของแสง 6500 เคลวิน แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กรณีศึกษา ที่ใช้ฐานข้อมูลสีในการประมาณค่าต่างกันดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 ใช้ฐานข้อมูลสีจากแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี กรณีศึกษาที่ 2 ใช้ฐานข้อมูลสี จำนวน 154 สี จากแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี ร่วมกับแผ่นสี NCS จำนวน 46 สี และสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี กรณีศึกษาที่ 3 ใช้ฐานข้อมูลสี จำนวน 1178 สี จากแผ่นสี Munsell จำนวน 1160 สี ร่วมกับสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี โดยสีฝุ่นจากจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี จะถูกใช้เป็นชุดสีทดสอบเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าด้วย RMSE และค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการประมาณกับค่าการสะท้อนแสงที่วัดค่าได้ พบว่าผลเป็นดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 มีค่า 0.021 และ 2.89 กรณีศึกษาที่ 2 มีค่า 0.020 และ 3.03 กรณีศึกษาที่ 3 มีค่า 0.019 และ 2.78 ตามลำดับ ผลการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี One-Way ANOVA พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีในแต่ละกรณีศึกษาไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ภาควิชา	เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5672065623 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORDS: WIENER ESTIMATION/SPECTRAL REFLECTANCE/MUTISPECTRAL IMAGE/THAI MURAL PAINTINGS

RATHAPOL BUATHET: SPECTRAL REFLECTANCE ESTIMATION OF COLORS IN THAI MURAL PAINTINGS FROM MULTISPECTRAL IMAGE. ADVISOR: ASST. PROF. CHAWAN KOOPIPAT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. NORIMICHI TSUMURA, Ph.D., 85 pp.

This research aimed to estimate the spectral reflectance of colors on Thai mural paintings inside ordination hall of a Thai temple by using Wiener Estimation Method from multispectral images. Multispectral images were taken with a monochrome digital camera through 5 gelatin filters (Fujifilm BPB42, BPB45, BPB50, BPB55 and BPB60). UV-IR cut filter was placed in front of lens in order to block UV and IR. Fluorescent light at 6500 K was used as light sources. Three cases by using difference training set for estimating spectral reflectance were studied and compared with measurement reflectance. These cases were : Case One - 1300 Munsell colors; Case Two - 90 Munsell colors, 70 NCS colors and 18 mural colors paintings (154 colors); Case Three - 1160 Munsell and 18 mural paintings colors (1178 colors). Eighteen painting colors from mural painting were used as the test color set. When comparing the average RMSE and average color difference (CIEDE2000) between estimated reflectances and measured reflectances the results are 0.021 and 2.89 for Case One, 0.020 and 3.03 for Case Two and 0.019 and 2.78 for Case Three respectively. Hypothesis was tested by One-Way ANOVA and the results is .05 significant for average color difference of every Cases is not different.

Department:	Imaging and Printing Technology	Student's Signature
		Advisor's Signature
Field of Study:	Imaging Technology	Co-Advisor's Signature
Academic Year:	2016	

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ พระพรหมสิทธิ รักษาการแทนตำแหน่งเจ้าอาวาส วัดสระเกศราชวรมหาวิหาร ที่อนุญาตให้เข้าใช้พื้นที่ภายในพระอุโบสถ เพื่อถ่ายภาพและเก็บข้อมูลภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย

ขอขอบคุณ พระมหาฉิมพลี และ พระมหาปัญญา พระภิกษุผู้ดูแลพระอุโบสถ ที่อำนวยความสะดวกและช่วยประสานงานในการเข้าใช้พื้นที่ภายในพระอุโบสถเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุพิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและดูแลอย่างใกล้ชิดตลอดระยะเวลาของการจัดทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยเสนอแนะวิธีการแก้ปัญหาในการวิจัยช่วยผลักดันข้าพเจ้าจนสามารถสำเร็จการศึกษาได้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.โนริมิชิ ชิโมะระ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยแก้ไขปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจสอบการเขียนอัลกอริทึมในการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ทำให้สามารถประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยด้วยภาพมัลติสเปกตรัม ได้ผลการวิจัยออกมาเป็นที่น่าพอใจ

ขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าของท่าน ในการดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์และบุคลากร ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกเรื่อง ตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณกำลังใจจากพ่อแม่ ญาติ และพี่น้องทุกท่าน ที่ช่วยผลักดันและสนับสนุนในทุกๆด้าน จนถึงวันสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี	4
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจิตรกรรมไทย	4
2.1.1.1 จิตรกรรมไทยประเพณี	4
2.1.1.2 จิตรกรรมไทยร่วมสมัย	5
2.1.2 สื่จากการสะท้อนแสง	6
2.1.3 การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม	7
2.1.3.1 ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลมัลติสเปกตรัม	8
2.1.3.2 ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์	8
2.1.3.3 สัญญาณรบกวนในภาพ	9
2.1.3.4 Signal to Noise Ratio (SNR)	9

2.1.3.5 Wiener filtering	10
2.1.3.6 Opto-electronic conversion functions (OECF)	11
2.1.3.7 กำลังขยายของกล้องดิจิทัล (FOV).....	12
2.1.3.8 การต่อภาพ (Image stitching).....	12
2.1.4 วิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์	13
2.1.4.1 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)	14
2.1.5 ระบบสี.....	15
2.1.5.1 ระบบสี Munsell	15
2.1.5.2 ระบบสี NCS.....	16
2.1.5.3 ระบบสี CIELAB	17
2.1.6 การแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมเป็นสีในระบบสี CIELAB	19
2.1.7 CIEDE2000 Color Difference Formula	21
2.1.7.1 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.).....	23
2.1.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Way ANOVA)	23
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	26
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	26
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	31
3.2.1 สำนวจสถานที่จริงในการทำวิจัย	31
3.2.2 ประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อการวิจัย	33
3.2.2.1 แหล่งแสงประกอบด้วยโคมช่วยกระจายแสง	33
3.2.2.2 กล้องควบคุมแสง.....	34
3.2.2.3 กล้องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพ.....	36

3.2.3	วัดค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง.....	37
3.2.4	วัดค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องดิจิทัล.....	38
3.2.5	วัดค่าการส่องผ่านในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของฟิลเตอร์.....	39
3.2.6	วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell และ NCS.....	41
3.2.7	ทดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียวและอุปกรณ์วิจัย.....	42
3.2.8	ทดสอบประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์.....	45
3.2.9	วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนัง.....	45
3.2.9.1	วัดค่าด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์.....	45
3.2.9.2	คำนวณพื้นที่ตัดภาพเทียบกับพื้นที่วัดค่าจริง.....	46
3.2.10	ถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย.....	47
3.2.11	ฐานข้อมูลสีสำหรับประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม.....	50
3.2.11.1	ฐานข้อมูลสีชุดที่ 1.....	50
3.2.11.2	ฐานข้อมูลสีชุดที่ 2.....	50
3.2.11.3	ฐานข้อมูลสีชุดที่ 3.....	50
3.2.12	ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยแบบวี เนอร์.....	51
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	52
4.1	ค่าความสว่างของแหล่งแสงขณะทำการวิจัย.....	52
4.1.1	ค่าความสว่างขณะวัดค่าการสะท้อนแสงของสีภายในตู้แสง.....	52
4.1.2	ค่าความสว่างขณะถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย.....	53
4.2	ภาพจำลองการต่อภาพ.....	54
4.3	กรณีศึกษาที่ 1.....	55
4.3.1	กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น.....	55

4.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)	57
4.3.3 ค่าความแตกต่างของสี่ CIEDE2000 (ΔE_{00})	58
4.4 กรณีศึกษาที่ 2.....	60
4.4.1 กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงเปกตรัมของสีฝุ่น	60
4.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)	62
4.4.3 ค่าความแตกต่างของสี่ CIEDE2000 (ΔE_{00})	63
4.5 กรณีศึกษาที่ 3.....	65
4.5.1 กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงเปกตรัมของสีฝุ่น	65
4.5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)	67
4.5.3 ค่าความแตกต่างของสี่ CIEDE2000 (ΔE_{00})	68
4.6 เปรียบเทียบการประมาณค่าทั้ง 3 กรณีศึกษา	70
4.6.1 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE).....	70
4.6.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของสี่ CIEDE2000 (ΔE_{00})	71
4.6.3 ทดสอบสมมติฐานทางการวิจัย	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการวิจัย	74
5.1.1 ผลของกราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม	74
5.1.2 ผลของค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าการสะท้อนแสง.....	75
5.1.3 ผลของค่าความแตกต่างของสี่	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	84

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์85



สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	ภาพพระเวสสันดรบนฝานั่งภายในพระอุโบสถ วัดระฆังโฆสิตาราม [5]	5
ภาพที่ 2.2	ผลงานภาพจิตรกรรม ของอาจารย์เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์ [6]	5
ภาพที่ 2.3	ช่วงความยาวคลื่นที่แสงอาจถูกดูดกลืน	6
ภาพที่ 2.4	กราฟการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของวัตถุสีที่ระบุช่วงที่ดูดกลืนแสง [8].....	6
ภาพที่ 2.5	กราฟการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของวัตถุสีแดง [10]	7
ภาพที่ 2.6	ภาพทั่วไปเปรียบเทียบกับภาพมัลติสเปกตรัมและภาพไฮเปอร์สเปกตรัม [12, 13]....	7
ภาพที่ 2.7	การถ่ายภาพด้วยกล้องมัลติสเปกตรัมบนดาวเทียมและวิเคราะห์ผล [14]	8
ภาพที่ 2.8	การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียว [15].....	8
ภาพที่ 2.9	ขั้นตอนการแปลงค่าพิกเซลของภาพด้วย Invert OECF	11
ภาพที่ 2.10	ตัวแปรในการคำนวณขอบเขตการบันทึกภาพของเซนเซอร์.....	12
ภาพที่ 2.11	ตัวอย่างการต่อภาพแบบ Rectilinear [22]	13
ภาพที่ 2.12	การจัดเรียงสีหลักตามวงสีในระบบ Munsell [25].....	15
ภาพที่ 2.13	การแบ่งส่วนสีหลักตามวงสีในระบบ Munsell [27].....	16
ภาพที่ 2.14	ตัวอย่างแผ่นสี Hue 5.0R ใน Munsell Book Color [26]	16
ภาพที่ 2.15	วงกลมสี NCS [28].....	17
ภาพที่ 2.16	ปริภูมิสี CIELAB [29].....	18
ภาพที่ 2.17	ปริภูมิสี CIELCH [31]	18
ภาพที่ 3.1	แผนผังตำแหน่งภาพจิตรกรรมฝานั่งภายในพระอุโบสถ.....	32
ภาพที่ 3.2	แหล่งแสงประกอบกับคอมพิวเตอร์กระจายแสงพร้อมขาตั้งและชุดควบคุมไฟฟ้า.....	34
ภาพที่ 3.3	การประกอบและพับเก็บกล่องควบคุมแสงที่ติดตั้งพร้อมชุด	35
ภาพที่ 3.4	ส่วนประกอบของผ้าคลุมกำมะหยี่.....	36
ภาพที่ 3.5	กล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพ	37

ภาพที่ 3.6	กราฟแสดงค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง	38
ภาพที่ 3.7	กราฟแสดงค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว	39
ภาพที่ 3.8	กราฟแสดงค่าการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมของฟิลเตอร์ BPB42, BPB45, BPB50, BPB55, BPB60 และ UV-IR Cut.....	40
ภาพที่ 3.9	กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่น Reference white.....	41
ภาพที่ 3.10	ตำแหน่งการวัดค่าความสว่าง (lux) บริเวณพื้นที่วัดค่าภายในตู้แสง	41
ภาพที่ 3.11	กราฟ Invert OECF พร้อมสมการแนวโน้มเชิงเส้น	43
ภาพที่ 3.12	การจัดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพโดยใช้ Geometry ที่ 45/0.....	44
ภาพที่ 3.13	การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ	44
ภาพที่ 3.14	ภาพจำลองขนาดของจุดวัดค่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์	46
ภาพที่ 3.15	ทิศทางในการถ่ายภาพทั้งหมด 12 ภาพย่อย.....	47
ภาพที่ 3.16	บริเวณของภาพถ่ายที่กำหนดกรอบตัดภาพและระบุหมายเลขสี.....	48
ภาพที่ 3.17	ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 1 ที่ระบุหมายเลขสี	48
ภาพที่ 3.18	ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 2 ที่ระบุหมายเลขสี	49
ภาพที่ 3.19	ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 3 ที่ระบุหมายเลขสี	49
ภาพที่ 3.20	ตำแหน่งวัดค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพย่อย.....	49
ภาพที่ 3.21	ค่า CIE C* _{ab} กับ L* ของแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี และแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี ที่ระบุอยู่ในงานวิจัยชื่อสีในจิตรกรรมไทย.....	50
ภาพที่ 4.1	ค่าความสว่าง (lux) บริเวณที่วัดค่าภายในตู้แสงทั้งหมด 15 จุด	53
ภาพที่ 4.2	ค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพแต่ละจุด พร้อมกับตำแหน่งของสีฝุ่น จำนวน 18 สี บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย.....	53
ภาพที่ 4.3	จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 1.54	
ภาพที่ 4.4	จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 2.54	
ภาพที่ 4.5	จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 3.54	

- ภาพที่ 4.6** ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1 ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2 (ฃ) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ฅ) สีฝุ่นหมายเลข 1755
- ภาพที่ 4.7** ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ฌ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 15.....56
- ภาพที่ 4.8** RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1 ...58
- ภาพที่ 4.9** ค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 158
- ภาพที่ 4.10** ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากกรณีศึกษาที่ 1.....59
- ภาพที่ 4.11** ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2 ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2 (ฃ) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ฅ) สีฝุ่นหมายเลข 1760
- ภาพที่ 4.12** ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ฌ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 1561
- ภาพที่ 4.13** RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2.63
- ภาพที่ 4.14** ค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 263
- ภาพที่ 4.15** ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากกรณีศึกษาที่ 2.....64
- ภาพที่ 4.16** ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3 ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 4 (ฃ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ฅ) สีฝุ่นหมายเลข 1765

ภาพที่ 4.17 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ซ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ณ) สีฝุ่นหมายเลข 15.....	66
ภาพที่ 4.18 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3.	68
ภาพที่ 4.19 ค่า CIE C_{ab}^* vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C_{ab}^* vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3	68
ภาพที่ 4.20 ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากกรณีศึกษาที่ 3.....	69
ภาพที่ 4.21 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่แตกต่างทั้ง 3 กรณีศึกษา	70
ภาพที่ ก.1 พิกัดสี (ก) CIE a^*b^* (ข) C_{ab}^* L^* ของสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับ ที่วัดค่าได้ (Test set).....	83
ภาพที่ ข.1 พิกัดสี (ก) CIE a^*b^* (ข) C_{ab}^* L^* ของสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับ ที่วัดค่าได้ (Training set).....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ค่า Signal to noise ratio (SNR_{dB}) กับคุณภาพของภาพที่ได้ [18].....	10
ตารางที่ 4.1	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) จาก 3 กรณีศึกษา (คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS).....	71
ตารางที่ 4.2	ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) จาก 3 กรณีศึกษา.....	72
ตารางที่ 4.3	ค่า F และ Sig. ที่คำนวณด้วยวิธี One-Way ANOVA จาก 3 กรณีศึกษา โดยใช้โปรแกรม SPSS.....	73
ตารางที่ 4.4	ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบจับคู่พหุคูณ ในแต่ละกรณีศึกษา แบ่งเป็นกรณีที่ค่าความแปรปรวนเท่ากันและค่าความแปรปรวนไม่เท่ากัน	73
ตารางที่ ก.1	สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับและค่าสี CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} ที่วัดค่าได้ (Test set)	83
ตารางที่ ข.1	สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับและค่าสี CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} ที่วัดค่าได้ (Training set).....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการบูรณะภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ก่อนที่จิตรกรผู้วาดภาพจะบูรณะภาพจิตรกรรมฝาผนัง ในกรอบหรือส่วนที่มีความชำรุดนั้น จิตรกรต้องถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลเพื่อเก็บข้อมูลของ ส่วนที่ชำรุดและวางแผนในการบูรณะโดยเทียบเคียงกับหลักฐานภาพถ่ายขาว-ดำ ซึ่งภาพบางภาพมีความชำรุดทำให้บ่งบอกรายละเอียดของภาพจิตรกรรมไม่ได้ครบถ้วน หลังจากตรวจสอบความถูกต้อง ด้วยรูปภาพแล้ว จิตรกรผู้วาดภาพจะผสมสีจากการดูสีเก่าบนภาพจิตรกรรมและบางส่วนมีการผสมเตรียมไว้แล้วเพื่อทำการบูรณะสีหรือภาพ ซึ่งใช้ความจำและความชำนาญพิเศษเฉพาะบุคคลโดยไม่มี ฐานข้อมูลสีเก่าเพื่อใช้ในการอ้างอิง หากมีการบูรณะใหม่ในอนาคตอาจมีการเปลี่ยนแปลงจิตรกรผู้วาด ภาพ สีบนจิตรกรรมฝาผนังที่ทำการบูรณะใหม่ก็มีความแตกต่างจากสีเดิม การมีฐานข้อมูลสีจะเป็น การแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีเหมาะสมที่จะใช้เป็น ฐานข้อมูลสีเพื่อการผลิตสีซ้ำ เนื่องจากเป็นค่าข้อมูลที่บอกลักษณะเฉพาะของสีได้ครบถ้วน ส่วน ลวดลายบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยนั้น มีองค์ประกอบของภาพที่มีรายละเอียดสูงและพื้นที่สีบาง บริเวณมีขนาดเล็ก การวัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมโดยตรงจากภาพด้วยเครื่องวัดสีจึงทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงศึกษาการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจากภาพถ่ายแทนการวัดค่าจาก ภาพจริง

การถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลโดยทั่วไป มีการบันทึกข้อมูลภาพเพียง 3 แชนแนล (RGB Image) ซึ่งสามารถใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีได้ แต่ให้ความแม่นยำในการ ประมาณค่าน้อย[1] จากงานวิจัยของ Haneishi และคณะ[2] จึงเลือกวิธีการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม ด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์จำนวน 5 แผ่น (5 แชนแนล) จากการทดสอบพบว่าเพียงพอ สำหรับการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีน้ำมันในภาพจิตรกรรมได้ ฟิลเตอร์แต่ละชนิด ทั้งหมด 5 แผ่น ได้แก่ BPB42, SP-9, BPB50, BPB55 และ BPB60 โดยมีแผ่นฟิลเตอร์ที่ตัดแสงในช่วง อินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ต วิธีการประมาณค่ามีหลายวิธี จึงมีการเปรียบเทียบการประมาณค่า ทั้งหมด 6 วิธี ได้แก่ PCA, Wiener estimation, Multiple regression, Regressive PCA, Piece-wise linear Wiener estimation และ Regression Analysis จากผลการวิจัยของ Tsumura และ คณะ [3] พบว่าการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการ ประมาณค่าแบบวีเนอร์ (Wiener estimation) โดยใช้ฐานข้อมูลค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสี น้ำมันจากภาพจิตรกรรม เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าด้วย RMSE และค่า

ความแตกต่างของสีด้วย CIEDE1994 กับวิธีการประมาณค่าแบบ Linear วิธีอื่น มีผลการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีแม่นยำที่สุด

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณแบบวีเนอร์ สามารถใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีน้ำมันโดยใช้ฐานข้อมูลสีน้ำมัน ซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมได้แม่นยำที่สุด ทั้งนี้เป็นการทดลองในห้องทดลองที่สามารถควบคุมแสงในการถ่ายภาพให้คงที่ได้ง่าย[3] สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่วาดด้วยสีฝุ่น ซึ่งอยู่บนฝาผนังในพระอุโบสถของวัด ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ต้องทำการถ่ายภาพในสภาวะที่ไม่สามารถควบคุมแสงให้คงที่ได้ จึงประดิษฐ์แหล่งแสง 2 ชุดและอุปกรณ์ควบคุมแสงเพื่อควบคุมแสงในการถ่ายภาพให้คงที่ เนื่องจากภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยมีขนาดใหญ่ ยากที่จะบันทึกภาพและเก็บรายละเอียดข้อมูลของภาพให้ครบถ้วน จึงกำหนดขอบเขตของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่จะถ่ายภาพและแบ่งการบันทึกภาพออกเป็น 12 ภาพย่อย นำภาพย่อยทั้งหมดมาต่อประกอบเป็นภาพใหญ่ โดยถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์จำนวน 5 แผ่น เนื่องจากแผ่นฟิลเตอร์ SP-9 เล็กผลิตจึงใช้แผ่นฟิลเตอร์ BPB42 ที่มีค่าการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมสูงสุดเหมือนกันทดแทน ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณแบบวีเนอร์ ฐานข้อมูลสีที่ใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์เป็นค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการวัดค่าของแผ่นสี Munsell ร่วม กับ NCS บางส่วนและสีฝุ่นซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย แบ่งเป็น 3 ชุดเพื่อทดสอบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทย เปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีที่ได้จากประมาณค่ากับค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีที่วัดได้จากเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าด้วย RMSE และค่าความแตกต่างของสีด้วย CIEDE2000 ผลที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ สำหรับการบูรณะภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณแบบวีเนอร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทย ที่มีการบูรณะขึ้นใหม่ภายในพระอุโบสถของวัดสระเกศราชวรมหาวิหาร จากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณแบบวีเนอร์

ฐานข้อมูลสีในการประมาณค่าการสะท้อนเชิงสเปกตรัม ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ใช้ค่าที่ได้จากการวัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell ร่วมกับ NCS บางส่วน และสีฝุ่นซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยจากการประมาณค่าแบบวีเนอร์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

งานวิจัยนี้เป็นการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณแบบวีเนอร์ ดังนั้นทฤษฎีที่สำคัญสำหรับการทดลองและวิเคราะห์และอภิปรายผลในการทำงานวิจัยนี้ ได้แก่ ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจิตรกรรมไทย สีจากการสะท้อนแสง การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม วิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ระบบสี การแปลงค่าการสะท้อนแสงเป็นสีในระบบสี CIELAB และ CIEDE2000 Color Difference Formula

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจิตรกรรมไทย

จิตรกรรมไทย หมายถึง ภาพเขียนที่มีลักษณะเป็นแบบอย่างของไทย ที่มีความแตกต่างจากศิลปะของชาติอื่นอย่างชัดเจน ถึงแม้จะมีอิทธิพลศิลปะของชาติอื่นมาปะปนอยู่บ้าง แต่ก็สามารถดัดแปลง ตัดทอน หรือเพิ่มเติมจนกลายเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของตนเองได้อย่างสวยงามและลงตัว[4] จิตรกรรมไทยเป็นภาพ 2 มิติ ในลักษณะอุดมคติ จัดวางองค์ประกอบโดยวาดสิ่งอยู่ใกล้ส่วนล่าง ส่วนสิ่งอยู่ไกลออกไปไว้ตอนบนของภาพ ใช้สีแบบเอกรงค์ คือ วาดภาพด้วยการใช้สีหลายสี แต่มีสีที่โดดเด่นเพียงสีเดียวแต่มีการลดทอนน้ำหนกสีเพื่อให้เกิดความแตกต่าง หรือสีแบบพหุรงค์ ซึ่งนิยมมากในสมัยรัตนโกสินทร์ สีที่รับมาจากต่างชาติทำให้ภาพจิตรกรรมไทยมีสีสันหลากหลายขึ้น จิตรกรรมไทยสะท้อนให้เห็นวัฒนธรรมของชาติ คุณค่าทางศิลปะ เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าเรื่องที่เกี่ยวข้อง ศาสนา ประวัติศาสตร์ โบราณคดี ชีวิตความเป็นอยู่ วัฒนธรรมการแต่งกาย ตลอดจนการแสดงการเล่นพื้นเมืองของแต่ละยุคสมัย จิตรกรรมไทยแบ่งตามรูปแบบทางศิลปกรรม เป็น 2 แบบ[5] ได้แก่

2.1.1.1 จิตรกรรมไทยประเพณี

เป็นศิลปะที่มีความประณีต สะท้อนให้เห็นความรู้สึกรักชีวิตจิตใจและความเป็นไทย สร้างสรรค์สืบต่อกันมาตั้งแต่อดีตจนเป็นเอกลักษณ์ประจำชาติ นิยมเขียนบนฝาผนังภายในสิ่งปลูกสร้างที่เกี่ยวข้องในพุทธศาสนา และสถานที่สำคัญในบุคคลชั้นสูง เช่น พระอุโบสถ วิหาร พระที่นั่ง เป็นต้น โดยเขียนด้วยสีฝุ่นตามวิธีการของช่างเขียนไทยแต่โบราณ เรื่องราวที่นิยมนิยมเขียน เป็นเรื่องเกี่ยวกับ พุทธประวัติ ทศชาติชาดก ไตรภูมิ วรรณคดีและวิถีชีวิตคนไทยในอดีต ส่วนมากจะพบจิตรกรรมประเภทนี้อยู่ที่ฝาผนังพระอุโบสถหรือวิหาร เรียกว่า “จิตรกรรมฝาผนัง (Mural paintings)” ตามภาพที่ 2.1 ส่วนจิตรกรรมที่เขียนลงบน สมุดข่อย ภาพมหาชาติ พระบฏ ตู้พระธรรม เรียกว่า “จิตรกรรมที่เคลื่อนที่ได้ (Easel Painting)”



ภาพที่ 2.1 ภาพพระเวสสันดรบนฝาผนังภายในพระอุโบสถ วัดระฆังโฆสิตาราม [5]

2.1.1.2 จิตรกรรมไทยร่วมสมัย

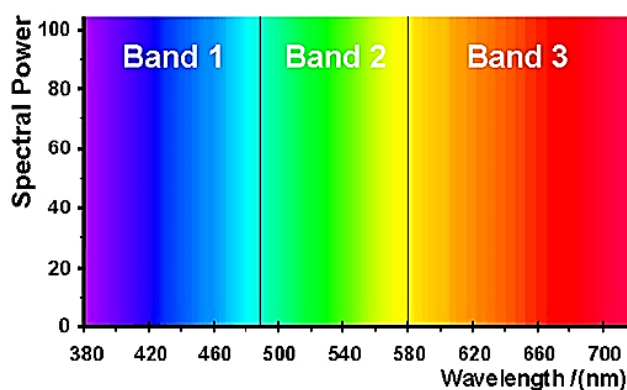
วิวัฒนาการความเจริญในด้านต่าง ๆ ของโลก และความเจริญก้าวหน้าด้านการศึกษา มีผลต่อความก้าวหน้าทางจิตรกรรมไทยร่วมสมัย ซึ่งเปลี่ยนแปลงและพัฒนาไปตามสภาพแวดล้อม ความเปลี่ยนแปลงของชีวิต ความเป็นอยู่ ความรู้สึกนึกคิด และความนิยมในสังคม ตามภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ผลงานภาพจิตรกรรม ของอาจารย์เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์ [6]

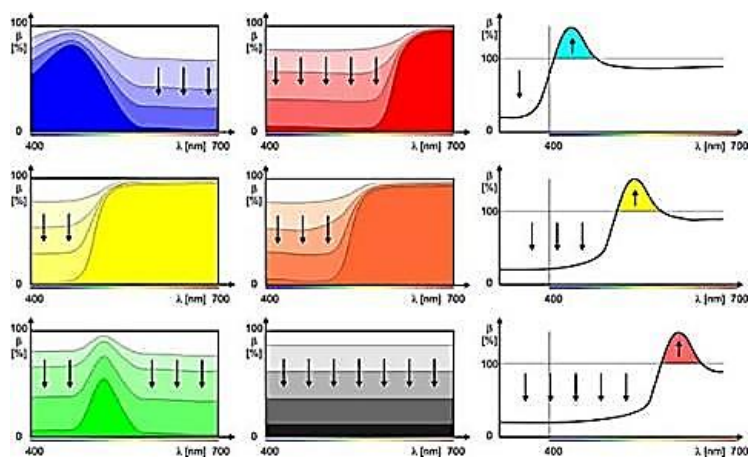
2.1.2 สีจากการสะท้อนแสง

การเลือกดูดกลืนแสงในบางช่วงความยาวคลื่นจากแสงขาวทำให้เกิดเป็นสีต่างๆได้ แสงขาวเมื่อตกกระทบลงบนวัตถุสีขาวจะเกิดแสงที่สะท้อนออกมาในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ตลอดสเปกตรัม ทำให้เกิดเป็นสัญญาณภาพและถูกส่งไปยังสมอง และถูกแปลผลให้เห็นวัตถุนั้นเป็นสีขาว สารสีในวัตถุจะดูดกลืนแสงบางช่วงความยาวคลื่นจากแสงที่ตกกระทบ โดยช่วงความยาวคลื่นที่เหลือจะถูกสะท้อนออกมาจากพื้นวัตถุนั้น วัตถุจะปรากฏเป็นสีได้อย่างน้อยต้องมีการดูดกลืนแสงช่วงใดช่วงหนึ่งหรือหลายช่วงความยาวคลื่น แสดงในภาพที่ 2.3



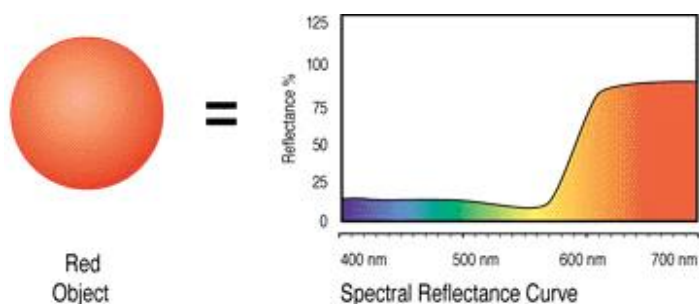
ภาพที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นที่แสงอาจถูกดูดกลืน

ถ้าวัตถุที่มีการดูดกลืนแสงเท่ากันในทุกช่วงความยาวคลื่นจะปรากฏเป็นสีขาว วัตถุเป็นสีแดงเพราะวัตถุนั้นดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินและสีเขียว เฉพาะช่วงความยาวคลื่นสีแดงเท่านั้นที่สะท้อนเข้าสู่ตาและถูกสมองแปลผลเป็นสีแดง แสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุและปรากฏให้เห็นเมื่อวัตถุดูดกลืนแสงและสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงสีต่างๆ [7] ตามภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของวัตถุมีสีที่ระบุช่วงที่ดูดกลืนแสง [8]

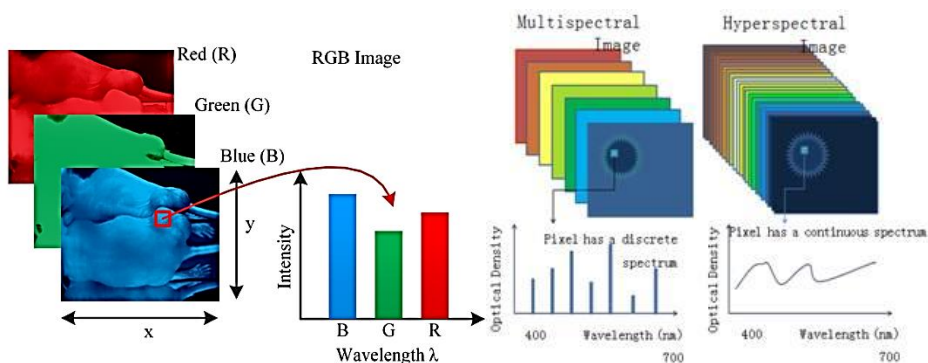
ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม (spectral reflectance) จะแสดงเป็นกราฟ สามารถใช้ค่าดังกล่าวระบุสีของวัตถุนั้นได้ โดยพิจารณาค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่น [9] ตามภาพที่ 2.5 แม้ว่าสภาวะแสงหรือแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไป ก็ยังสามารถผลิตสีซ้ำได้สีเหมือนเดิมด้วยค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีนั้น ต่างจากค่าสีในรูปแบบอื่นในกรณีที่มีการเปลี่ยนแหล่งแสง ซึ่งค่าสีที่ได้จะเปลี่ยนแปลงตามแหล่งแสงนั้น ๆ



ภาพที่ 2.5 กราฟการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของวัตถุสีแดง [10]

2.1.3 การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม

“ภาพมัลติสเปกตรัม” เป็นภาพที่ได้จากวิธีถ่ายภาพดิจิทัลที่บันทึกค่าการตอบสนองต่อแสงของวัตถุหรือภาพตามช่วงของความยาวคลื่น ตั้งแต่ 3 - 10 แบบ Wide bands หากบันทึกภาพด้วยจำนวนแบนด์ที่มากขึ้น แบบ Narrow bands จะเรียกว่า “ภาพไฮเปอร์สเปกตรัม” ข้อมูลที่บันทึกได้ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.6 [11]

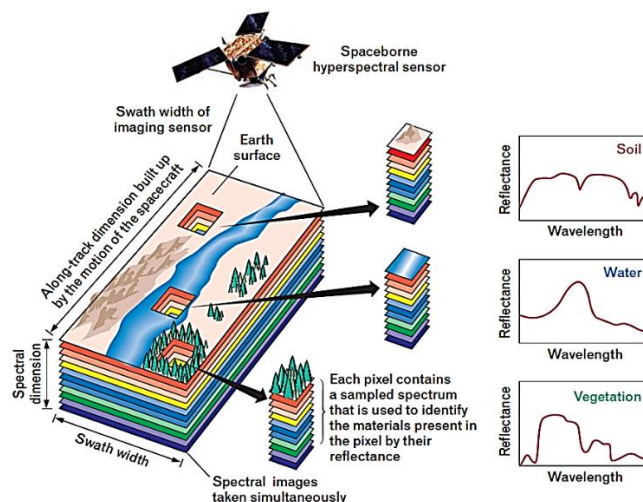


ภาพที่ 2.6 ภาพทั่วไปเปรียบเทียบกับภาพมัลติสเปกตรัมและภาพไฮเปอร์สเปกตรัม [12, 13]

การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัม แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

2.1.3.1 ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลมัลติสเปกตรัม

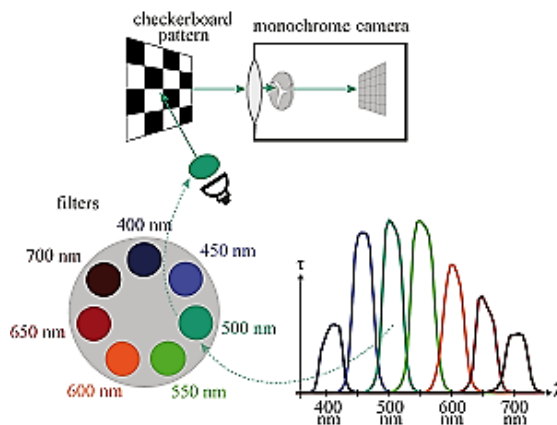
กล้องมัลติสเปกตรัม เป็นกล้องที่มีเซนเซอร์รับภาพตามช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 3 ชนิดขึ้นไป ส่วนใหญ่ติดตั้งบน ดาวเทียม (ภาพที่ 2.7) อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ใช้เพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์สภาพพื้นที่จากภาพถ่าย มีราคาที่สูง



ภาพที่ 2.7 การถ่ายภาพด้วยกล้องมัลติสเปกตรัมบนดาวเทียมและวิเคราะห์ผล [14]

2.1.3.2 ถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์

เป็นการถ่ายภาพด้วยเซนเซอร์รับภาพเพียงเซนเซอร์เดียว (monochrome) ผ่านแผ่นฟิลเตอร์กรองแสงการตอบสนองต่อแสงของวัตถุหรือภาพในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ภาพที่ได้แต่ละแชนแนลจะนำมารวมกันและวิเคราะห์ผล ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งเป็นภาพมัลติสเปกตรัม เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลมัลติสเปกตรัม



ภาพที่ 2.8 การถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียว [15]

2.1.3.3 สัญญาณรบกวนในภาพ

คำว่า “สัญญาณรบกวน” หมายถึง สัญญาณที่ไม่ต้องการ (Unwanted signal) หรือ สัญญาณรบกวนในภาพ (Image Noise) ทำให้เห็นเกิดความไม่สม่ำเสมอของความสว่างและสี [16] สามารถเกิดได้ในเซนเซอร์ แผงสแกนเนอร์ หรือ กล้องดิจิทัล หากมีค่ามากคุณภาพของภาพจะมีค่าลดลง ภาพที่มีรายละเอียดดีมีความเปรียบต่างสูง Noise จะไม่ส่งผลชัดเจน

สาเหตุเกิดจากจำนวนโฟตอนที่ตกลงในแต่ละพิกเซลแตกต่างกัน ความสามารถในการสร้างประจุของ Photodiode ที่ไม่เท่ากัน สัญญาณรบกวนในการส่งผ่านข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และความร้อนซึ่งจะทำให้เซนเซอร์สร้างอิเล็กตรอน แม้ไม่ถูกแสงก็ตาม

ลักษณะของ Noise แบ่งได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ Random noise สัญญาณรบกวนเป็นจุดพิกเซลสีขาวกระจายตัวแบบสุ่ม Luminance noise สัญญาณรบกวนเป็นกลุ่มพิกเซลที่มีระดับความสว่างที่แตกต่างกัน และ Chroma or Colors noise สัญญาณรบกวนที่เป็นจุดสี R,G,B กระจายตัวแบบสุ่ม ในการถ่ายภาพโดยทั่วไป สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละเซนแนลจะมีค่าไม่เท่ากัน

ปัจจัยที่มีผลต่อสัญญาณรบกวน ได้แก่ อุณหภูมิ การตั้งค่า ISO Speed ช่วงเวลาในการถ่ายภาพ ประสิทธิภาพในการรับแสงต่อหนึ่งพิกเซล และขนาดของพิกเซล

การลด Noise มีหลายวิธี ได้แก่ ลดอุณหภูมิ ปรับตั้ง ISO Speed ให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ปรับความเข้มของแสงสำหรับถ่ายภาพให้เพียงพอ เพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงต่อหนึ่งพิกเซล และเพิ่มขนาดพื้นที่รับแสงของพิกเซล[16]

2.1.3.4 Signal to Noise Ratio (SNR)

เป็นวิธีวิเคราะห์สัญญาณรบกวน (noise) วิธีหนึ่ง ซึ่งหาอัตราส่วนสัญญาณภาพต่อสัญญาณรบกวนโดยมีหน่วยวัดเป็นเดซิเบล (dB) คำนวณได้ตามสมการที่ 1.1 [17] และสามารถตรวจสอบค่า Signal to noise ratio (SNR_{dB}) ที่คำนวณกับคุณภาพของภาพที่ได้ตามตารางที่ 1.1

$$SNR_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\mu}{\sigma} \right) \quad \text{สมการที่ 1.1}$$

SNR_{dB} = Signal to noise ratio in decibels

P_{signal} = Wanted signal

P_{noise} = Unwanted background noise

μ = Mean of all pixels in image

σ = Standard deviation

ตารางที่ 1.1 ค่า Signal to noise ratio (SNR_{dB}) กับคุณภาพของภาพที่ได้ [18]

S/N Ratio dB	คุณภาพของภาพที่ได้
60 dB	คุณภาพดีเยี่ยม ไม่มีคลื่นรบกวนเลย
50 dB	คุณภาพดี ยังมีคลื่นรบกวนบ้างเล็กน้อย
40 dB	คุณภาพพอใช้ แต่เก็บรายละเอียดได้ไม่มากเท่าไรและอาจจะมีจุดสีขาวปรากฏอยู่ในภาพ
30 dB	คุณภาพไม่ดี มีคลื่นรบกวนเยอะมาก
20 dB	เป็นภาพที่ใช้การไม่ได้

2.1.3.5 Wiener filtering

เป็นวิธีการลดสัญญาณรบกวนในภาพแบบ Linear ชนิดหนึ่ง โดยหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปรวน (variance) รอบ ๆ พิกเซลในแต่ละพิกเซล ทำการประมาณค่าสัญญาณรบกวนเพื่อสร้างฟิลเตอร์ลดสัญญาณรบกวนนั้น คำนวณค่าตามสมการที่ 1.2 [19] หลังประมวลผลเสร็จจะทำให้ภาพที่ได้มีความเบลอมากขึ้นหรือความชัดลดลงตามฟิลเตอร์ที่สร้างขึ้น

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu) \quad \text{สมการที่ 1.2}$$

$b(n_1, n_2)$ = Image filtering with Wiener filter

μ = Mean of all pixels in image

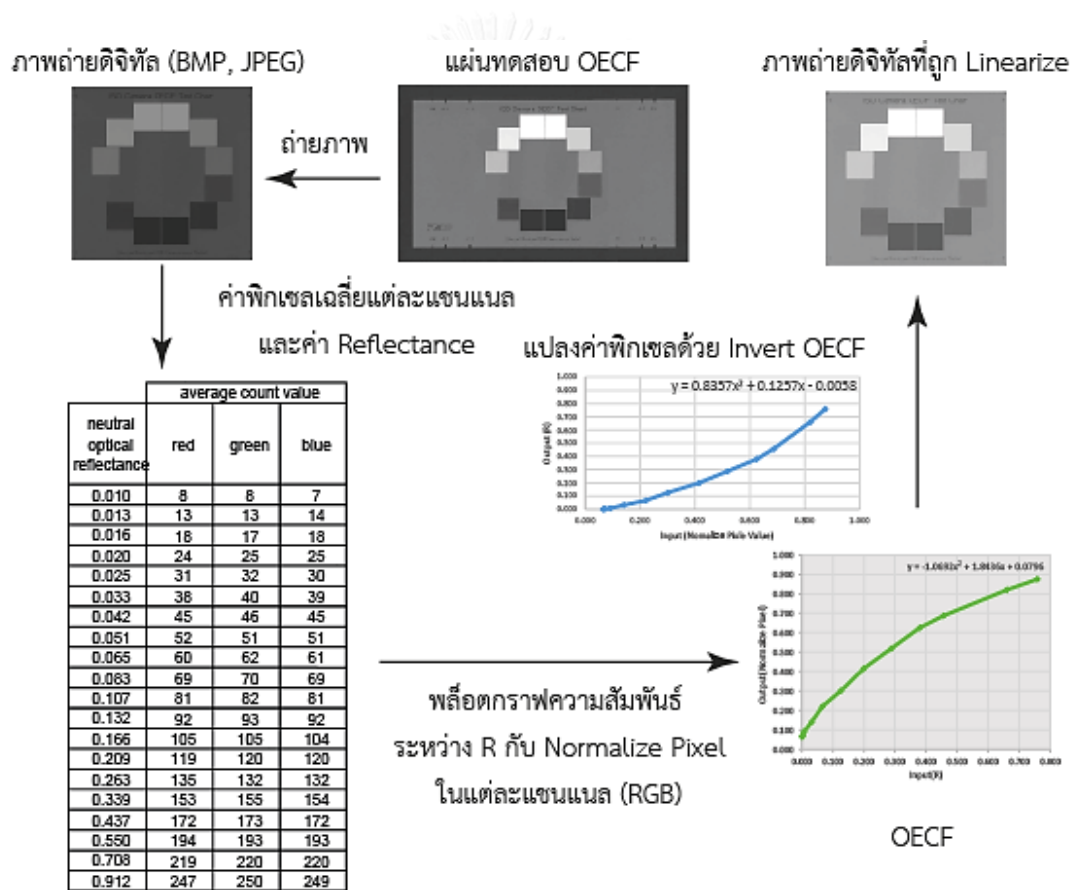
σ^2 = Variance around each pixel

v^2 = Noise variance

$a(n_1, n_2)$ = Image with additive noise

2.1.3.6 Opto-electronic conversion functions (OECF)

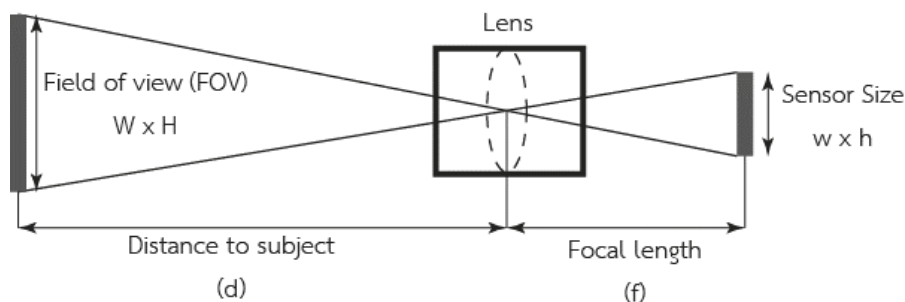
เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Input luminance กับ Digital output สำหรับการถ่ายภาพดิจิทัล วัดค่า Density หรือ Reflectance ของ 12 แผ่นสี Gray scale [20] ทำการถ่ายภาพแผ่นสีดังกล่าว นำค่าพิกเซลเฉลี่ยของภาพแผ่นสีแต่ละสีและค่า Reflectance ที่วัดได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์พร้อมแสดงสมการแนวโน้มแบบ Linear ในแต่ละแกนแนลเพื่อตรวจสอบ พล็อตกราฟความสัมพันธ์แบบ Invert พร้อมแสดงสมการแนวโน้ม สมการดังกล่าวจะใช้ปรับค่าพิกเซลของภาพที่ถ่ายได้จากกล้องดิจิทัลให้มีความสัมพันธ์กับค่า Reflectance ได้เป็นภาพที่ถูก Linearize ซึ่งมีขั้นตอนตามภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนการแปลงค่าพิกเซลของภาพด้วย Invert OECF

2.1.3.7 กำลังขยายของกล้องดิจิทัล (FOV)

Field of view (FOV) หรือ กำลังขยายของเลนส์ (Magnification) เป็นขนาดพื้นที่มองภาพและบันทึกภาพผ่านเลนส์ของเซนเซอร์รับภาพกล้องดิจิทัล ซึ่งขนาดของเซนเซอร์ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ ระยะวัตถุ ที่แสดงตามภาพที่ 2.10 มีผลต่อค่า FOV คำนวณได้ตามสมการที่ 1.3 [21]



ภาพที่ 2.10 ตัวแปรในการคำนวณขอบเขตการบันทึกภาพของเซนเซอร์

$$M = \frac{w}{W} = \frac{h}{H} = \frac{f}{d} \text{ สมการที่ 1.3}$$

M = Magnification

w = Wide of camera sensor

h = Height of camera sensor

W = Wide of Field of view (FOV)

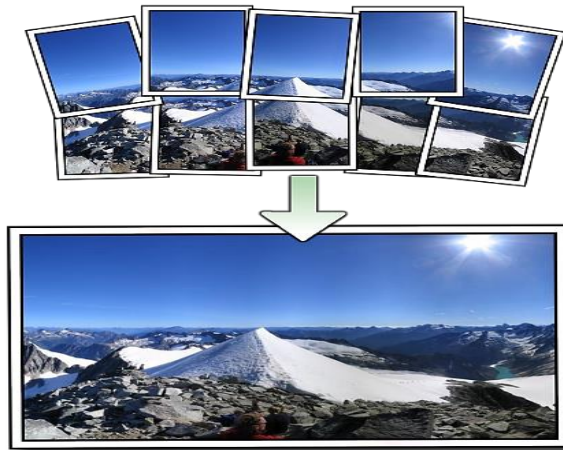
H = Height of Field of view (FOV)

d = Distance to subject

f = Focal length of camera lens

2.1.3.8 การต่อภาพ (Image stitching)

เป็นการรวมภาพถ่ายตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไป ให้เป็นภาพใหญ่ ด้วยการหาจุดที่เหมือนกันของภาพและทำการซ้อนทับภาพแต่ละภาพรวมเข้าด้วยกัน รูปแบบการต่อภาพ 4 รูปแบบที่นิยมใช้ได้แก่ Rectilinear ต่อภาพใน 2 ทิศทาง แนวตั้งและแนวนอน (ตัวอย่างตามภาพที่ 2.11) Cylindrical ต่อภาพในแนวนอน 360 องศา Spherical ต่อภาพในแนวนอน 360 องศา และแนวตั้ง 180 องศา Panini ต่อภาพแบบแผนที่รูปทรงกลม โปรแกรมที่นิยมใช้ในการต่อภาพ เช่น Hugin Panorama Photo Stitcher, AutoStitch และ Microsoft ICE เป็นต้น



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างการต่อภาพแบบ Rectilinear [22]

2.1.4 วิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์

จุดประสงค์ของการประมาณค่าแบบวีเนอร์ คือ ประมาณค่าข้อมูล Low dimensional ไปเป็น High dimensional ตัวอย่างเช่น ประมาณค่าการตอบสนองของกล้องที่ถ่ายผ่าน 3 ฟิลเตอร์ ไปเป็น ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม [23] การประมาณค่าแบบวีเนอร์เป็นวิธีแบบ Linear

การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ r_{est} คำนวณตามสมการที่ 1.4 [23]

$$r_{est} = Gv \quad \text{สมการที่ 1.4}$$

G = Estimation matrix

v = Response of a digital camera $v_i(x, y)$

คำนวณค่า Digital output (v) ในพิกัด (x, y) ผ่านแผ่นฟิลเตอร์ i ฟิลเตอร์ ตามสมการที่ 1.5

$$v_i(x, y) = \int t_i(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) r(x, y; \lambda) d\lambda, i = 1, \dots, m \quad \text{สมการที่ 1.5}$$

$t_i(\lambda)$ = Spectral transmission of the i^{th} filter

$E(\lambda)$ = Spectral power distribution of the illuminant

$S(\lambda)$ = Spectral sensitivity of the camera

$r(x, y; \lambda)$ = Spectral reflectance in coordinates (x, y)

เมทริกซ์ประมาณค่า G สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1.6

$$G = R_{rv} R_{vv}^{-1} \quad \text{สมการที่ 1.6}$$

R_{rv} = Cross-correlation matrix between vectors r and v

R_{vv} = Auto-correlation matrix of vector v

2.1.4.1 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE)

ค่า **RMSE** ใช้วัดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าข้อมูลเทียบกับค่าข้อมูลที่วัดได้จริง ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ตามสมการที่ 1.7 [24]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{สมการที่ 1.7}$$

y_i = Predictions data at i^{th}

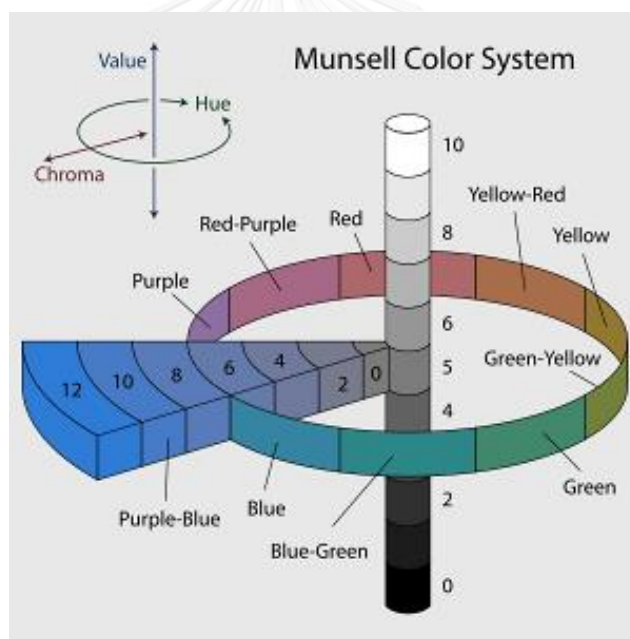
\hat{y}_i = Measurement data at i^{th}

n = Population

2.1.5 ระบบสี

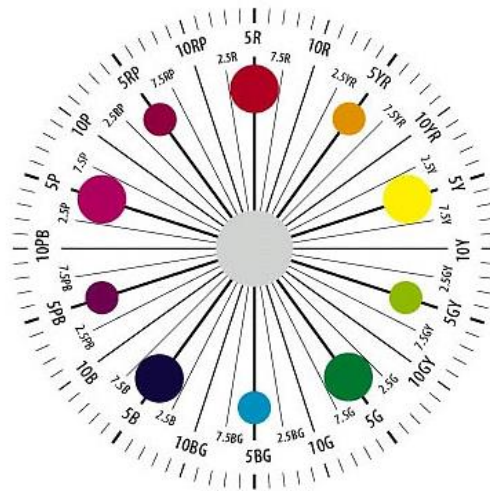
2.1.5.1 ระบบสี Munsell

ระบบสีแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Hue คือสีล้วน เฉดสี หรือ เนื้อสีแท้ Value คือ ความสว่างของสี (lightness) Chroma คือค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ของสี (purity) หรือ ความอึมตัวของสี (saturation) สีหลัก (principal hues) ได้แก่ แดง (Red) เหลือง (Yellow) เขียว (Green) ฟ้า (Blue) ม่วง (Purple) และสีที่เกิดจากการผสมสีจากวงจรสีหนึ่งไปอีกสีหนึ่ง เรียกว่า สีที่ได้จากการผสม (intermediate hues) ชื่อย่อเขียนได้ตามลำดับดังนี้ R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP รวมทั้งหมด 10 สี แบ่งสัดส่วนตาม Chroma ตามลำดับดังนี้ /2, /4, /6, /8, /10 /12 และ /14 ส่วนสีที่มีเพียงระดับความสว่าง หรือ Achromatic Color แบ่งเป็น 10 ระดับ ดังนี้ 0/, 1/, 2/, 3/, 4/, 5/, 6/, 7/, 8/ และ 9/ ตามภาพที่ 2.12 และ 2.13

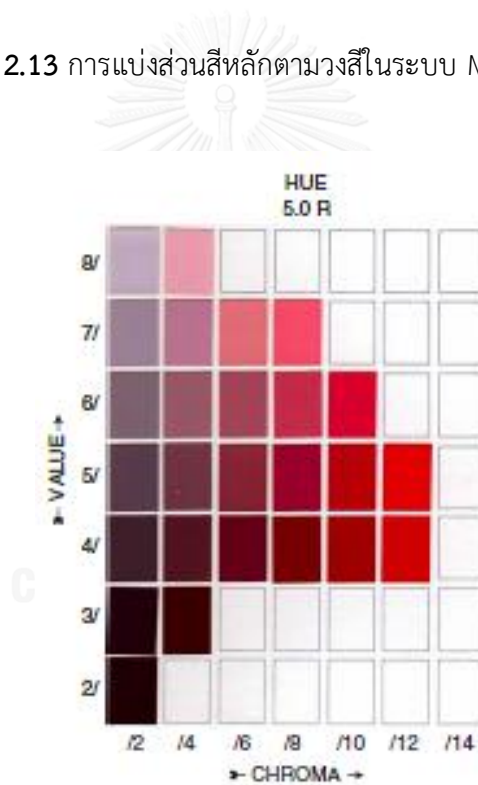


ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงสีหลักตามวงสีในระบบ Munsell [25]

Munsell Book of Color เป็นหนังสือแผ่นสี จำนวน 41 หน้า แต่ละหน้ากว้าง 17 มิลลิเมตร และยาว 20 มิลลิเมตร [26] Hue แบ่งเป็นส่วน ตามลำดับดังนี้ 2.5, 5, 7.5 และ 10 ตัวอย่างตามภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 การแบ่งส่วนสีหลักตามวงสีในระบบ Munsell [27]

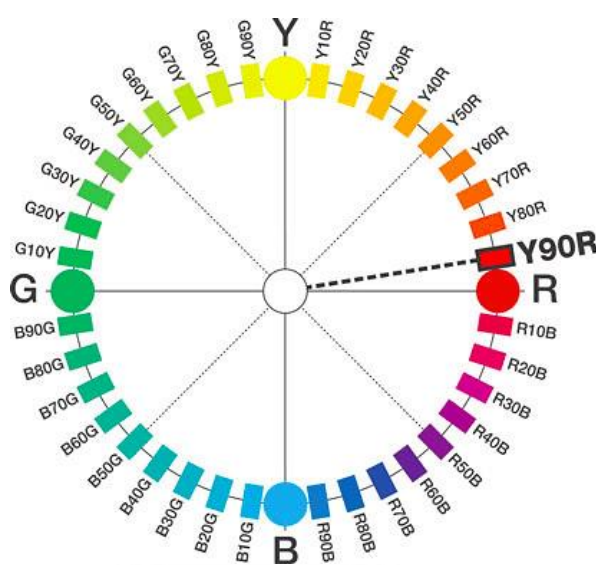


ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างแผ่นสี Hue 5.0R ใน Munsell Book Color [26]

2.1.5.2 ระบบสี NCS

The Natural Colour System (NCS) เริ่มกำหนดใช้โดยสถาบันวิจัยสีแห่ง สแกนดิเนเวีย เป็นระบบสี สำหรับการออกแบบตกแต่งภายใน, ตกแต่งและภาพวาด เป็นต้น วงจรสี เอ็นซีเอส (The NCS Colour Circle) เป็น วงจรที่เกิดจากแนวตัดขวางพิสัยในแนวราบ ที่กำหนดให้ แมสีหลักทั้ง 4 สี คือ สีเหลือง สีแดง สีนํ้าเงิน และสีเขียว วางตัวกันในสี่ทิศ โดยวางตำแหน่งสีเหลืองไว้

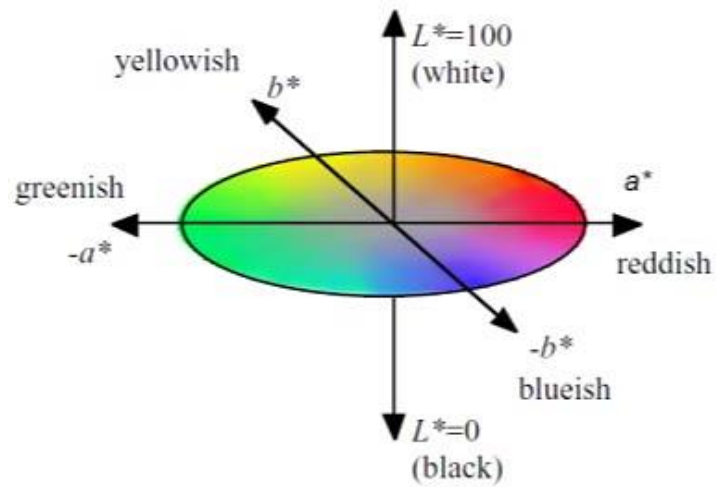
ในตำแหน่งของทิศเหนือ สีแดงในตำแหน่งของทิศตะวันออก สีน้ำเงินในตำแหน่งของทิศใต้ และสีเขียวในตำแหน่งของทิศตะวันตกและมีการแบ่งสีจากทิศหลักออกเป็น 10 ช่วง (นับช่วงที่ถึงตัวสีหลักถัดไปด้วย) และใช้หลักการไล่สีเริ่มต้นจากทิศเหนือในลักษณะตามเข็มนาฬิกา ดังนั้น จะมีการอ่านค่าสีเริ่มจาก สีเหลืองไปสีแดง สีแดงไปสีน้ำเงิน สีน้ำเงินไป สีเขียว และสีเขียวไปสีเหลือง เช่น ค่าสีเป็น Y90R จะหมายถึง สีตัวแรกคือ Y คือสีเหลืองที่มีส่วนผสมในสัดส่วนของสีตัวหลังคือ R ซึ่งหมายถึงสีแดง 90 ส่วน ทำให้สีเหลืองเหลือแค่ 10 ส่วน ดังนั้นค่าสีนี้จึงเป็นสีที่มีเนื้อสี (hue) ค่อนไปทางสีแดงมาก คือเป็นสีแดงส้มที่เกือบจะเป็นสีแดง เป็นต้น ตามภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 วงกลมสี NCS [28]

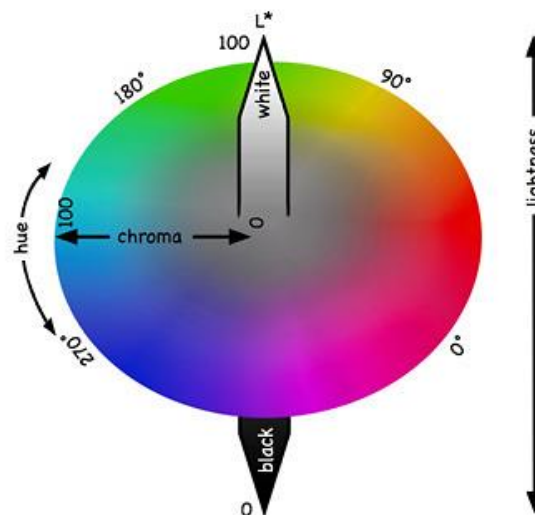
2.1.5.3 ระบบสี CIELAB

มีการนำเสนอในปี ค.ศ.1976 โดยองค์กร CIE (Commission International de l'Eclairage หรือ International Commission on Illumination) ซึ่งเป็นองค์กรที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสีในโลก ระบบสี CIELAB เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ มีแกน L^* บ่งบอกถึงค่าความสว่าง (lightness) ของสี มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 และแกน a^* บ่งบอกถึงสีแดงและสีเขียว (Redness/Greenness) ค่าบวกแสดงความเป็นสีแดง และค่าลบแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนแกน b^* บ่งบอกถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน (Yellowness/Blueness) ค่าบวกบอกความเป็นสีเหลือง และค่าลบบอกความเป็นสีน้ำเงิน ตามภาพที่ 2.16 นอกจากนี้ระบบสีนี้ยังเป็นสีที่ไม่อิงกับอุปกรณ์ใด ๆ (device independent) เพราะเป็นระบบสีที่อ้างอิงจากการมองเห็นของมนุษย์เป็นหลัก



ภาพที่ 2.16 ปริภูมิสี CIELAB [29]

การแสดงค่าสีของระบบ CIELAB โดยปกติจะแสดงในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) ซึ่งเป็นค่า L^* , a^* , b^* แต่ทั้งนี้ยังสามารถแสดงค่าสีในระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) ได้อีกด้วย เรียกการแสดงค่าสีในรูปแบบนี้ว่า CIELCH ซึ่งประกอบด้วยแกน L^* ที่เหมือนกับ CIELAB แต่การแสดงพิกัดตำแหน่งสีใช้ค่าความอิ่มตัวสี (chroma) กับองศาของสีสัน (hue angle) แทนค่า a^* และ b^* โดยสามารถแสดงได้ในรูปของ L^* , C^*_{ab} , h_{ab} [30] ตามภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ปริภูมิสี CIELCH [31]

Chroma คือ คุณลักษณะของสีที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงระดับความห่างของสีจากสีที่เป็นกลาง (neutral) ในระดับความสว่างเดียวกัน เป็นค่าที่แสดงความของสดสี (colourfulness) ซึ่งค่าสูงสุดของ chroma จะแตกต่างกันไปตามสีเส้นและค่าความสว่างของสี ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า chroma (C^*_{ab}) จากค่า a^* และ b^* [30] ตามสมการที่ 1.8

$$\text{Chroma}(C^*_{ab}) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{สมการที่ 1.8}$$

Hue คือ คุณลักษณะสีที่ใช้บ่งชี้ถึงสีของสีนั้นๆ ซึ่งในกรณีของระบบสี CIELAB จะใช้ค่า a^* และ b^* ในการบ่งบอกสีเส้น ส่วนในรูปแบบ CIELCH จะใช้ค่า hue angle (h°) ในการบ่งบอกสีเส้นแทน โดยเริ่มจาก 0 องศา (สีแดง) ไปยัง 90 องศา (สีเหลือง) 180 องศา (สีเขียว) 270 องศา (สีน้ำเงิน) และกลับมาถึง 0 องศา หรือ 360 องศา อีกครั้ง [30] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1.9

$$\text{Hue angle}(h^\circ) = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad \text{สมการที่ 1.9}$$

2.1.6 การแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมเป็นสีในระบบสี CIELAB

เริ่มจากนำค่าการกระจายพลังงานในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของแหล่งแสงหรือ $S(\lambda)$ ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีตัวอย่างหรือ $R(\lambda)$ ค่า Color-matching functions (2° หรือ 10° Standard Observer) ที่เลือกใช้หรือ $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ไปคำนวณค่า XYZ ตามสมการที่ 1.10 โดยที่คำนวณค่า K ตามสมการที่ 1.11 [32]

$$\left. \begin{aligned} X &= K \int_{400}^{700} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \\ Y &= K \int_{400}^{700} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int_{400}^{700} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad \text{สมการที่ 1.10}$$

$$K = \frac{100}{\int_{400}^{700} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad \text{สมการที่ 1.11}$$

$S(\lambda)$ = Relative spectral power distribution of the illuminant

$\bar{x}(\lambda), \bar{x}_{10}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{y}_{10}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{z}_{10}(\lambda)$ = Color-matching functions

(2° หรือ 10° Standard Observer)

$R(\lambda)$ = Spectral reflectance of the specimen

K = A suitable chosen constant

สำหรับ Perfect diffuser มีค่า $R(\lambda)$ เท่ากับ 1 ทุกช่วงของความยาวคลื่น ค่า Color-matching functions ที่ 2° Standard observer หรือ CIE 1931 และที่ 10° Standard observer หรือ CIE 1964

เมื่อได้ค่า XYZ แล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าสีในระบบ CIELAB ด้วยสมการดังต่อไปนี้ [32]

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \\ b^* &= 200\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \right\} \text{สมการที่ 1.12}$$

กรณีนี้ที่ $\left(\frac{X}{X_n}\right), \left(\frac{Y}{Y_n}\right), \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.008856$

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 903.3\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \\ a^* &= 500 \left\{ 7.787 \left[\left(\frac{X}{X_n}\right) + \left(\frac{16}{116}\right) \right] - 7.787 \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \left(\frac{16}{116}\right) \right] \right\} \\ b^* &= 500 \left\{ 7.787 \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \left(\frac{16}{116}\right) \right] - 7.787 \left[\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \left(\frac{16}{116}\right) \right] \right\} \end{aligned} \right\} \text{สมการที่ 1.13}$$

กรณีนี้ที่ $\left(\frac{X}{X_n}\right), \left(\frac{Y}{Y_n}\right), \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq 0.008856$

โดยที่ X, Y และ Z เป็นค่า tristimulus ที่ 2° or 10° standard observer ของสีตัวอย่าง และ X_n, Y_n และ Z_n เป็นค่า tristimulus ที่ 2° or 10° standard observer ของสีขาวอ้างอิง (reference white)

2.1.7 CIEDE2000 Color Difference Formula

เป็นสูตรการคำนวณค่าความแตกต่างสีของสีตัวอย่างกับสีอ้างอิง ตามสมการที่ 1.14 [33]

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad \text{สมการที่ 1.14}$$

โดยที่

$$\bar{L}' = \frac{(L_1 + L_2)}{2} \quad \text{สมการที่ 1.15}$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad \text{สมการที่ 1.16}$$

$$C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad \text{สมการที่ 1.16}$$

$$\bar{C} = \frac{\sqrt{C_1 + C_2}}{2} \quad \text{สมการที่ 1.17}$$

$$G = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25}}\right)}{2} \quad \text{สมการที่ 1.18}$$

$$a_1' = a_1(1+G) \quad \text{สมการที่ 1.19}$$

$$a_2' = a_2(1+G) \quad \text{สมการที่ 1.19}$$

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \quad \text{สมการที่ 1.20}$$

$$C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2} \quad \text{สมการที่ 1.20}$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2} \quad \text{สมการที่ 1.21}$$

$$h_1' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_1 / a_1') & : \tan^{-1}(b_1 / a_1') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_1 / a_1') + 360^\circ & : \tan^{-1}(b_1 / a_1') < 0 \end{cases} \quad \text{สมการที่ 1.22}$$

$$h_2' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_2 / a_2') & : \tan^{-1}(b_2 / a_2') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_2 / a_2') + 360^\circ & : \tan^{-1}(b_2 / a_2') < 0 \end{cases} \quad \text{สมการที่ 1.23}$$

$$\bar{H}' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360^\circ) / 2 & : |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ (h_1' + h_2') / 2 & : |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases} \quad \text{สมการที่ 1.24}$$

สมการที่ 1.25

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{H}') + 0.32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ)$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_1' - h_2' & : |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ h_1' - h_2' + 360^\circ & : |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' \leq h_1' \\ h_1' - h_2' - 360^\circ & : |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' > h_1' \end{cases} \quad \text{สมการที่ 1.26}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta L' &= L_2 - L_1 \\ \Delta C' &= C_2 - C_1 \\ \Delta H' &= 2\sqrt{C_1 C_2} \sin(\Delta h' / 2) \end{aligned} \right\} \quad \text{สมการที่ 1.27}$$

$$\left. \begin{aligned} S_L &= 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \\ S_C &= 1 + 0.045\bar{C}' \\ S_H &= 1 + 0.015\bar{C}'T \end{aligned} \right\} \quad \text{สมการที่ 1.28}$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25} \right)^2 \right\} \quad \text{สมการที่ 1.29}$$

$$\left. \begin{aligned} R_C &= 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^{17}}{\bar{C}'^{17} + 25^{17}}} \\ R_T &= -R_C \sin(2\Delta\theta) \end{aligned} \right\} \quad \text{สมการที่ 1.30}$$

$$\left. \begin{aligned} K_L &= 1 && \text{default} \\ K_C &= 1 && \text{default} \\ K_H &= 1 && \text{default} \end{aligned} \right\} \quad \text{สมการที่ 1.31}$$

2.1.7.1 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการกระจายของข้อมูลที่สำคัญทางสถิติ ใช้บอกถึงการกระจายของข้อมูลได้ดีกว่าค่าพิสัย และค่าส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย แทนด้วยอักษรกรีก σ ถ้ามีค่ามาก หมายความว่าข้อมูลชุดนั้นมีการกระจายกันมาก แต่ถ้ามีค่าน้อยหมายความว่าข้อมูลชุดนั้นเป็นข้อมูลที่เกาะกลุ่มกันอยู่ เป็นข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ตามสมการที่ 1.32

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{สมการที่ 1.32}$$

x_i = Data at i^{th}

\bar{x} = Mean of data

n = Population

2.1.7.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Way ANOVA)

เป็นการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหรือปัจจัยเพียงตัวเดียว ซึ่งวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยพิจารณาจากปัจจัยที่มีผลต่อข้อมูลเพียงปัจจัยเดียว มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลตั้งแต่ 3 กลุ่มข้อมูลขึ้นไป โดยแต่ละกลุ่มข้อมูลควรมีสมาชิกที่เท่ากัน โปรแกรมที่นิยมใช้คำนวณและวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว (One-Way ANOVA) คือ โปรแกรม SPSS [34]

ตัวอย่าง เช่น นักวิจัยต้องการเปรียบเทียบเจตคติทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนที่มีผู้ปกครองประกอบอาชีพต่างกันคือ อาชีพรับราชการ อาชีพรับจ้าง และ อาชีพทำนา ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ตัวแปรอิสระ คือ อาชีพของผู้ปกครอง แบ่งเป็น 3 อาชีพ

ตัวแปรตาม คือ เจตคติทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียน

สมมติฐานทางการวิจัย

H_0 ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มเท่ากัน

H_1 มีอย่างน้อย 2 กลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน

สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i \neq j$$

ค่า F คำนวณ ตามสมการดังนี้ [34]

$$F = \frac{MStrt}{MSE} \quad \text{สมการที่ 1.33}$$

$MStrt$ = Mean square for treatment

MSE = Mean square for error

การตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธ H_0 จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วน F ที่คำนวณได้เทียบกับอัตราส่วนจากตารางมาตรฐาน โดยที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อค่า F ที่คำนวณได้ มากกว่าค่า F ในตาราง หรือค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานของ F (Sig.) ที่คำนวณได้น้อยกว่า α หรือระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด จากตัวอย่างมีค่า .05

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake และ Vladimir Bochko [3] ศึกษาวิธีการประมาณค่าการสะท้อนแสงจากภาพถ่ายมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณค่าวิธีต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรม ภาพถ่ายผ่านกล้องขาว-ดำผ่านฟิลเตอร์เจลละตินกรองแสงตามช่วงความยาวคลื่น ทั้งหมด 5 แผ่น ได้แก่ BPB42, SP-9, BPB50, BPB55 และ BPB60 โดยมีแผ่นฟิลเตอร์ที่ตัดแสงในช่วงอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ตบังหน้าเลนส์ ใช้หลอด illuminant D65 เป็นแหล่งแสง โดยทดสอบทั้งหมด ดังนี้ Based on PCA, Wiener Estimation, Multiple Regression Analysis เป็นวิธีแบบดั้งเดิม และ Based on Regressive PCA, Piece-Wise Linear Wiener Estimation, Regression Analysis เป็นวิธีแบบ Machine Learning ซึ่งการประมาณค่าทั้ง 2 วิธี จะประกอบด้วยวิธีแบบ linear และ nonlinear ผลการทดลองพบว่า วิธีดั้งเดิมแบบ linear ที่ประมาณค่าได้ดีที่สุดคือ วิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ (Wiener Estimation) ส่วนวิธีการเรียนรู้โดยคอมพิวเตอร์ คือ วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ซึ่งมีค่า RMSE และ ΔE_{94} ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นในรูปแบบการประมาณเดียวกัน

Yuri Murakami, Takashi Obi, Masahiro Yamaguchi, Nagaaki Ohyama และ Yasuhiro Komiya [35] ทดสอบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมจากภาพมัลติแบนด์โดยใช้แผ่นสีมาตรฐาน Macbeth colors checker ด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ซึ่งจำลองการทดลองด้วยคอมพิวเตอร์ ฟิสิกส์ที่ใช้ทั้งหมด 9 แบนด์ ถูกจำลองค่าการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง A และ F2 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานจากผู้ผลิต รวมทั้งวัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของ Macbeth colors checker จำนวน 18 สี ใช้เป็นฐานข้อมูลสี สำหรับประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมจากภาพมัลติสเปกตรัมภายใต้ 2 แหล่งแสง จากสีทดสอบทั้งหมด 160 สี พบว่าการจำลองการถ่ายภาพ 3 แบนด์ นั้นให้ค่าความคลาดเคลื่อน NMSE สูงที่สุด ส่วนภาพ 9 แบนด์ มีผลที่ต่ำที่สุด เช่นเดียวกับค่าความแตกต่างของสี



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา Lenovo laptop model Y410P

- CPU: Intel Core i7-4700MQ (2.40 GHz)
- GPU: NVIDIA GeForce GT 750M (2 GB GDDR5)
- RAM: 8 GB (DDR3)
- HDD: 1 TB (5400 RPM)
- Display: 14 inch WXGA (1366x768) LED
- OS: Windows 8 Pro (64 bit)

3.1.2 กล้องถ่ายภาพดิจิทัลขาว-ดำ Nikon model DS-2MBWc

- ขนาดของ CCD Sensor: 1/1.8 in. high-density CCD and total number of pixels 2.11 million. (Effective 1.98 million)
- Recordable pixels: 1600 x 1200 pixels, 800 x 600 pixels, 400 x 300 pixels. (ความละเอียดที่ใช้งานที่ 1600 x 1200 พิกเซล)
- CCD cooling device: Ambient temperature -20°
- Sensitivity: Equivalent to ISO350 (Can be varied ISO 160-6400)
- A/D conversion: 12-bit
- Live display mode (DS-L2): 1600 x 1200 (max. 15 fps), 800 x 600 (max. 20 fps), 800 x 560 (max. 30 fps), display reduced or enlarged to SXGA/XGA (เลือกโหมดใช้งานที่ 800 x 560 พิกเซล, 30 fps)
- Lens mount: C-mount
- Lens type: Cosmicar standard len 25 mm, f1.4

- Exposure time: 1/1000 to 600 sec
- ขนาดของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว: 91.0 (W) x 76.0 (D) x 41.0 (H) มิลลิเมตร
- น้ำหนักกล้อง: 290 กรัม.
- ความยาวสายสัญญาณที่ต่อกับชุดควบคุม: 3 เมตร

3.1.2 ชุดควบคุมกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว Nikon model DS-L2

- Exposure control: Program AE, Shutter-priority AE, Focus AE, Manual with AE lock function. (เลือกโหมดใช้งานที่ Manual with AE lock function)
- Exposure correction: Correction range: ± 2.0 , Step: 1/3
- Interval shooting: 10 sec. - 6 hr. intervals
- Exposure metering: Average metering, Peak hold metering
- Storage format BMP, JPEG (4-step compression)
- Interface: USB device port x 1 (Mass Storage Class support) and USB host port x 2 (USB mouse, USB memory stick, USB keyboard, microscope connection)
- Power supply: AC 100-240 V, 50/60 Hz
- Power consumption: 70 VA.
- ขนาดชุดควบคุม: 230 (W) x 64.5 (D) x 200 (H) มิลลิเมตร.
- น้ำหนักชุดควบคุม: Approx. 1400 กรัม. / AC Adapter: approx. 350 กรัม.
- LCD monitor: 8.4-in. TFT color LCD XGA (1024 x 768, 60 Hz.)
- Storage media: Compact flash card (Type I, Type II), USB memory stick, Microdrive.
- System composition: AC adapter, Power cord, USB memory stick 128 MB and Mouse.
- Memory card: Kingston compact flash card 1 GB.

3.1.3 ขาดังกล้อง Vertex สำหรับติดตั้งกล้องถ่ายภาพดิจิทัลขาว-ดำ

- ขาดังกล้อง model: Pro 2 DX
- หัวบอล model: BH-05N
- ปรับได้สูงสุด: 169.4 เซนติเมตร
- ปรับได้ต่ำสุด: 52.4 เซนติเมตร

3.1.4 ขาดังกล้อง Vertex สำหรับติดตั้งกล้องควบคุมแสง

- ขาดังกล้อง model: V8400
- ปรับได้สูงสุด: 160 เซนติเมตร
- ปรับได้ต่ำสุด: 52.5 เซนติเมตร
- หัวปรับหมุนได้ 360 องศา

3.1.5 กล้องควบคุมแสง

- เป็นอุปกรณ์ที่ผู้วิจัยประดิษฐ์ขึ้นเอง เพื่อควบคุมพื้นที่บันทึกภาพและแสงในการถ่ายภาพ เมื่อถอดเก็บมีน้ำหนัก 1.4 กิโลกรัม
- วัสดุที่ใช้: พลาสติกสีดำทึบแสงปิดทับด้านในด้วยกระดาษผิวเรียบด้านโดยส่วนฐานที่ทำจากแผ่นอะคริลิกปิดทับด้านในด้วยกระดาษผิวเรียบด้านเช่นกัน
- ใช้ผ้าคลุมกำมะหยี่ คลุมอุปกรณ์เพื่อชดลดแสงรบกวนจากภายนอก

3.1.6 กล้องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพ

- วัสดุที่ใช้ทำกล้อง: แผ่นอะคริลิกสีดำปิดทับด้วยกระดาษผิวเรียบด้าน
- เจาะแผ่นด้านหน้าและหลังเป็นรูวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72 มิลลิเมตร

3.1.7 ฟิลเตอร์เจลละตินของ Fuji Film ที่เลือกกรองแสงเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ

- ฟิลเตอร์ BPB42 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
- ฟิลเตอร์ BPB45 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร
- ฟิลเตอร์ BPB50 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

- ฟิลเตอร์ BPB55 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร
- ฟิลเตอร์ BPB60 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

3.1.8 ฟิลเตอร์กรองแสงในช่วงอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ตของ Rocolax

- ขนาดฟิลเตอร์: 77 มิลลิเมตร

3.1.9 สเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ของ Konica Minolta รุ่น CS-1000A

- Wavelength range: 380 to 780 นาโนเมตร
- Spectral bandwidth: 5 นาโนเมตร
- Display wavelength bandwidth: 1 นาโนเมตร
- Data memory: Measurement data : 30 sets, Target data : 20 sets
- Minimum measuring distance: 450 มิลลิเมตร (standard lens)

ในงานวิจัยนี้วัดที่ระยะ 800 มิลลิเมตร

- Minimum measuring area: 7.9 มิลลิเมตร (standard lens)
- Wavelength resolution: 0.9 นาโนเมตร/พิกเซล
- Luminance accuracy: $\pm 2\%$, ± 1 digit
- Chromaticity accuracy: $x \pm 0.0015$, $y \pm 0.001$
- Luminance range: 1 – 8,000 แคนเดลาต่อตารางเมตร
- Luminance repeatability: $\pm 0.1\%$, ± 1 digit
- Chromaticity xy repeatability: ± 0.0002
- Polarization error: $< 5\%$ (400-780 นาโนเมตร)
- Data management software: CS-S10W Professional
- Software
- แผ่น Reference white

3.1.10 Illuminance Spectrophotometer Model CL-500A

- Wavelength range: 380 to 780 นาโนเมตร

- Output wavelength : 1 นาโนเมตร
- Accuracy : E_v (Illuminance) ± 2 %
- Repeatability : E_v (Illuminance) ± 5 %
- Display mode : XYZ, $X_{10}Y_{10}Z_{10}$, E_{vxy} , $E_{vu'v'}$

3.1.11 แหล่งแสงประกอบกับโคมช่วยกระจายแสงพร้อมขาตั้ง

- แหล่งแสง: หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ Model TL-D 18W/865 1SL จำนวน 2 หลอด
- Lamp Wattage: 18 วัตต์
- Color Designation: Cool Daylight
- Color Temperature: 6500 เคลวิน
- Luminous Flux: 1275 ลูเมน
- Color Rendering Index: 80 Ra8
- Life to 10% failures EM: 10000 ชั่วโมง

3.1.12 ชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า

- อุปกรณ์ควบคุมไฟ: คัทเออร์หลัก 1 ตัว, บัลลาสต์ 18 วัตต์ 2 ตัว, สวิตช์ไฟ 2 ตัว, ปลั๊กไฟ 1 ตัว, ภาควัดไฟเป็นปลั๊กตัวเมีย 2 ตัว แยกสีระหว่างโคมไฟฝังฝ้าและขา

3.1.13 ตู้แสงประดิษฐ์

- แหล่งแสง: เป็นแหล่งแสงชนิดเดียวกับหัวข้อ 3.1.11

3.1.14 โปรแกรม MATLAB R2012a

3.1.15 โปรแกรม Adobe Photoshop CS6

3.1.16 โปรแกรม Image Composite Editor

3.1.17 โปรแกรม PS Autoclick

3.1.18 โปรแกรม Digital Curve Tracer

3.1.19 โปรแกรม SPSS

3.1.20 โปรแกรม Microsoft Office Excel 2013

- 3.1.21 โปรแกรม Microsoft Office Word 2013
- 3.1.22 แอปพลิเคชัน Angle Meter for iOS
- 3.1.23 แอปพลิเคชัน Level for iOS
- 3.1.24 โทรศัพท์เคลื่อนที่ iPhone รุ่น 4S
- 3.1.25 Munsell Book of Colors (Matte) จำนวน 1300 สี 40 หน้า
- 3.1.26 แผ่นสี NCS (คัดเฉพาะสีที่มีชื่อในงานวิจัยสีไทย [36])
- 3.1.27 แผ่นตรวจสอบสี Xrite Colors Checker DC และ Passport
- 3.1.28 ตลับเมตร

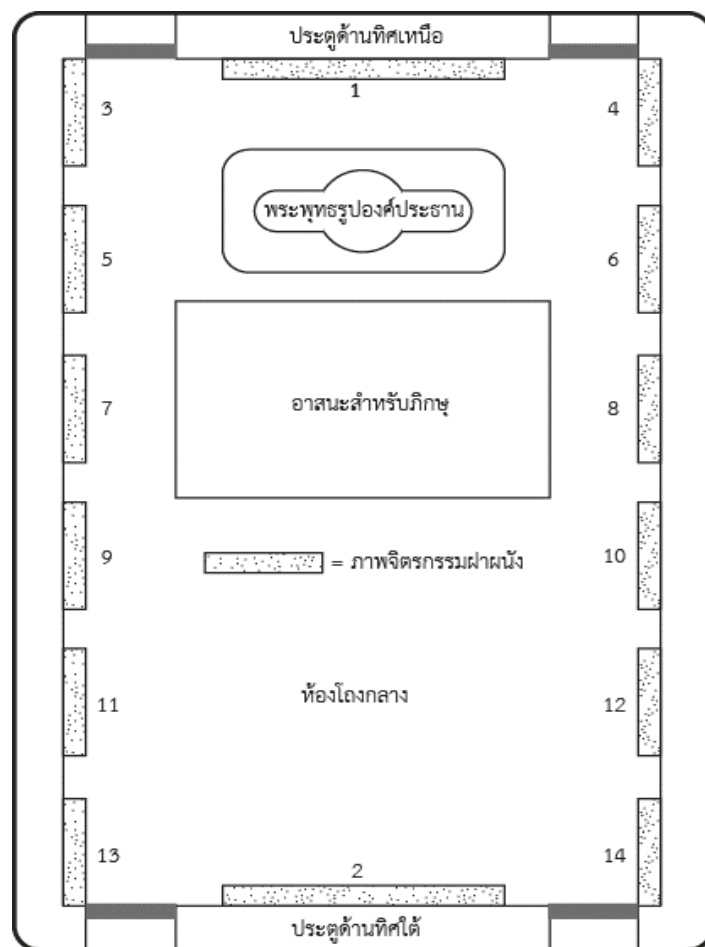
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีในจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัม ซึ่งถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียวผ่านฟิลเตอร์และนำไฟล์ภาพไปประมวลผลเพื่อประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น สี่ส่วนจริงในการทำวิจัย ประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับการวิจัย วัดค่ากระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง วัดค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องดิจิทัล วัดค่าส่องผ่านในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของฟิลเตอร์ วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell และ NCS ทดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียวและอุปกรณ์วิจัย ทดสอบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนัง ถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนัง ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ของสีบนจิตรกรรมฝาผนัง ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 สี่ส่วนจริงในการทำวิจัย

วัดสระเกศราชวรมหาวิหารเป็นสถานที่ถ่ายภาพและวัดค่าสีในจิตรกรรมฝาผนังไทย ซึ่งภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยนั้นจะอยู่บนฝาผนังของพระอุโบสถ เหตุผลที่เลือกภาพจิตรกรรมฝาผนังที่วัดแห่งนี้ เนื่องจากเป็นภาพจิตรกรรมฝาผนังที่บูรณะใหม่ทั้งหมด สีและองค์ประกอบบนภาพจิตรกรรมมีความสมบูรณ์ เหมาะสมสำหรับถ่ายภาพและวัดค่าการสะท้อนแสงของสีเพื่อเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้เลือกภาพจิตรกรรมฝาผนังตามภาพที่ 3.1 ดังนี้ ตำแหน่งภาพที่ 1, 2, 3, 4, 13 และ 14 ติดกับประตูพระ

อุโบสถ มีแสงรบกวนมากจึงไม่เหมาะที่จะถ่ายภาพและวัดค่าการสะท้อนแสงเพื่อเก็บข้อมูล ตำแหน่งภาพที่ 5, 6, 7 และ 8 เป็นภาพที่ติดกับพระพุทธรูปองค์ประธานและอาสนะของพระภิกษุ จึงไม่เลือกตำแหน่งนี้ ตำแหน่งภาพที่ 9, 10, 11 และ 12 ไม่มีสิ่งกีดขวาง แต่ภาพที่ 11 ใช้สีทองเมทัลลิกไม่มีความหลากหลายของสี เหลือเพียงตำแหน่งที่ 9, 10 และ 12 ที่เหมาะสมสำหรับทำการวิจัย กำหนดขอบเขตการถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนัง ที่ความสูง 170 เซนติเมตร ความกว้าง 80 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.1 แผนผังตำแหน่งภาพจิตรกรรมฝาผนังภายในพระอุโบสถ

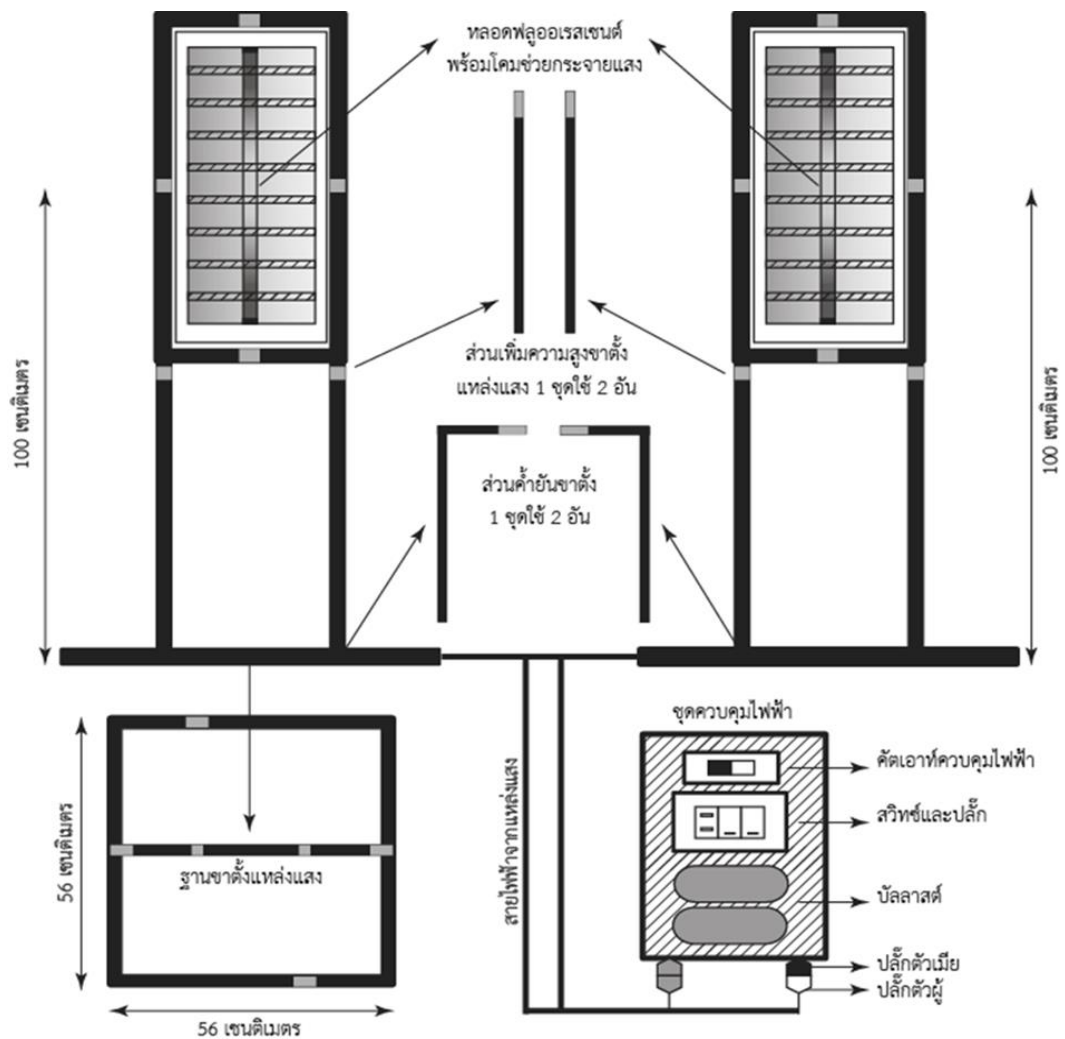
หลังจากสำรวจสถานที่ผู้วิจัยได้สอบถามพระภิกษุผู้ดูแลพระอุโบสถ ก่อนจะเข้าไปใช้พื้นที่ทางผู้วิจัยจำเป็นต้องทำหนังสือขออนุญาตใช้พื้นที่ก่อน พื้นที่ในสวนพระอุโบสถจะเปิดเวลา 9.30 น. ถึง 17.00 น. ของทุกวัน เว้นวันที่มีกิจของสงฆ์ เช่น การประกอบพิธีอุปสมบท เป็นต้น นอกจากนี้มีการสัมภาษณ์จิตรกรผู้ซ่อมแซมภาพจิตรกรรมฝาผนังในพระอุโบสถ เพื่อเก็บข้อมูล ปัญหาและอุปสรรคที่เป็นประโยชน์สำหรับการวิจัย

3.2.2 ประดิษฐ์อุปกรณ์เพื่อการวิจัย

หลังสอบถามพระภิกษุผู้ดูแลพระอุโบสถ ทราบว่าไม่สามารถเก็บสัมภาระและอุปกรณ์สำหรับทำการวิจัยไว้ภายในพระอุโบสถได้ เพราะทางวัดไม่อนุญาตให้เก็บของภายในพระอุโบสถ จึงออกแบบอุปกรณ์สำหรับการวิจัย ให้ถอดประกอบและเคลื่อนย้ายได้ง่าย โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัย มีดังนี้

3.2.2.1 แหล่งแสงประกอบกับโคมช่วยกระจายแสง

เนื่องจากแหล่งแสงประกอบกับโคมช่วยกระจายแสงทั่วไปมีราคาแพง และมีน้ำหนักมากไม่สามารถเคลื่อนย้ายด้วยผู้ใช้คนเดียวได้ [37] ผู้วิจัยจึงประดิษฐ์อุปกรณ์ดังกล่าวขึ้นดังภาพที่ 3.2 โดยขาตั้งได้ออกแบบให้มีน้ำหนักเบารวมทั้งเคลื่อนย้ายและถอดประกอบได้ง่าย ชุดขาตั้งสามารถปรับระดับความสูงได้ 2 ระดับ โดยวัดจากพื้นถึงจุดกึ่งกลางของแหล่งแสง (100 เซนติเมตร และ 150 เซนติเมตร) วัสดุที่ใช้เป็นท่อน้ำพลาสติก PVC พันด้วยสเปรย์สีดำด้าน ชุดควบคุมการจ่ายไฟฟ้าประกอบด้วยคัทเอาต์หลัก 1 ตัว ทำหน้าที่ควบคุมไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายไฟหลักโดยมีไฟ LED สีแดงแสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟฟ้า บัลลาสต์ 18 วัตต์ 2 ตัว ทำหน้าที่ช่วยสร้างให้เกิดแรงดันที่เพียงพอภายในการจุดหลอดก๊าซดิสชาร์จให้ติด รวมทั้งควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรขณะสตาร์ทและขณะหลอดฟลูออเรสเซนต์ทำงานและควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดให้มีค่าเหมาะสม สวิตช์ไฟ 2 ตัว ทำหน้าที่เปิดและปิดหลอดฟลูออเรสเซนต์ ปลั๊กไฟ 1 ตัว ทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้ปลั๊กพ่วงภายนอกเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์อื่น ภาคจ่ายไฟเป็นปลั๊กตัวเมีย 2 ตัว แยกสักระหว่างโคมไฟฝังฝ้าและขวา ทำหน้าที่ส่งกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุมไปยังหลอดฟลูออเรสเซนต์ ชุดโคมไฟช่วยกระจายแสงประกอบไปด้วยชุดโคมไฟและแผ่นช่วยกระจายแสง ภายในติดตั้งด้วยชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่มีอุณหภูมิสีของแสง 6500 เคลวิน และสตาร์ทเตอร์ ในการวิจัยจะใช้แหล่งแสงประกอบกับโคมช่วยกระจายแสงพร้อมขาตั้ง 2 ชุด และชุดควบคุมไฟฟ้า 1 ชุด ควบคุมกัน เมื่อถอดเก็บมีน้ำหนักรวม 5.5 กิโลกรัม



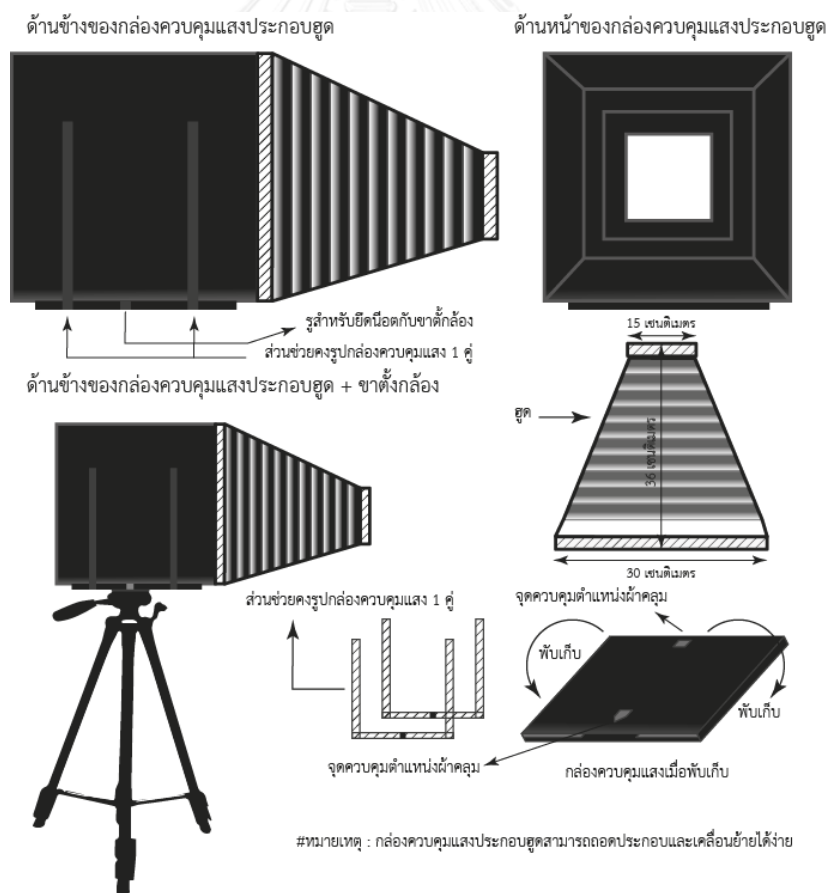
#หมายเหตุ : ชุดขาตั้งและชุดควบคุมไฟฟ้าสามารถถอดประกอบและเคลื่อนย้ายได้ง่าย

ภาพที่ 3.2 แหล่งแสงประกอบกับโคมช่วยกระจายแสงพร้อมขาตั้งและชุดควบคุมไฟฟ้า

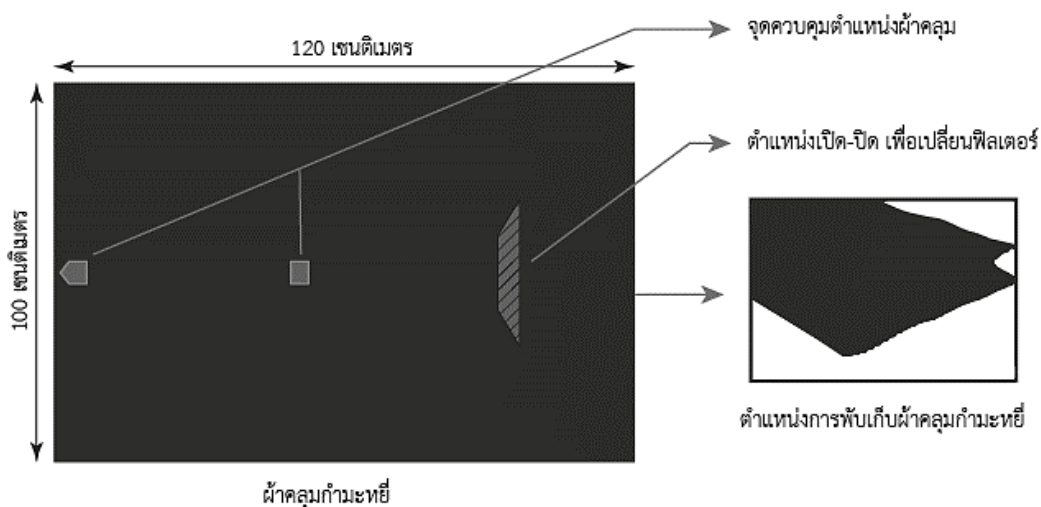
3.2.2.2 กล่องควบคุมแสง

สร้างกล่องควบคุมแสงเพื่อควบคุมแสงที่สะท้อนจากภาพจิตรกรรมฝาผนังให้ผ่านไป ยังฟิลเตอร์และเข้าสู่ส่วนรับภาพหรือเซนเซอร์ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว รวมทั้งควบคุมขอบเขต การถ่ายภาพให้เหมาะสมกับขนาดของเซนเซอร์รับภาพของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว โดยสามารถ คำนวนตามข้อ 2.1.3.7 วัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกสีดำทึบแสงปิดทับด้านในด้วยกระดาษผิวเรียบด้าน ทำ การตัดประกอบเป็นกล่องที่สามารถพับเก็บและถอดประกอบได้ง่าย

ความกว้างของเซนเซอร์รับภาพที่ 7.2 มิลลิเมตร ความสูงของเซนเซอร์รับภาพที่ 5.3 มิลลิเมตร (1/1.8" CCD) ระยะทางจากกึ่งกลางเลนส์ถึงวัตถุที่ 80 เซนติเมตร ทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่ 25 มิลลิเมตร ผลจากการคำนวณได้ค่า FOV ด้านกว้างที่ 16.96 เซนติเมตร FOV ด้านสูงที่ 23.04 เซนติเมตร เนื่องจากผู้วิจัยต้องการสร้างกล่องควบคุมที่มีรูปทรงสมมาตรหรือเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อ ง่ายต่อการพับเก็บจึงเปลี่ยนค่า FOV เป็น 30 เซนติเมตร ในทุกด้านของกล่องควบคุมแสง ส่วนฐานที่ ยึดติดกับขาตั้งกล้องทำจากแผ่นอะคริลิกปิดทับด้านในด้วยกระดาษฟิวเรียบด้าน เจาะรูใส่น็อตสกรู สำหรับยึดติดกับขาตั้งกล้อง Vertex V8400 ส่วนของฮูดทำจากวัสดุชนิดเดียวกับที่ใช้ทำกล่องควบคุม แสง ขนาดของฮูดแผ่นสี่เหลี่ยมคางหมู ฐานมีความยาว 30 เซนติเมตร, เส้นคู่ขนานยาว 15 เซนติเมตร เส้นตั้งฉากสูง 36 เซนติเมตร (ใช้ 4 แผ่นประกอบเข้าด้วยกัน) ตามภาพที่ 3.3 เมื่อพับเก็บมี น้ำหนัก 1.4 กิโลกรัม ผ้าคลุมกำมะหยี่ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความกว้าง 100 เซนติเมตร ความยาว 120 เซนติเมตร กำหนดสัญลักษณ์จุดกึ่งกลางและขอบเขตของกล่องควบคุมแสงเพื่อง่ายต่อการคลุม ผ้ากำมะหยี่ขณะทำการวิจัย ตามภาพที่ 3.4



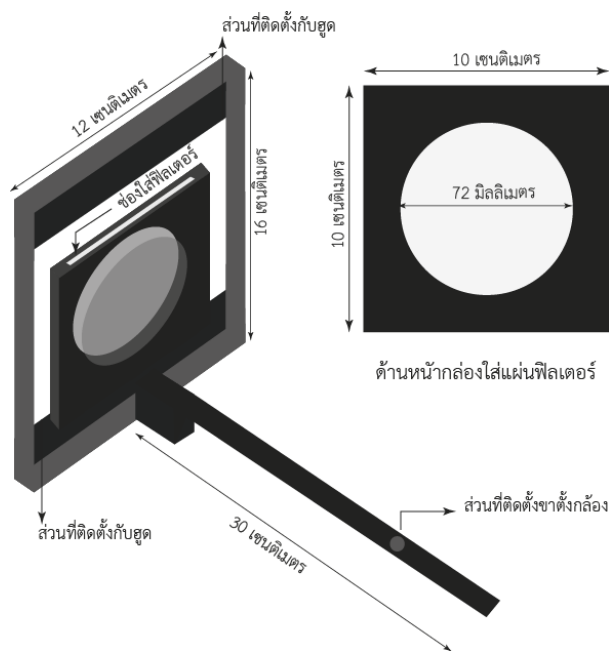
ภาพที่ 3.3 การประกอบและพับเก็บกล่องควบคุมแสงที่ติดตั้งพร้อมฮูด



ภาพที่ 3.4 ส่วนประกอบของผ้าคลุมกำมะหยี่

3.2.2.3 กล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพ

ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้การสลับเปลี่ยนฟิลเตอร์ขณะถ่ายภาพสะดวกและรวดเร็วขึ้น ทำจากแผ่นอะคริลิกสีดำปิดทับด้วยกระดาษผิวเรียบด้าน กล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์มีความกว้าง 10 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร ความหนา 1 เซนติเมตร ใช้ 2 แผ่นประกอบเข้าด้วยกันโดยเว้นช่องว่างสำหรับสอดใส่ฟิลเตอร์ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.5 เจาะแผ่นด้านหน้าและด้านหลังเป็นรูวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72 มิลลิเมตร ส่วนที่เจาะรูที่แผ่นด้านหน้าเมื่อทำการวิจัยจะติดตั้งฟิลเตอร์กรองแสงในช่วงอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ตไว้ถาวร เว้นช่องตรงกลางไว้ 5 มิลลิเมตร ใช้เป็นช่องสลับเปลี่ยนฟิลเตอร์เจาะดินของ Fuji Film ที่เลือกกรองแสงเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ ตามลำดับดังนี้ ฟิลเตอร์ BPB42 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ฟิลเตอร์ BPB45 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ฟิลเตอร์ BPB50 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ฟิลเตอร์ BPB55 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ฟิลเตอร์ BPB60 ที่มีค่าการส่องผ่านสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ประกอบกับเหล็กดัดขึ้นรูปเพื่อใส่เป็นส่วนติดตั้งกับชุดและขาตั้งกล้อง ส่วนที่ติดกับชุดโครงเหล็กดัดมีความกว้าง 12 เซนติเมตร ความสูง 16 เซนติเมตร ความหนา 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นส่วนรองรับกล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์ซึ่งมีน้ำหนักมากพอสมควร และบังคับไม่ให้กล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์เคลื่อนที่ขณะทำการสลับเปลี่ยนฟิลเตอร์ ส่วนที่ติดกับขาตั้งกล้อง มีความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร มีรูน็อตเพื่อยึดติดเข้ากับฐานของขาตั้งกล้อง เมื่อติดตั้งเสร็จ

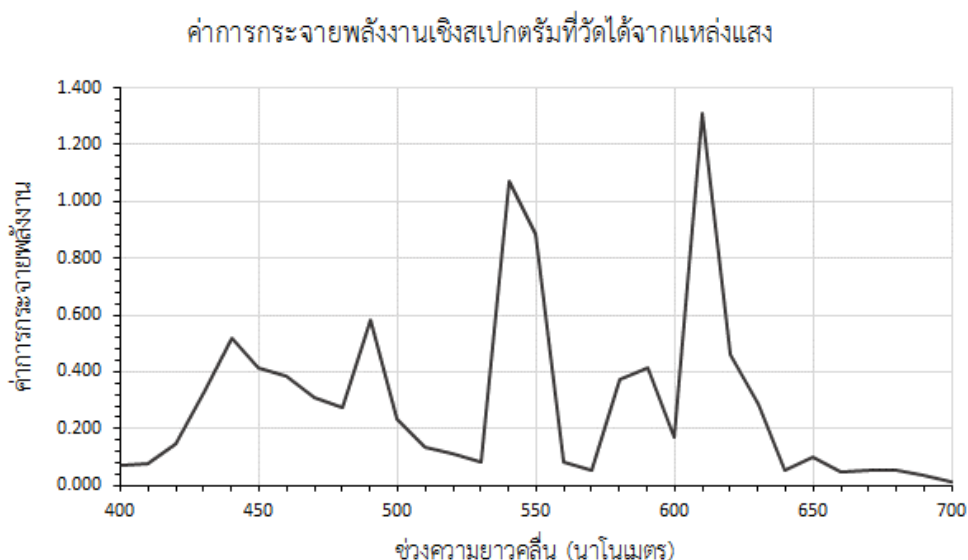


ภาพที่ 3.5 กล่องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพ

3.2.3 วัดค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง

ติดตั้งหลอดหลอดฟลูออเรสเซนต์ Model TL-D 18W/865 1SL จำนวน 2 หลอด ที่ตู้แสงประดิษฐ์ และสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ของ Konica Minolta รุ่น CS-1000A พร้อม Software ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา Lenovo laptop model Y410P โดยการวัดค่าจะใช้ Geometry ที่ 0/45 วัดค่าความเอียงของเครื่องวัดด้วยแอปพลิเคชัน Angle Meter for iOS ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ iPhone รุ่น 4S เพื่อให้ได้มุมเอียง 45 องศาที่ถูกต้อง เมื่อติดตั้งทุกอย่างเรียบร้อยแล้วทำการ Calibrate เครื่องวัดโดยการวัดแผ่นสีขาวอ้างอิง (reference white) จากนั้นเลือกโหมดการวัดสีของแหล่งแสงวัดแสงสะท้อนจากแผ่นสีขาวอ้างอิง ซึ่งจะวัดค่าในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร ทั้งหมด 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยโดยซอฟต์แวร์จะประมวลผลออกมาได้เป็นค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง ค่าดังกล่าวจะถูกกำหนดเป็นค่าอ้างอิงของแหล่งแสงที่ซอฟต์แวร์ใช้ในการประมวลผลสำหรับการวัดค่าการทอนแสงของสี Munsell, NCS และสีฝุ่นซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนัง

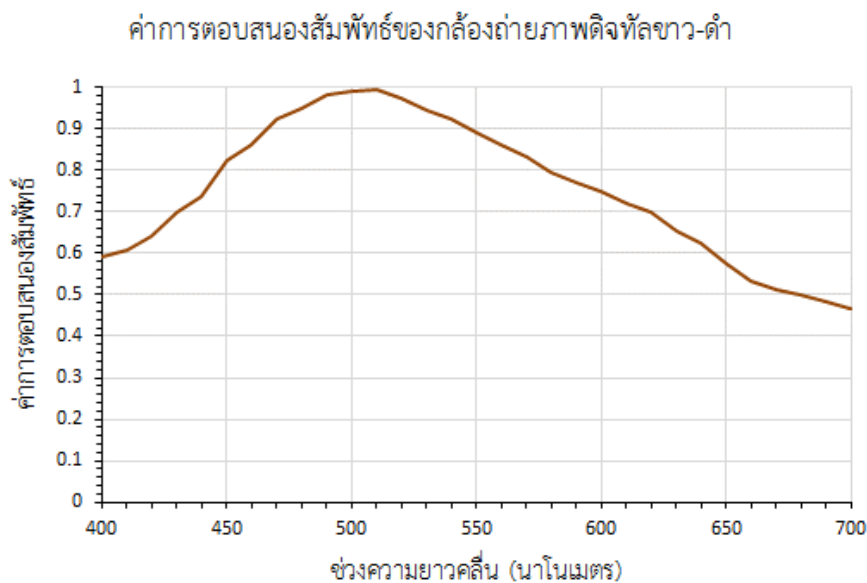
อีกทั้งเป็นค่าตัวแปรที่จะใช้ในการประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์ ประกอบด้วย ค่าการส่องผ่านในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของฟิลเตอร์ ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell, บางส่วนของแผ่นสี NCS และสีฝุ่นซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนัง ค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสงที่วัดได้แสดงในรูปแบบกราฟ ตามภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 กราฟแสดงค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง

3.2.4 วัดค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องดิจิทัล

กล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว Nikon model DS-2MBWc เป็นกล้องที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ การวัดค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องดิจิทัล โดยทั่วไปจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการวัดค่าแต่เนื่องด้วยห้องทดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลของบริษัท Nikon ในประเทศไทยไม่มีเครื่องมือที่สามารถวัดค่าได้ งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการประมาณและแปลงค่าการตอบสนองของกล้องดิจิทัลที่แสดงในไฟล์ภาพที่ได้ดาวน์โหลดมาจากเว็บไซต์ผู้ผลิตออกมาเป็นค่าตัวเลข ด้วยโปรแกรม Digital Curve Tracer และสร้างกราฟในโปรแกรม Microsoft Excel 2013 เพื่อตรวจสอบกับค่าที่แสดงในไฟล์ภาพ ซึ่งกราฟที่แสดงในไฟล์ภาพ มีค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องดิจิทัลบางช่วงเกินช่วงความยาวคลื่นที่ 700 นาโนเมตร เป็นช่วงที่ตาของมนุษย์มองไม่เห็น จึงตัดค่าในช่วงดังกล่าวออก ภาพที่ 3.7 แสดงผลค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องที่ได้



ภาพที่ 3.7 กราฟแสดงค่าการตอบสนองสัมพัทธ์ของกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว

3.2.5 วัดค่าการส่องผ่านในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของฟิลเตอร์

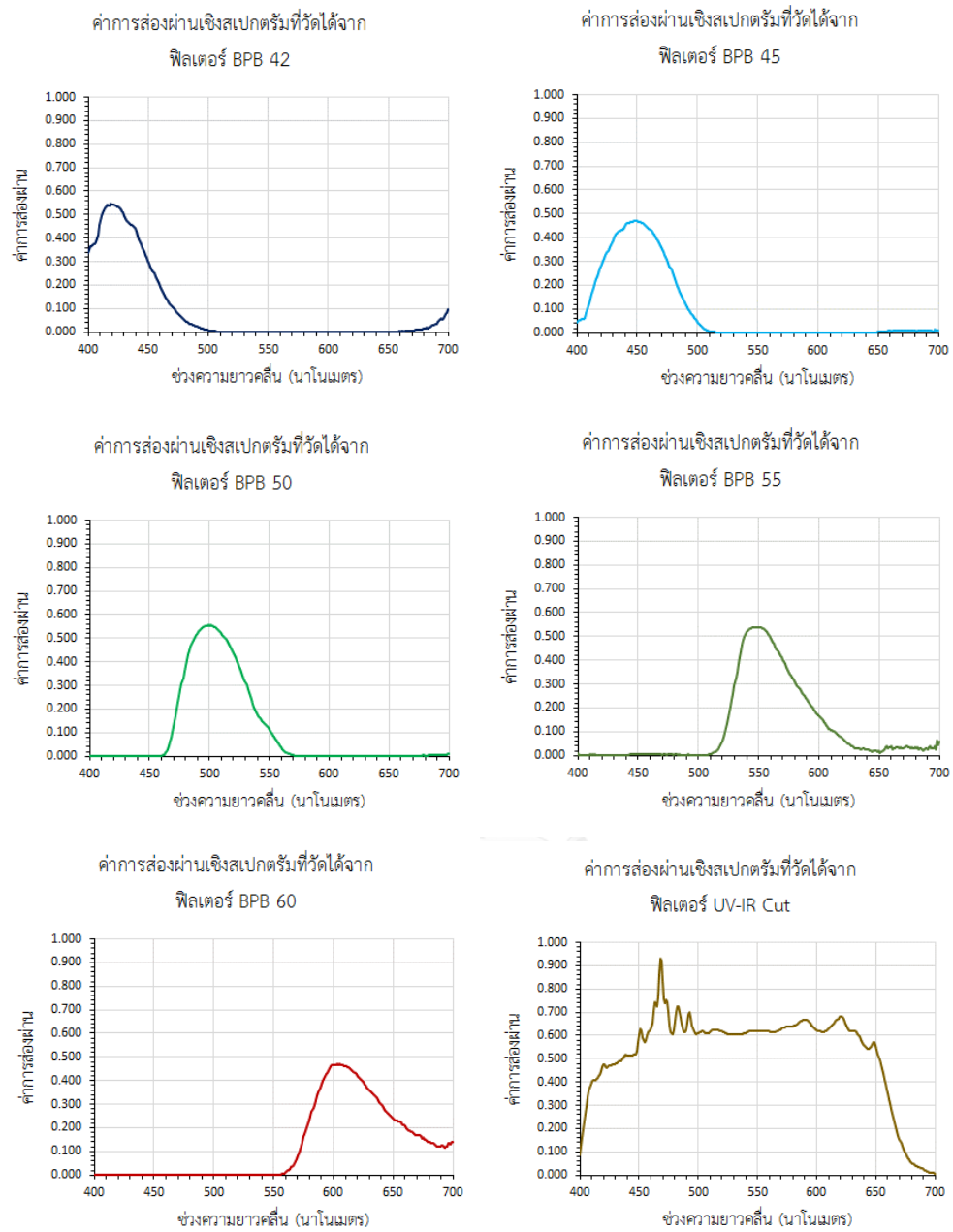
การวัดค่าการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมของฟิลเตอร์ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการวัดค่าการส่องผ่านแสง โดยวัดค่าการกรองแสงของแผ่นสีขาวอ้างอิง ซึ่งวิธีการวัดเหมือนกับการวัดค่าการกระจายพลังงานเชิงสเปกตรัมของแหล่งแสง ซึ่งวัดค่าโดยใช้ Geometry ที่ 0/45 การวัดค่าการส่องผ่านต้องวางแผ่นฟิลเตอร์ไว้ด้านหน้าเลนส์เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ขณะทำการวัดค่า ฟิลเตอร์ที่ใช้วัดเป็นฟิลเตอร์เจลละตินของ Fuji Film ที่เลือกกรองแสงเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ ดังนี้ BPB42, BPB45, BPB50, BPB55 และ BPB60 รวมทั้งฟิลเตอร์กรองแสงในช่วงอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ต เมื่อวัดค่าเสร็จนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ตามสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่าการส่องผ่านจริงของฟิลเตอร์และสร้างกราฟการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมของแต่ละฟิลเตอร์ ตามภาพที่ 3.8

$$T(\lambda) = \frac{M(\lambda)}{O(\lambda)} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

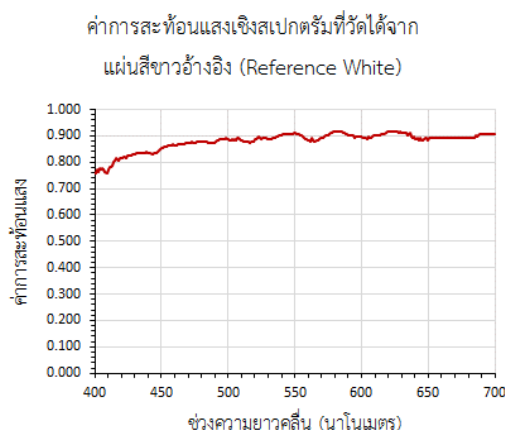
$T(\lambda)$ = Real transmission of filter

$M(\lambda)$ = Measurement transmission of filter

$O(\lambda)$ = Reflectance of reference white



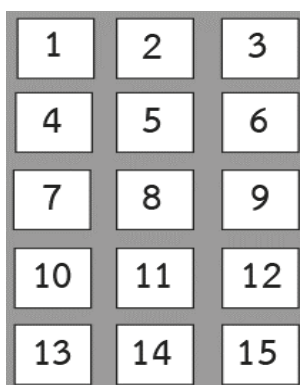
ภาพที่ 3.8 กราฟแสดงค่าการส่องผ่านเชิงสเปกตรัมของฟิลเตอร์
BPB42, BPB45, BPB50, BPB55, BPB60 และ UV-IR Cut



ภาพที่ 3.9 กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่น Reference white

3.2.6 วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell และ NCS

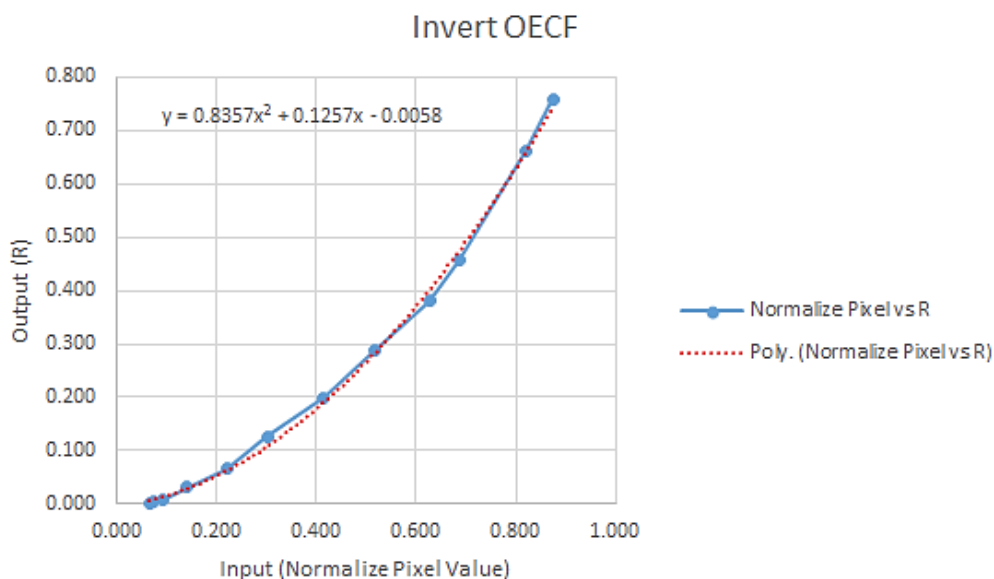
ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของแผ่นสี Munsell และ NCS เป็นฐานข้อมูลสีที่จะนำไปใช้สร้างอัลกอริทึมสำหรับประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ ดังนั้นจึงทำการวัดแผ่นสี Munsell ทั้งหมดจำนวน 1300 สี (40 หน้าใน Munsell Book of Colors) ส่วนแผ่นสี NCS จะคัดเลือกสีที่กำหนดในงานผลวิจัยสีในจิตรกรรมฝาผนังไทย [36] จำนวน 46 แผ่นสี โดยการวัดค่าจะใช้ Geometry ที่ 0/45 ทำการวัดค่าความเอียงของเครื่องวัดด้วยแอปพลิเคชัน Angle Meter for iOS ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ iPhone รุ่น 4S เพื่อให้ได้มุมเอียง 45 องศาที่ถูกต้อง Calibrate เครื่องวัดโดยการวัดแผ่นสีขาวอ้างอิง (reference white) เลือกโหมดการวัดสีของวัตถุและตั้งค่าการวัดแบบเฉลี่ยที่ 10 ครั้ง (2° Standard Observer) ก่อนเริ่มวัดค่าการสะท้อนแสงของสีต้องวัดค่าความสว่าง (lux) ในบริเวณพื้นที่วัดค่าภายในตู้แสงทั้งหมด 15 จุด ด้วยเครื่อง Illuminance Spectrophotometer Model CL-500A ตามภาพที่ 3.10 ผู้วิจัยต้องทำการวัดแผ่นสีขาวอ้างอิง (reference white) เพื่อ Calibrate เครื่องวัดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสีหรือตำแหน่งในการวัดค่า



ภาพที่ 3.10 ตำแหน่งการวัดค่าความสว่าง (lux) บริเวณพื้นที่วัดค่าภายในตู้แสง

3.2.7 ทดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียวและอุปกรณ์วิจัย

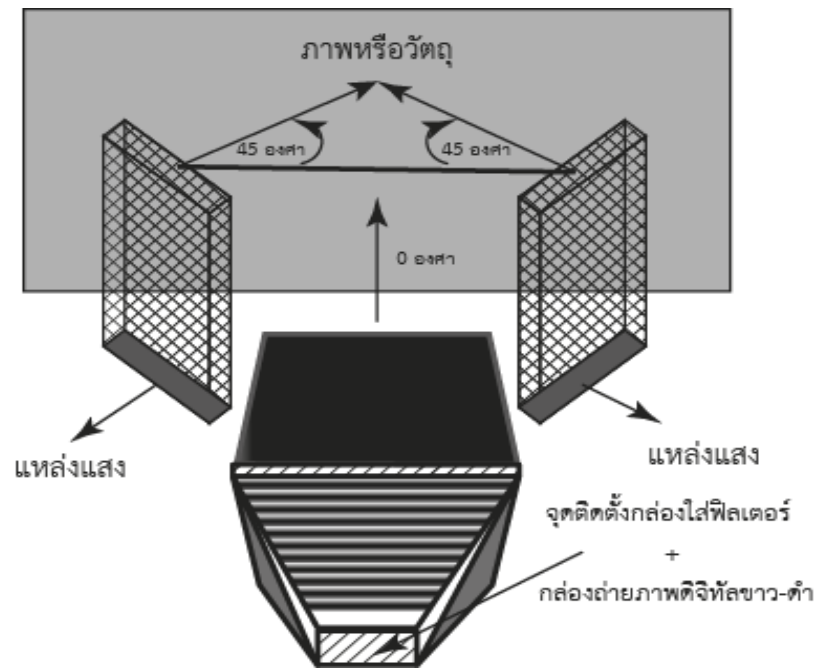
ทดสอบกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว Nikon model DS-2MBWc, Lens Cosmocar 25 mm f1.4 (Standard lens) ชุดควบคุมกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียว Nikon model DS-L2 และอุปกรณ์วิจัย เริ่มจากถ่ายภาพในห้องทดลอง ซึ่งกล้องถ่ายภาพจะถูกติดตั้งกับอุปกรณ์วิจัยที่ประดิษฐ์ขึ้น ได้แก่ แหล่งแสงประกอบด้วยคอมช่วยกระจายแสงพร้อมขาตั้งและชุดควบคุมไฟฟ้า กล้องควบคุมแสงติดตั้งพร้อมกับชุดและผ้าคลุมกำมะหยี่ กล้องใส่แผ่นฟิลเตอร์สำหรับถ่ายภาพพร้อมกับชุดติดตั้งกับชุด และขาตั้งกล้องเข้ากับกล่องควบคุมแสง ใช้แอปพลิเคชัน Level for iOS iOS ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ iPhone รุ่น 4S ปรับระดับขาตั้งกล้อง เนื่องจากเมื่อติดตั้งแล้วจะมองเห็นจุดวัดระดับน้ำของขาตั้งกล้องได้ลำบาก ทดสอบปรับระดับความสูงที่ 100 เซนติเมตร กับ 150 เซนติเมตร จัดแหล่งแสงโดยใช้ Geometry ที่ 45/0 ปรับตั้งความละเอียดในการถ่ายภาพสูงสุดที่ 1600 x 1200 พิกเซล ปรับตั้ง ISO ที่ 100 รูรับแสงของเลนส์ปรับตั้งที่ 2.8 ปรับตั้ง shutter speed รวมทั้งค่าชดเชยแสงตามปริมาณแสงที่เปลี่ยนไปขณะถ่ายภาพ พิจารณาความคมชัดและคุณภาพของภาพที่ถ่ายได้ ขั้นตอนต่อมาทำการแปลงค่า พิกเซลของภาพถ่ายกลับไปเป็นไฟล์ภาพที่ไม่มีการปรุงแต่งค่าพิกเซลของภาพ (linearize image) เพราะกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสีเดียวสามารถบันทึกไฟล์ภาพได้เพียงนามสกุล JPEG และ BMP เท่านั้น จึงต้องตรวจสอบค่าพิกเซลด้วย Opto electronic conversion function (OECF) ซึ่งถูกระบุใน มาตรฐานการทดสอบการถ่ายภาพ ISO-14545 ตามหัวข้อ 2.1.3.6 และแปลงค่าพิกเซลด้วย invert OECF เริ่มจากถ่ายภาพแผ่นทดสอบ 20 patch OECF target แต่เนื่องจากผู้วิจัยไม่มีแผ่นทดสอบ ดังกล่าวจึงใช้แผ่นตรวจสอบสี Xrite Colors Checker DC ในส่วนของแผ่นสีขาวไปจนถึงสีดำจำนวน 12 สี ซึ่งเหมือนกับแผ่นทดสอบ 20 patch OECF target ในการถ่ายภาพแทน วัดค่าการสะท้อนแสง (reflectance) ของแผ่นสีทั้ง 12 สี ด้วยเครื่องสเปกโทรเรดิโอมิเตอร์ นำค่าข้อมูลเข้าประมวลผลและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมกับค่าพิกเซลเฉลี่ยของแผ่นตรวจสอบ สี Xrite Colors Checker DC ในส่วนของแผ่นสีขาวไปจนถึงสีดำจำนวน 12 สี พร้อมกับแสดงสมการ แนวโน้มของกราฟแบบ 2nd order polynomial ซึ่งเป็นแบบ linear เพื่อตรวจสอบ OECF จากนั้น สร้างกราฟความสัมพันธ์แบบตรงกันข้าม (invert OECF) พร้อมกับแสดงสมการแนวโน้มเชิงเส้นของ กราฟแบบ 2nd order polynomial ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel 2013 ซึ่งแสดงผลในภาพที่ 3.11 สมการแนวโน้มเชิงเส้นดังกล่าวจะใช้แปลงค่าพิกเซลในภาพถ่ายให้เป็นค่าพิกเซลที่ไม่มีการปรุงแต่ง (linearize image)



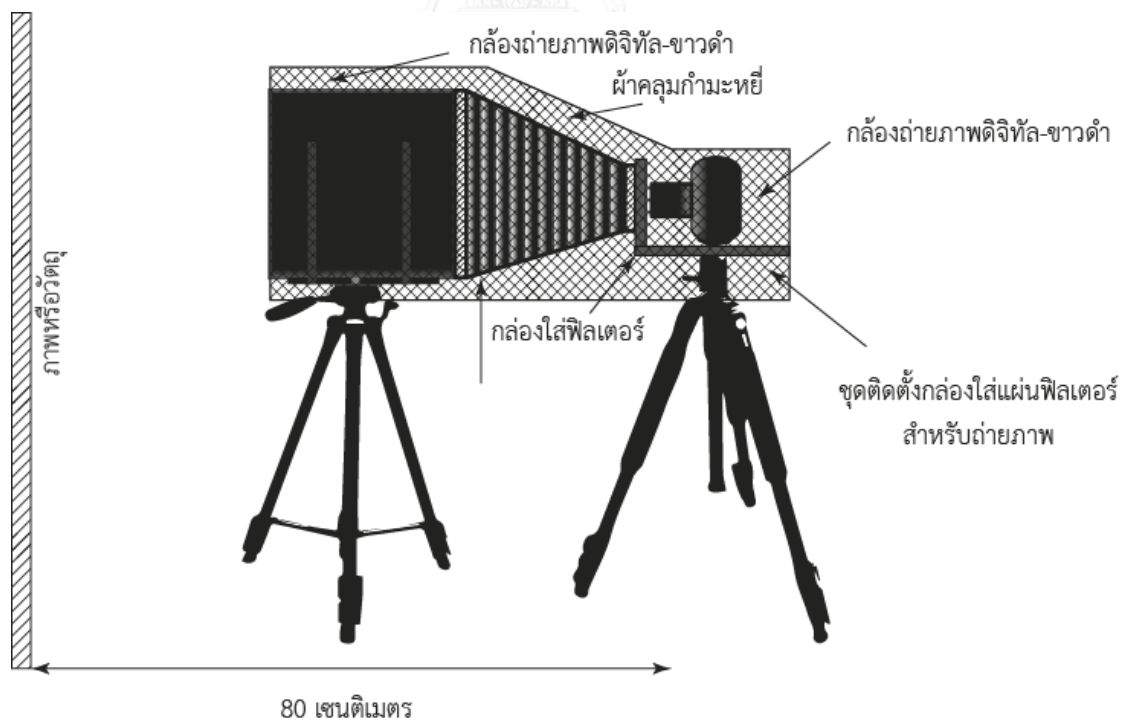
ภาพที่ 3.11 กราฟ Invert OECF พร้อมสมการแนวโน้มเชิงเส้น

ขั้นต่อไปเป็นการทดสอบสัญญาณรบกวนของภาพ (noise) ซึ่งทำให้ภาพไม่มีคุณภาพหรือมีคุณภาพลดลง เริ่มจากการถ่ายภาพแผ่นตรวจสอบสี Xrite Colors Checker DC (ไม่ผ่านฟิลเตอร์) จากนั้นทำแปลงค่าไฟล์ภาพด้วย Invert OECF โดยใช้โปรแกรม MATLAB R2012a บันทึกไฟล์ภาพใหม่ด้วยนามสกุล BMP และคำนวณค่า Signal to Noise Ratio (SNR_{dB}) ตามสมการที่ 1.1 เพื่อตรวจสอบสัญญาณรบกวนของภาพด้วยโปรแกรม MATLAB R2012a ผลการคำนวณมีค่า 54.77 เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวตามตารางที่ 1.1 พบว่าคุณภาพของภาพที่ได้ค่อนข้างดี มีสัญญาณสัญญาณรบกวนของภาพน้อย สำหรับการถ่ายภาพ ณ สถานที่จริงต้องทำการทดสอบสัญญาณรบกวนของภาพ (noise) อีกครั้งหนึ่ง

ทดสอบการถ่ายภาพแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี โดยจำลองสภาพแวดล้อมให้เหมือนกับการทดลองในสถานที่จริง กำหนดระยะของภาพหรือวัตถุด้วยตลับเมตรโดยวัดที่ระยะ 80 เซนติเมตร การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์แสดงตามภาพที่ 3.12 และ 3.13



ภาพที่ 3.12 การจัดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพโดยใช้ Geometry ที่ 45/0



ภาพที่ 3.13 การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ

3.2.8 ทดสอบประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์

หลังจากถ่ายภาพแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี ผ่านฟิลเตอร์เฉาะดิน BPB42, BPB45, BPB50, BPB55 และ BPB60 จากนั้นทำการสุ่มสีเพื่อทดสอบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์โดยสุ่มเลือกจากหนังสือแผ่นสี Munsell จำนวน 41 หน้าที่ยกตามสีหลักจนครบทุกสีหลักของสี Munsell (R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP และ Neutrals) ได้เป็นสีที่จะทดสอบ จำนวน 11 สี แปลงค่าพิกเซลในภาพที่ถูกสุ่มเลือกมาด้วย invert OECF ตัดภาพบริเวณสีที่สุ่มเลือก และประมวลผลด้วยอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ ด้วยฐานข้อมูลสี Munsell จำนวน 1300 สี ในโปรแกรม MATLAB R2012a แสดงผลกราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสี แปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้ไปเป็นค่าสี CIE L^* , a^* และ b^* ตามหัวข้อ 2.1.6 คำนวณหาค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 (ΔE_{00}) ตามสมการที่ 1.14 เปรียบเทียบค่าสีที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าสีที่วัดได้จริงจากเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ พบว่ามีค่าเฉลี่ย $\Delta E_{00} = 1.665$ และค่า ΔE_{00} สูงสุด = 2.656 พร้อมกับคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมด้วย RMSE ซึ่งมีค่าเฉลี่ย RMSE = 0.017 และค่า RMSE สูงสุด = 0.024 จากผลการทดสอบดังกล่าวจึงพิจารณาได้ว่าค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 3 หน่วย รวมทั้งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) = 0.78 ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย RMSE มีค่าเข้าใกล้ค่า 0 แสดงถึงอัลกอริทึมสำหรับประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ที่เขียนขึ้น สามารถนำไปประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีได้

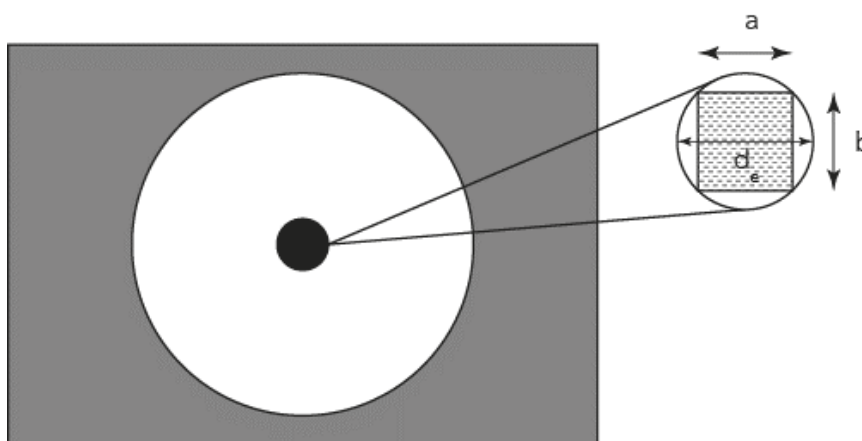
3.2.9 วัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนัง

3.2.9.1 วัดค่าด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์

การวัดค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนัง ณ สถานที่จริง วัดค่าด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ พิจารณาเลือกสีที่แตกต่างกันบนภาพจิตรกรรมฝาผนังซึ่งต้องมีความความสม่ำเสมอของสี ไม่มีลวดลาย มีพื้นที่เพียงพอสำหรับวัดด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ วัดค่าโดยใช้ Geometry ที่ 45/0 ทำการ Calibrate เครื่องวัดโดยการวัดแผ่นสีขาวอ้างอิง (reference white) เลือกโหมดการวัดสีของวัตถุและตั้งค่าการวัดแบบเฉลี่ยที่ 10 ครั้ง ใช้โปรแกรม PS Autoclick ช่วยในการวัดค่า ต้องทำการวัดแผ่นสีขาวอ้างอิง (reference white) เพื่อ calibrate เครื่องวัดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสีหรือตำแหน่ง วัดค่าโดยมีระยะภาพหรือวัตถุที่ 80 เซนติเมตร ซึ่งประกอบเข้ากับกล่องควบคุมแสง เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสีเดียว วัดค่าสีบนจิตรกรรมฝาผนังจำนวน 18 สี (ภาคผนวก ก) จากภาพจิตรกรรมภาพละ 6 สี ทั้งหมด 3 ภาพ และวัดค่าสีอีก 18 สี (ภาคผนวก ข) เพื่อนำไปสร้างฐานข้อมูลสีในประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์

3.2.9.2 คำนวณพื้นที่ตัดภาพเทียบกับพื้นที่วัดค่าจริง

ใช้กล้องโนโทรศัพท์เคลื่อนที่ iPhone รุ่น 4S ถ่ายภาพจุดวงกลม ซึ่งเป็นพื้นที่วัดค่าของเครื่องสเปกโทรเรติโอมิเตอร์ ภาพจำลองจุดวัดค่าแสดงตามภาพที่ 3.14 คำนวณหาขนาดตัดภาพเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ตามสมการที่ 3.2 จากนั้นแปลงค่าความกว้างและความยาวให้อยู่ในหน่วยพิกเซล เพื่อกำหนดขอบเขตในการตัดภาพโดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS6



ภาพที่ 3.14 ภาพจำลองขนาดของจุดวัดค่าเครื่องสเปกโทรเรติโอมิเตอร์

$$d_e = 1.30(ab)^{0.625} / (a+b)^{0.25} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

d_e = Equivalent diameter (mm)

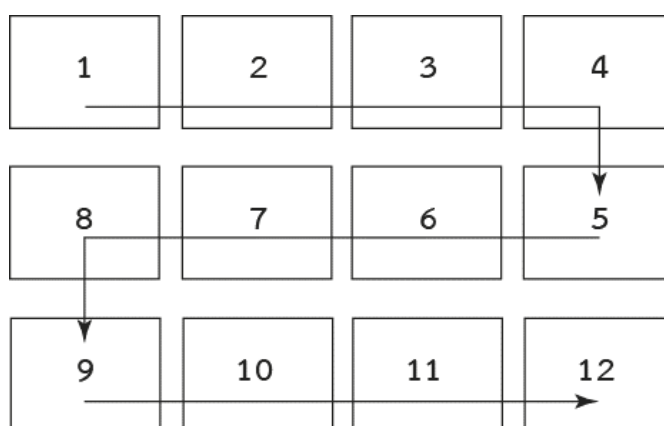
a = Length of major or minor side (mm)

b = Length of minor or major side (mm)

จากภาพถ่ายจุดวัดค่า กำหนดให้ d_e เท่ากับ 45.5 มิลลิเมตร ได้ค่า a และ b เท่ากับ 41.63 มิลลิเมตร ซึ่งคำนวณความกว้างและยาวในหน่วยพิกเซล ได้เท่ากับ 118×118 พิกเซล เมื่อนำไปเทียบขนาดจะไม่เกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพจุดวงกลมซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับวัดค่า

3.2.10 ถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย

เริ่มจากจัดและประกอบอุปกรณ์ตามภาพที่ 3.12 และ 3.13 เพื่อควบคุมแสงในการถ่ายภาพให้คงที่ โดยกำหนดการถ่ายภาพทั้งหมด 12 ภาพย่อย มีทิศทางการถ่ายภาพ ตามภาพที่ 3.15 เพื่อประกอบภาพย่อยให้เป็นภาพจิตรกรรมฝาผนังภาพใหญ่



ภาพที่ 3.15 ทิศทางในการถ่ายภาพทั้งหมด 12 ภาพย่อย

การถ่ายภาพย่อยทุกภาพจะวาง Xrite Colors Checker Passport ให้อยู่ใน Scene ทุกครั้งหลังจากถ่ายภาพครบ 12 ภาพย่อย จำนวน 5 ฟิลเตอร์ (60 ภาพ) จะปรับสมดุลสีขาว (white balance) ด้วยสีขาวของ Xrite Colors Checker Passport ที่อยู่ในภาพ จากนั้นทำการปรับค่าด้วยสมการ invert OECF และตรวจสอบสัญญาณรบกวน (noise) ในภาพด้วยการคำนวณ Signal to noise ratio (SNR_{dB}) ด้วยสมการที่ 1.1 ให้ผลการทดสอบด้วยค่าเฉลี่ย Signal to noise ratio (SNR_{dB}) = 52.173 dB หากมีค่ามากขึ้นแสดงว่าคลื่นสัญญาณรบกวน (noise) จะลดลงตามไปด้วย เปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ตามตารางที่ 1.1 พบว่าภาพที่ได้อยู่ในเกณฑ์คุณภาพดีแต่ยังมีสัญญาณรบกวนบ้างเล็กน้อยทางผู้วิจัยจึงนำอัลกอริทึมมาช่วยลดสัญญาณรบกวน (noise) ในภาพถ่ายเพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพดีขึ้นโดยใช้ Linear filter ซึ่งทำการสร้างฟิลเตอร์ไปวางไว้หน้าไฟล์ภาพเพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวนในภาพถ่าย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Wiener filter ซึ่งเป็นฟิลเตอร์ประเภท Linear filter ที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนในภาพ คำนวณตามสมการที่ 1.2 ประมวลผลทั้งหมด 5 ครั้ง (5 แชนแนล) การใช้ Wiener filter ลดสัญญาณรบกวน (noise) ภายในภาพจะส่งผลทำให้ภาพเบลอเล็กน้อย ทดสอบภาพที่ทำการลดสัญญาณรบกวนแล้วอีกครั้งหนึ่ง ให้ผลการทดสอบด้วยค่าเฉลี่ย Signal to noise ratio (SNR_{dB}) = 55.710 dB ซึ่งส่งผลให้ภาพมีคุณภาพดีขึ้นอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดีแต่ก็ยังมีสัญญาณรบกวนบ้างเล็กน้อย

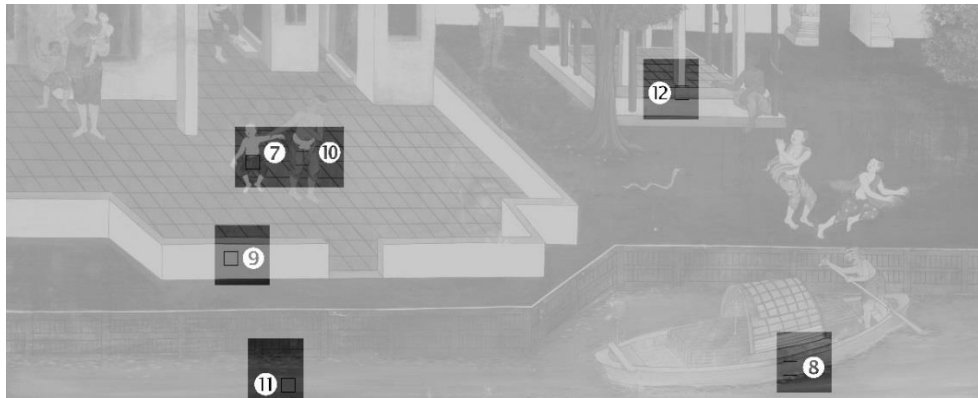
นำภาพดังกล่าวมาต่อภาพ (stitching images) ด้วยโปรแกรม Image Composite Editor เลือกใช้โหมดการปรับค่าด้วยตนเองโดยไม่เลือกการจัดการสีแบบอัตโนมัติ มีทิศทางในการต่อภาพเหมือนกับการถ่ายภาพย่อย 12 ภาพ เมื่อประมวลผลเสร็จจะได้ภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย 1 กรอบ จำนวน 5 ภาพ (5 จากนั้นทำการปรับความเที่ยงตรงสำหรับการซ้อนทับกัน (register) ของภาพทั้ง 5 ภาพ ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6 เริ่มจากทำ Layer register และตัดภาพในส่วนที่ไม่ต้องการออก รวมทั้งสร้างกรอบสำหรับตัดภาพขนาด 118 x 118 พิกเซล เพื่อใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม และกำหนดหมายเลขสีทั้งหมด 6 กรอบ (สี) ต่อ 1 ภาพจิตรกรรมฝาผนังภาพใหญ่ บันทึกไฟล์ภาพแยกเป็น 5 ภาพ ตามเดิมด้วยนามสกุล .BMP (24 bit) ตัวอย่างภาพจิตรกรรมที่สมบูรณ์แสดงตามภาพที่ 3.16 - 3.19 ทำการวัดค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพทั้ง 12 ภาพย่อย ซึ่งจะวัด 9 จุด ตามภาพที่ 3.20 ด้วยเครื่อง Illuminance Spectrophotometer Model CL-500A



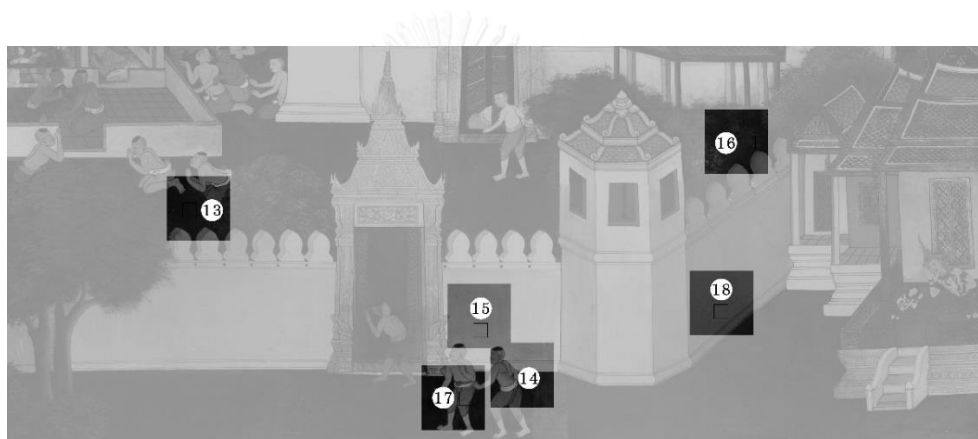
ภาพที่ 3.16 บริเวณของภาพถ่ายที่กำหนดกรอบตัดภาพและระบุหมายเลขสี



ภาพที่ 3.17 ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 1 ที่ระบุหมายเลขสี



ภาพที่ 3.18 ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 2 ที่ระบุหมายเลขสี



ภาพที่ 3.19 ภาพถ่ายจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 3 ที่ระบุหมายเลขสี

	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
1	2	3	4
8	7	6	5
9	10	11	12

ภาพที่ 3.20 ตำแหน่งวัดค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพย่อย

3.2.11 ฐานข้อมูลสีสำหรับประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม

ฐานข้อมูลสีที่ใช้ในการประมาณค่า แบ่งออกเป็น 3 ชุดดังนี้

3.2.11.1 ฐานข้อมูลสีชุดที่ 1

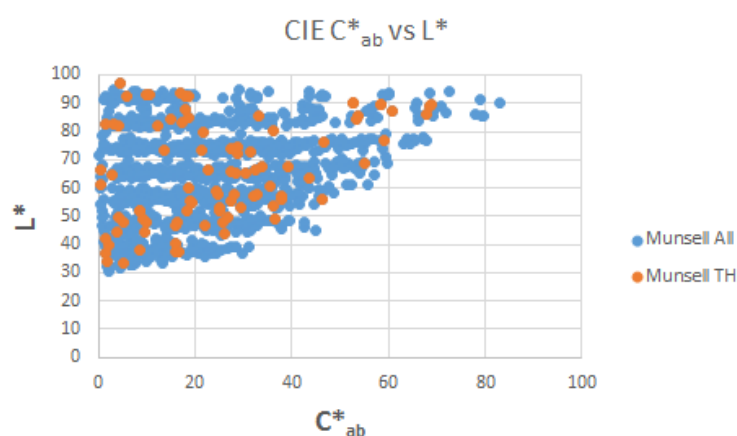
ใช้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่วัดค่าจากแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี ซึ่งเป็นชุดสีเดียวกับชุดสีที่ใช้เขียนอัลกอริทึม และทดสอบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์

3.2.11.2 ฐานข้อมูลสีชุดที่ 2

ใช้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจำนวน 154 สี ซึ่งวัดค่าจากแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี ร่วมกับแผ่นสี NCS จำนวน 46 สี ซึ่งเลือกจากชื่อสี Munsell และ NCS ที่ไม่ซ้ำกันตามที่ระบุอยู่ในงานวิจัยชื่อสีในจิตรกรรมไทย [36] และสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี

3.2.11.3 ฐานข้อมูลสีชุดที่ 3

ใช้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจำนวน 1178 สี ที่วัดค่าจากแผ่นสี Munsell ซึ่งพิจารณาเปรียบเทียบค่า C^*_{ab} กับแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี ตามที่ระบุอยู่ในงานวิจัยชื่อสีในจิตรกรรมไทย [36] ตามภาพที่ 3.21 แผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สีใน Munsell Book of Color ที่ถูกแบ่งตาม Hue โดยสีที่มีส่วนของ Chroma สูงสุดในแต่ละ Hue (/10 /12 และ /14) จะถูกคัดออกเหลือสี Munsell จำนวน 1160 สี นำมารวมกับสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี (ภาคผนวก ข) ได้เป็นฐานข้อมูลสีชุดที่ 3



ภาพที่ 3.21 ค่า CIE C^*_{ab} กับ L^* ของแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี และแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี ที่ระบุอยู่ในงานวิจัยชื่อสีในจิตรกรรมไทย

3.2.12 ประเมินค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยแบบวีเนอร์

การประเมินค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม แบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 ใช้ฐานข้อมูลสีจากหัวข้อ 3.2.11.1 กรณีศึกษาที่ 2 ใช้ฐานข้อมูลสีจากหัวข้อ 3.2.11.2 และกรณีศึกษาที่ 3 ใช้ฐานข้อมูลสีจากหัวข้อ 3.2.11.3 ในการประเมินค่า แสดงผลการประเมินค่าเป็นกราฟการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในการประเมินค่าด้วย RMSE แปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีที่ประเมินค่าได้เป็นค่าสี CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} ตามหัวข้อ 2.1.6 โดยใช้ค่าการกระจายพลังของแหล่งแสงตามภาพที่ 3.6 และ Color matching functions 2° standard observer พร้อมกับคำนวณค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 (ΔE_{00}) ตามหัวข้อ 2.17 และใช้ One-way ANOVA ตามหัวข้อ 2.1.7.2 ทดสอบสมมติฐานของค่าความแตกต่างสีจาก 3 กรณีศึกษา ว่าต่างกันหรือไม่ ซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่ออภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย



บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

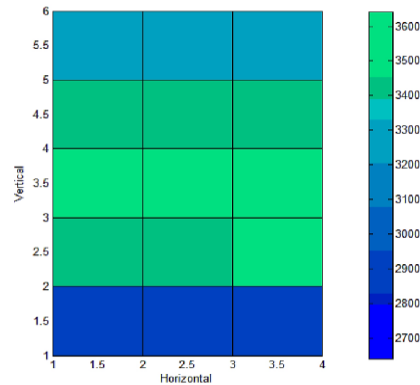
งานวิจัยนี้ศึกษาการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ ของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัม ส่วนการถ่ายภาพมัลติสเปกตรัมจะถ่ายภาพจริงของจิตรกรรมฝาผนังไทยทั้งหมด 3 ภาพ และทำการวัดค่าสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยทั้งหมดจำนวน 18 สี การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา ดังนี้ กรณีศึกษาที่ 1 ใช้ฐานข้อมูลสีจำนวน 1300 สี จากแผ่นสี Munsell กรณีศึกษาที่ 2 ใช้ฐานข้อมูลสีจำนวน 154 สี จากแผ่นสี Munsell จำนวน 90 สี จากแผ่นสี NCS จำนวน 46 สี และสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี กรณีศึกษาที่ 3 ใช้ฐานข้อมูลสีจำนวน 1178 สี ซึ่งคัดจากแผ่นสี Munsell จำนวน 1300 สี โดยคัดแผ่นสีที่มีส่วนของ Chroma สูงสุดในแต่ละ Hue ออกเหลือสีจำนวน 1160 สี ร่วมกับสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี ในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม แสดงผลเป็นกราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสี คำนวณค่าความคลาเคลื่อนในการประมาณค่าด้วย RMSE แปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีที่ประมาณค่าได้เป็นค่าสี CIE L^* , a^* , b^* , C^*_{ab} , และ h° คำนวณ ΔL^* , ΔC^*_{ab} พร้อมกับคำนวณค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 (ΔE_{00}) โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการประมาณกับค่าที่วัดได้จากสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ของแต่ละสี ซึ่งใช้ค่าดังกล่าวพิจารณาผลการวิจัย โดยแบ่งการอภิปรายผลการวิจัยตามกรณีศึกษา ดังนี้ 4.1 ค่าความสว่างของแหล่งแสงขณะทำการวิจัย 4.2 ภาพจำลองการต่อภาพ 4.3 กรณีศึกษาที่ 1 4.4 กรณีศึกษาที่ 2 4.5 กรณีศึกษาที่ 3 และ 4.6 เปรียบเทียบการประมาณค่าทั้ง 3 กรณีศึกษา

4.1 ค่าความสว่างของแหล่งแสงขณะทำการวิจัย

ค่าความสว่างวัดค่าในหน่วย lux ซึ่งแบ่งการวัดค่า ดังนี้

4.1.1 ค่าความสว่างขณะวัดค่าการสะท้อนแสงของสีภายในตู้แสง

วัดค่าความสว่าง (lux) ในบริเวณพื้นที่วัดค่าภายในตู้แสงทั้งหมด 15 จุด ตามภาพที่ 3.10 มีผลการวัดค่าดังแสดงในภาพที่ 4.1

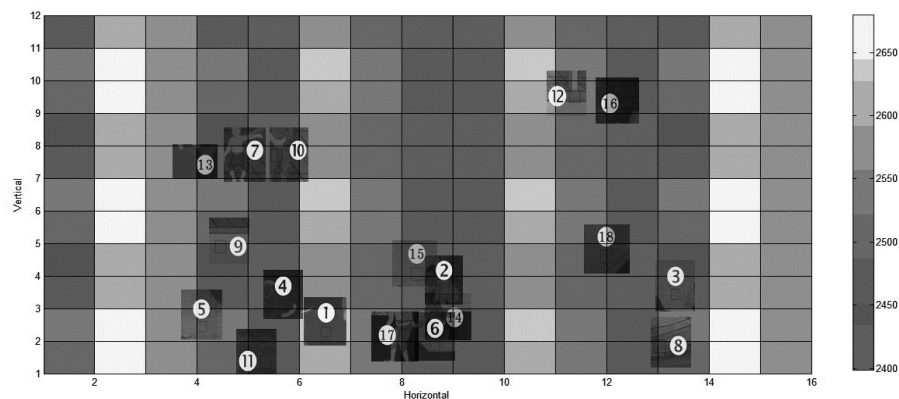


ภาพที่ 4.1 ค่าความสว่าง (lux) บริเวณที่วัดค่าภายในตู้แสงทั้งหมด 15 จุด

จากภาพที่ 4.1 พบว่าค่าความสว่าง (lux) ในบริเวณพื้นที่วัดค่าภายในตู้แสงทั้งหมด 15 จุด มีความแตกต่างกัน เนื่องจากความไม่ uniform ของ 2 แหล่งแสง ซึ่งอาจจะส่งผลให้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีที่วัดค่าได้เพื่อใช้สำหรับเป็นฐานข้อมูลสีในการประมาณค่ามีความคลาดเคลื่อน

4.1.2 ค่าความสว่างขณะถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย

วัดค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยทั้งหมด ซึ่งวัดค่า 9 จุดต่อ 1 ภายย่อย ตามภาพที่ 3.20 มีผลการวัดค่าพร้อมแสดงตำแหน่งของสีฝุ่นจำนวน 18 สี ดังแสดงในภาพที่ 4.2



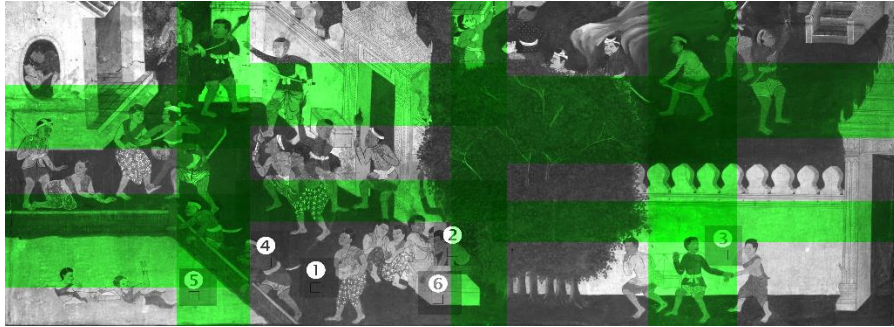
ภาพที่ 4.2 ค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพแต่ละจุด

พร้อมกับตำแหน่งของสีฝุ่น จำนวน 18 สี บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย

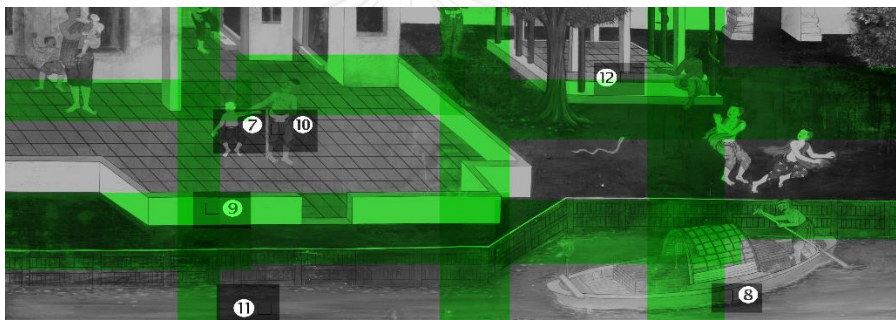
จากภาพที่ 4.2 พบว่าค่าความสว่าง (lux) ขณะถ่ายภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยทุกจุดที่ทำการวัดค่ามีความแตกต่างกัน เนื่องจากความไม่ uniform ของ 2 แหล่งแสง ซึ่งอาจส่งผลต่อภาพมัลติสเปกตรัมที่ถ่ายได้ รวมทั้งการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีจากภาพมัลติสเปกตรัมอาจมีความคลาดเคลื่อน

4.2 ภาพจำลองการต่อภาพ

การต่อภาพย่อยของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยทั้ง 12 ภาพ จะถูกประมวลโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรมต่อภาพ ซึ่งจำลองการต่อภาพได้ดังนี้



ภาพที่ 4.3 จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 1



ภาพที่ 4.4 จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 2



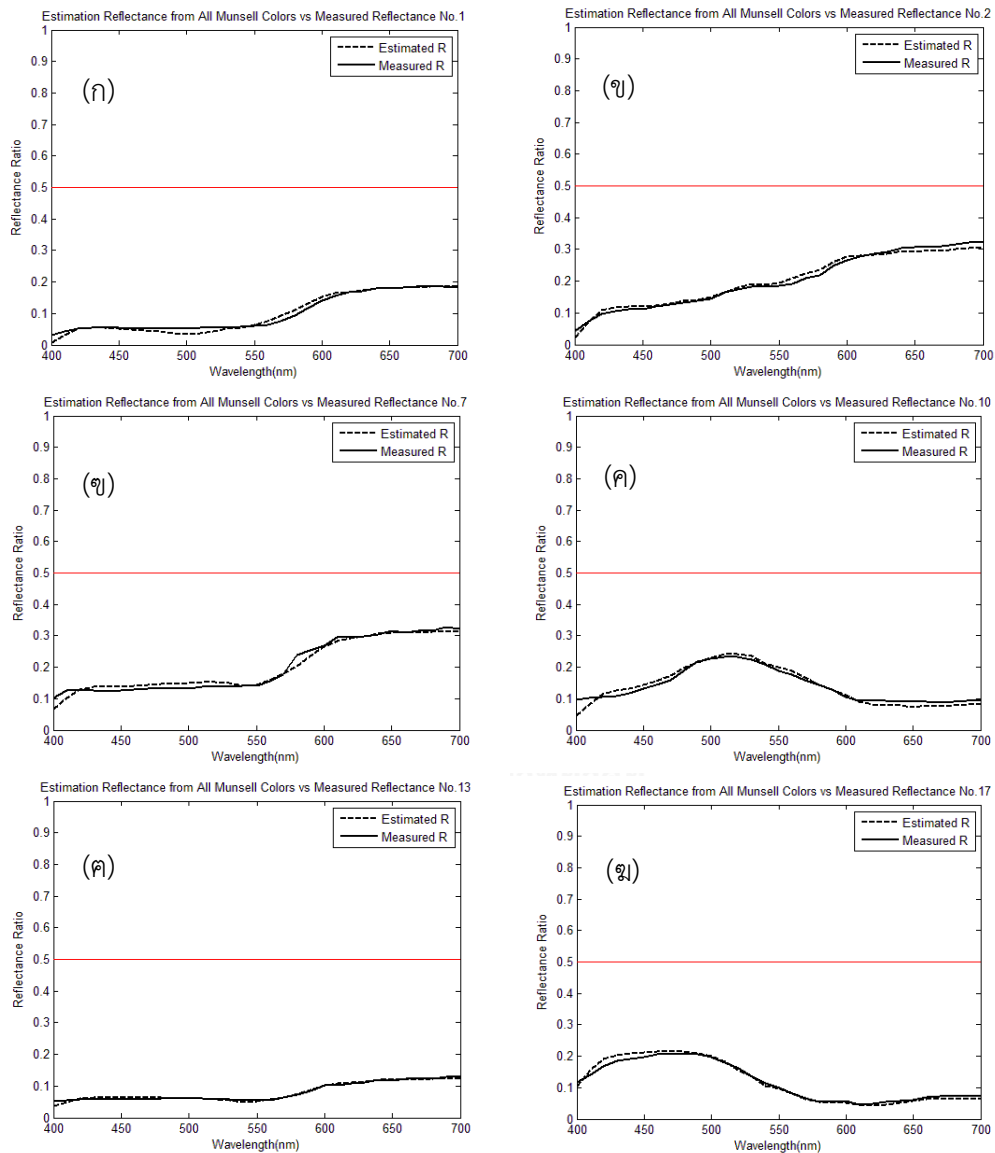
ภาพที่ 4.5 จำลองรอยต่อของภาพพร้อมหมายเลขสีฝุ่นของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยภาพที่ 3

จากภาพที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 พบว่ารอยต่อของภาพมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการประมวลผลและเฉลี่ยค่าพิกเซลบริเวณรอยต่อโดยโปรแกรมต่อภาพ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นจากภาพถ่ายมัลติสเปกตรัมด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์

4.3 กรณีศึกษาที่ 1

ประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่น จำนวน 18 สี บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย 3 ภาพ โดย
ใช้ฐานข้อมูลสี จำนวน 1300 สี จากแผ่นสี Munsell ตามหัวข้อ 3.2.11.1 ได้ผลการทดลองดังนี้

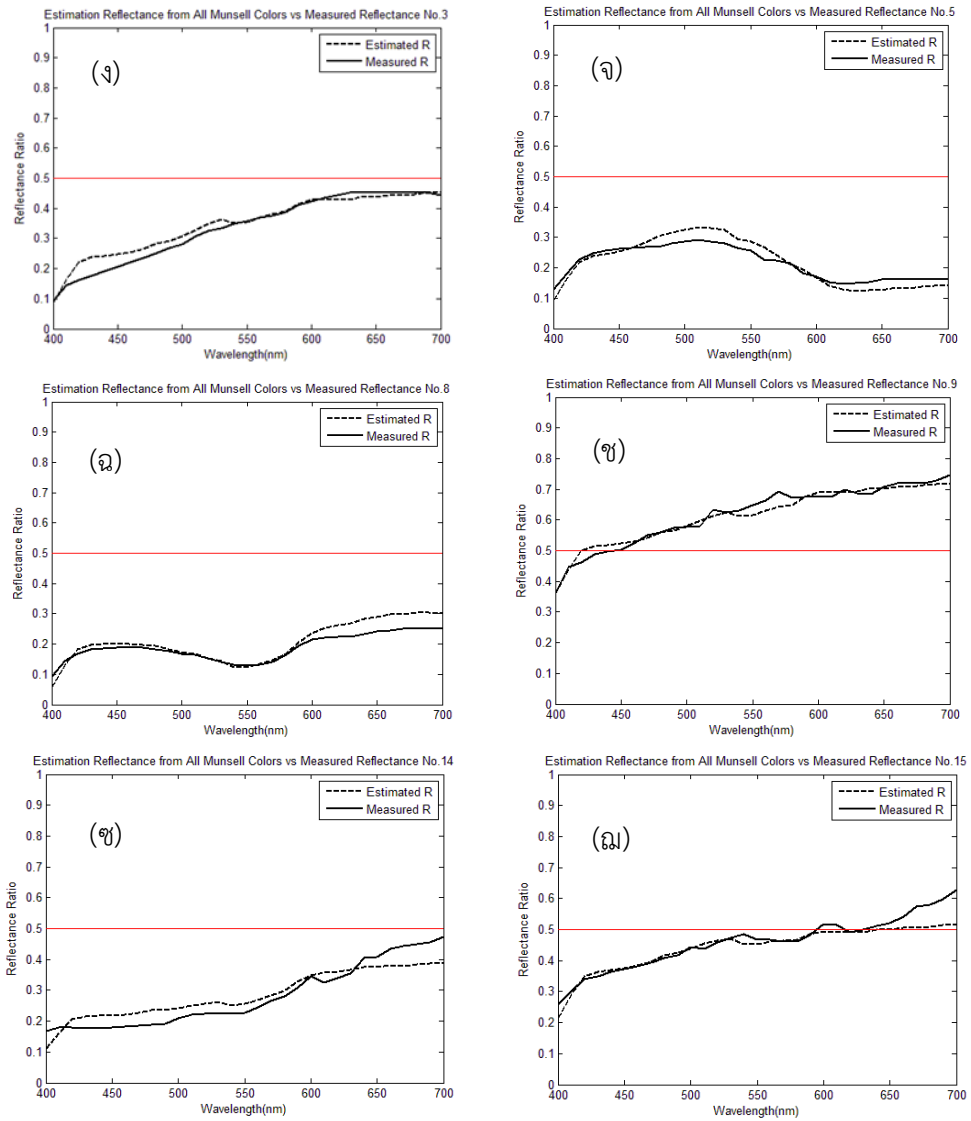
4.3.1 กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น



ภาพที่ 4.6 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1

ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2

(ค) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ง) สีฝุ่นหมายเลข 17



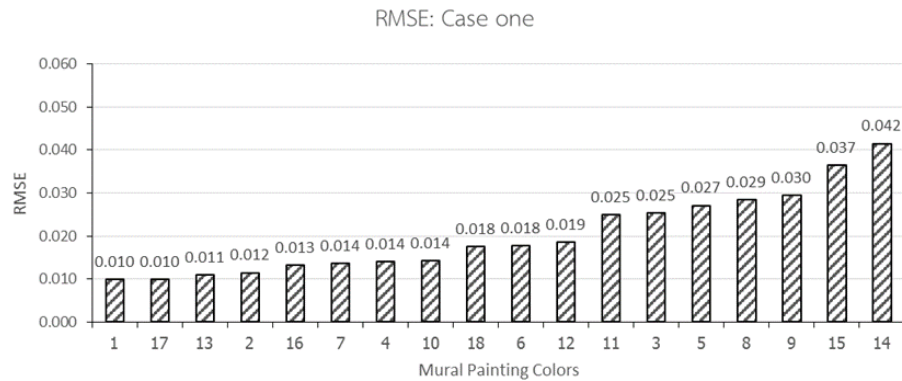
ภาพที่ 4.7 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1
 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5
 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ซ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ณ) สีฝุ่นหมายเลข 15

จากภาพที่ 4.6 (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 17 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงตลอดช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยตามหมายเลขดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) ขณะทำการถ่ายภาพ สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่ไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.3 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 1 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานะข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

จากภาพที่ 4.7 (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 15 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าต่างจากค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.3 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 3 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานะข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)

การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าด้วยวิธีวีเนอร์ คำนวณความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าด้วย Root mean square error (RMSE) เป็นการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าที่วัดได้จริง มีผลดังนี้

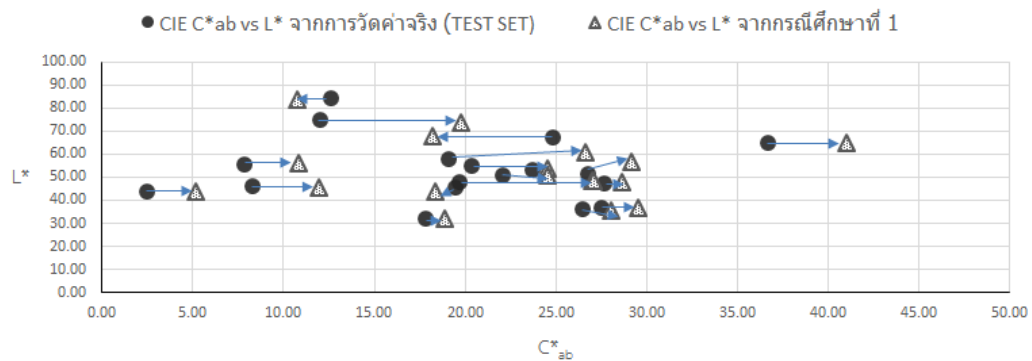


ภาพที่ 4.8 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1

จากภาพที่ 4.8 สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 1 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.010 ซึ่งน้อยที่สุดและมีค่าเข้าใกล้ 0 เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 1 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันน้อย ส่วนสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 14 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.042 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 14 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันมาก

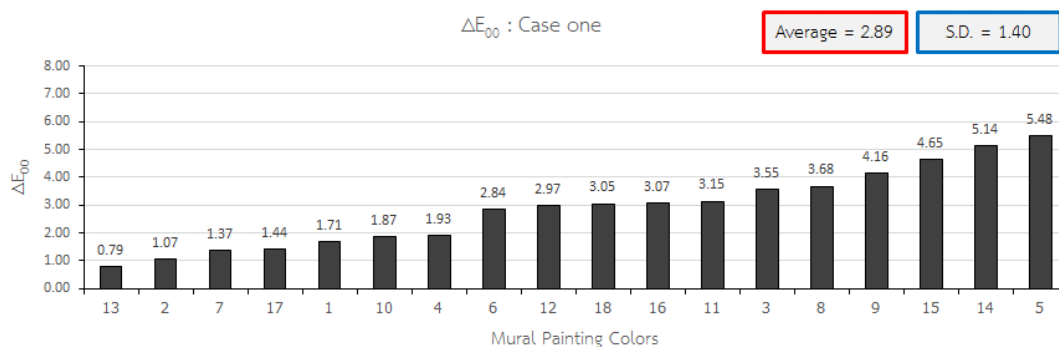
4.3.3 ค่าความแตกต่างของสี CIEDE2000 (ΔE_{00})

การเปรียบเทียบค่าสีจะแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมไปเป็นค่า CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} และคำนวณค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 Color Difference Formula (ΔE_{00}) เปรียบเทียบค่าสีที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าสีที่วัดได้จริง มีผลดังนี้



ภาพที่ 4.9 ค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 1

จากภาพที่ 4.9 พบว่าความแตกต่างของค่า L^* ของสีที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 1 ส่วนใหญ่แตกต่างกันน้อย แต่ความแตกต่างของค่า C^*_{ab} ของสีมีความแตกต่างกัน โดยสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 1 ค่า C^*_{ab} มีแนวโน้มที่มากกว่าสีที่วัดได้จริง เนื่องมาจากค่าการสะท้อนบางช่วงของความยาวคลื่นของสีที่ประมาณค่าได้มีความแตกต่างจากค่าการสะท้อนแสงของสีที่วัดได้จริง



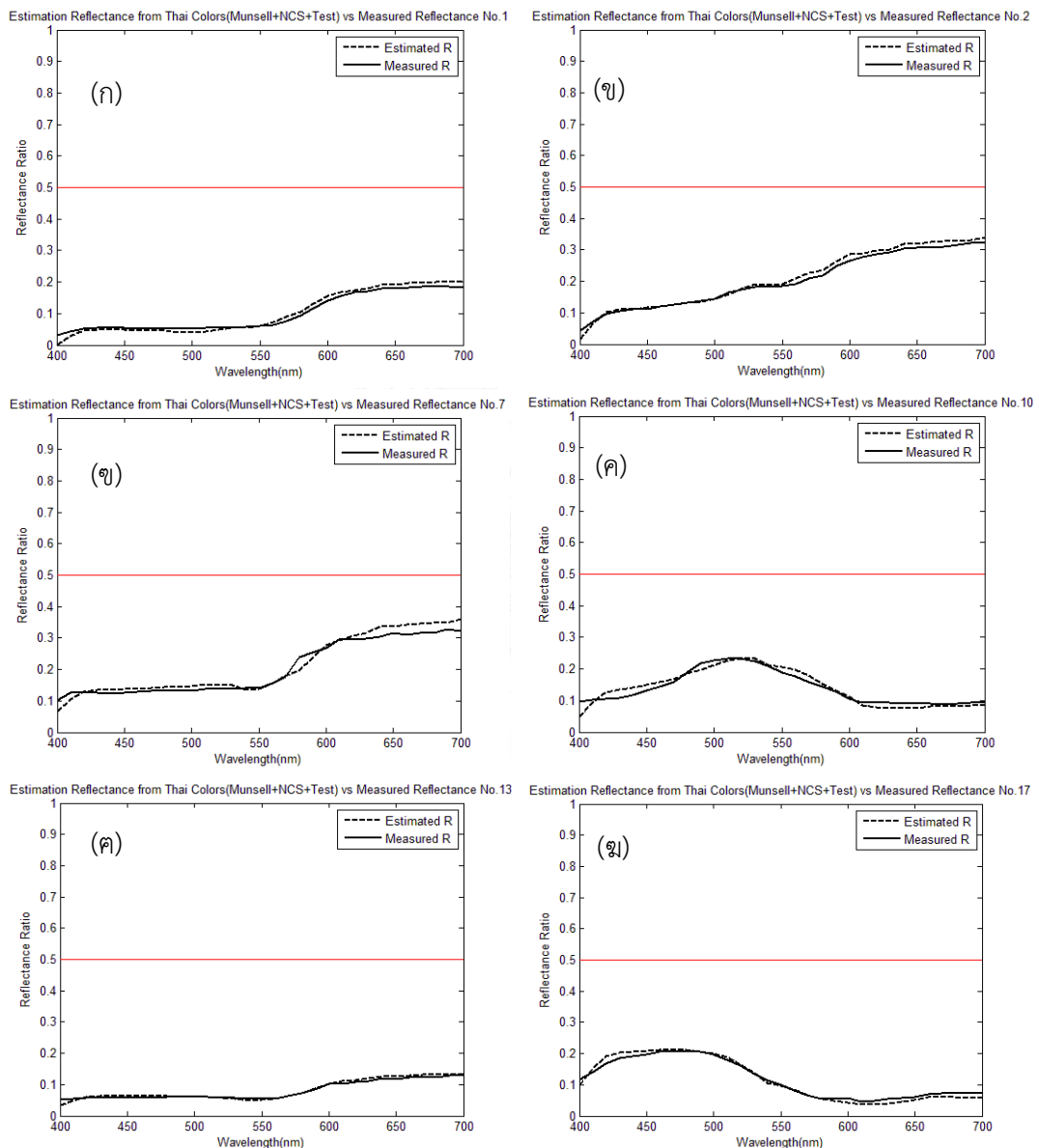
ภาพที่ 4.10 ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกรณีศึกษาที่ 1

จากภาพที่ 4.10 พบว่าค่าความแตกต่างของสี (ΔE_{00}) ที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.89 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.40 แสดงถึงค่าความแตกต่างสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 1 มีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยน้อยกว่า 3 หน่วย และเมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแตกต่างของสีแต่ละสีแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมาก สีฝุ่นหมายเลข 13 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 0.79 ซึ่งน้อยที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 13 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.5 อยู่บริเวณที่ไม่ใช่รอยต่อของภาพ จึงไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ส่วนฝุ่นหมายเลข 5 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 5.48 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 13 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.5 อยู่บริเวณที่เป็นรอยต่อของภาพ จึงมีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.4 กรณีศึกษาที่ 2

ประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่น จำนวน 18 สี บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย 3 ภาพ โดย
ใช้ฐานข้อมูลสีจำนวน 154 สี ตามหัวข้อ 3.2.11.2 ได้ผลการทดลองดังนี้

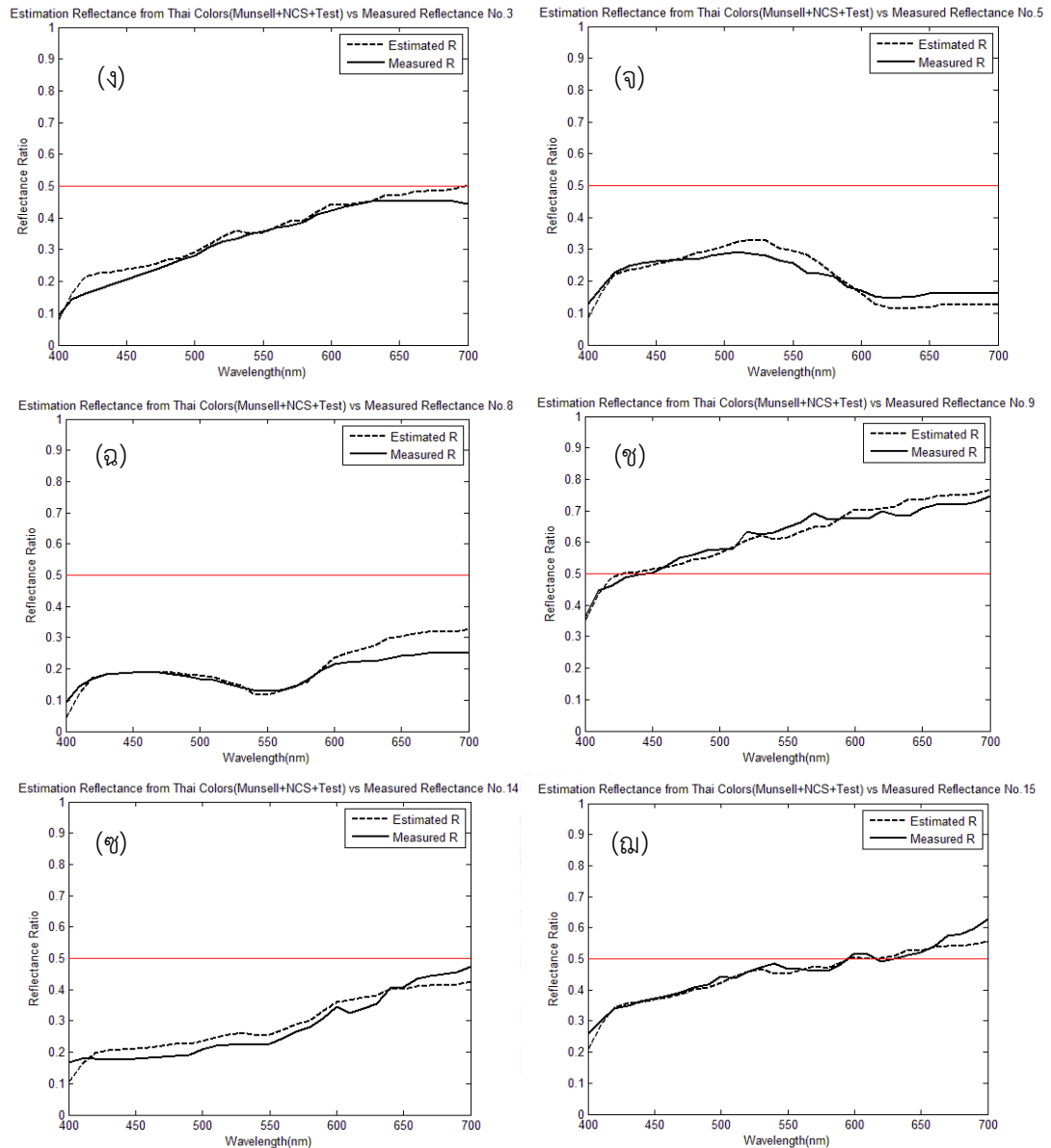
4.4.1 กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น



ภาพที่ 4.11 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2

ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2

(ง) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 17



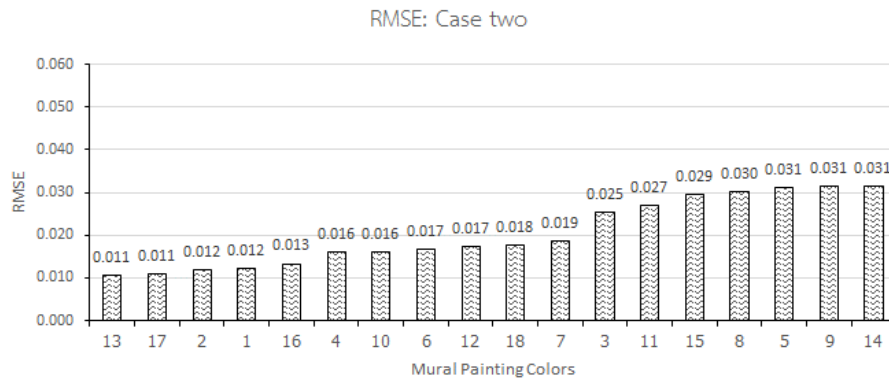
ภาพที่ 4.12 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ซ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ณ) สีฝุ่นหมายเลข 15

จากภาพที่ 4.11 (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 2 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 17 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงตลอดช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยตามหมายเลขดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) ขณะทำการถ่ายภาพ สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่ไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.5 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 13 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

จากภาพที่ 4.12 (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 15 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าต่างจากค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.5 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 14 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)

การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าด้วยวิธีวีเนอร์ คำนวณความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าด้วย Root mean square error (RMSE) เป็นการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าที่วัดได้จริง มีผลดังนี้

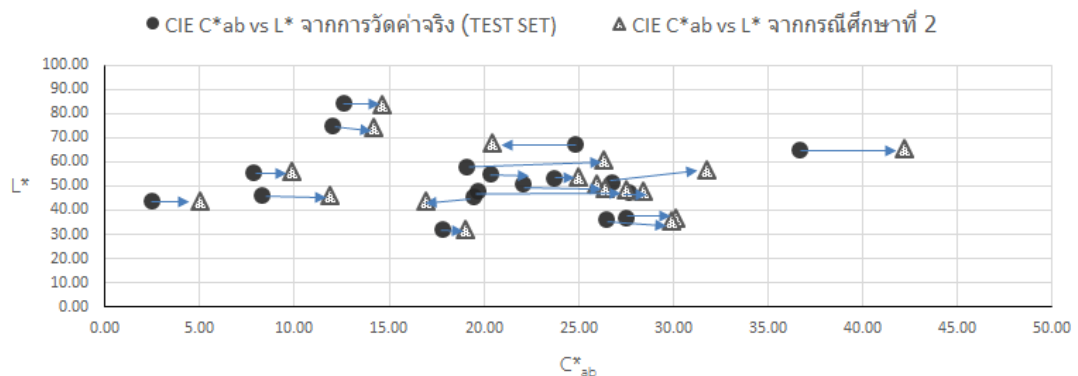


ภาพที่ 4.13 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2

จากภาพที่ 4.13 สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 13 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.011 ซึ่งน้อยที่สุดและมีค่าเข้าใกล้ 0 เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 13 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันน้อย ส่วนสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 14 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.031 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 14 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันมาก

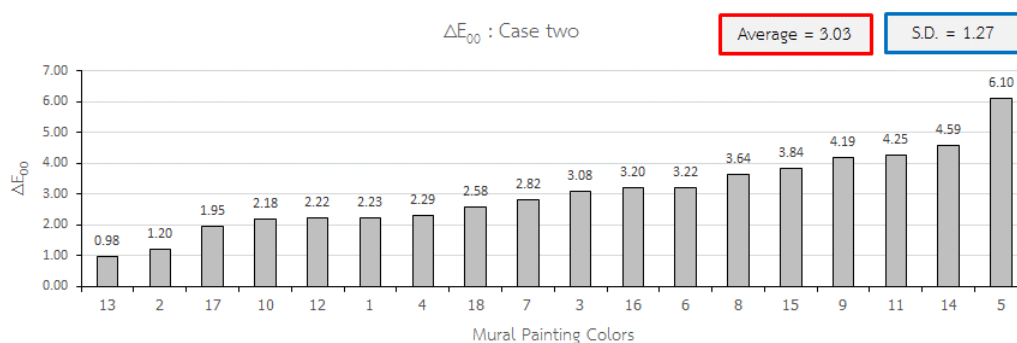
4.4.3 ค่าความแตกต่างของสี CIEDE2000 (ΔE_{00})

การเปรียบเทียบค่าสีจะแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมไปเป็นค่า CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} และคำนวณค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 Color Difference Formula (ΔE_{00}) เปรียบเทียบค่าสีที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าสีที่วัดได้จริง มีผลดังนี้



ภาพที่ 4.14 ค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 2

จากภาพที่ 4.14 พบว่าความแตกต่างของค่า L^* ของสีที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 ส่วนใหญ่แตกต่างกันน้อย แต่ความแตกต่างของค่า C^*_{ab} ของสีมีความแตกต่างกันโดยสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 ค่า C^*_{ab} มีแนวโน้มที่มากกว่าสีที่วัดได้จริง เนื่องจากค่าการสะท้อนบางช่วงของความยาวคลื่นของสีที่ประมาณค่าได้ มีความแตกต่างจากค่าการสะท้อนแสงของสีที่วัดได้จริง



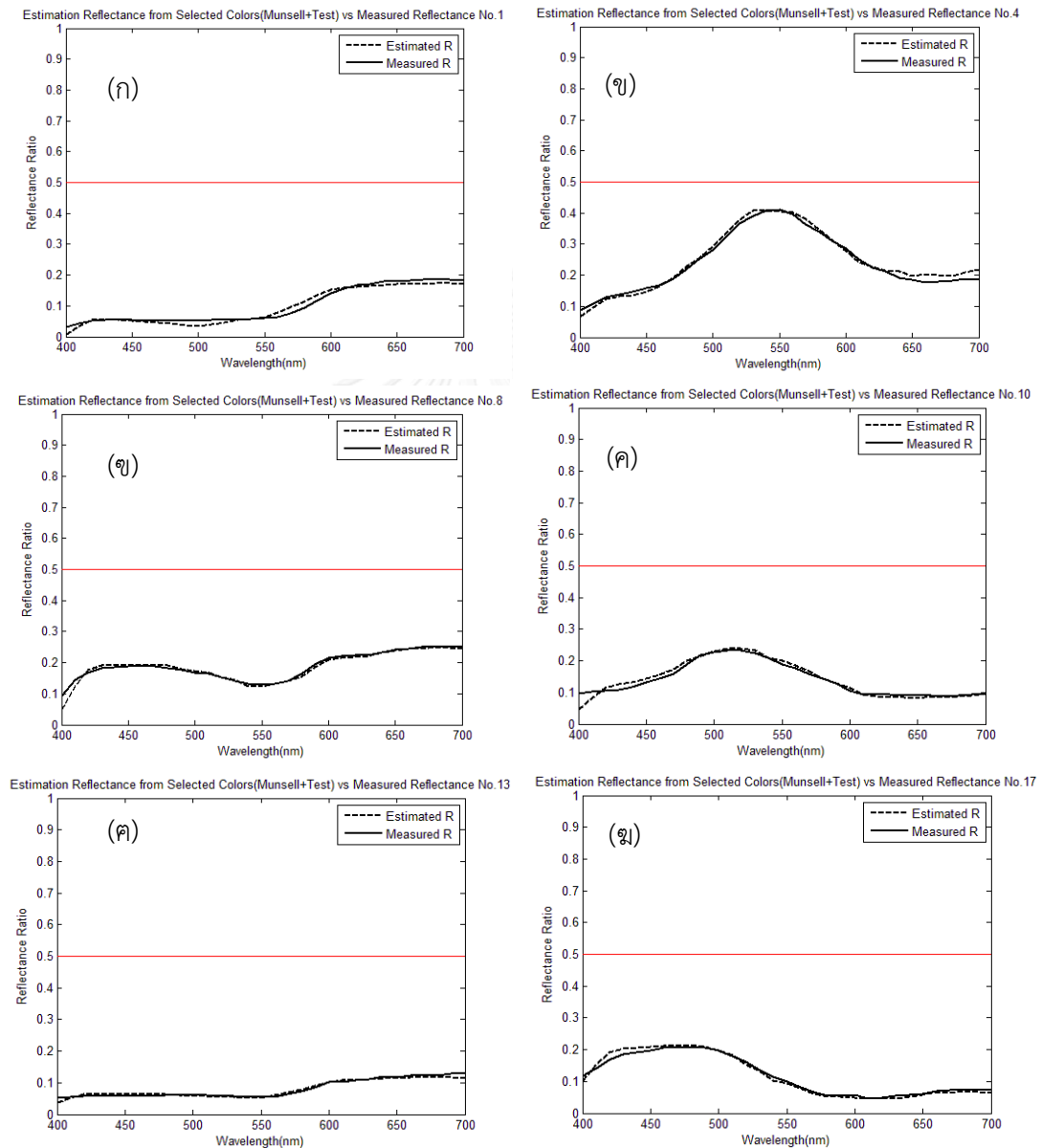
ภาพที่ 4.15 ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากกรณีศึกษาที่ 2

จากภาพที่ 4.15 พบว่าค่าความแตกต่างของสี (ΔE_{00}) ที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.03 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.27 แสดงถึงความแตกต่างสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยมากกว่า 3 หน่วย และเมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแตกต่างของสีแต่ละสีแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมาก สีฝุ่นหมายเลข 13 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 0.98 ซึ่งน้อยที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 13 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.5 อยู่บริเวณที่ไม่ใช่รอยต่อของภาพ จึงไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ส่วนฝุ่นหมายเลข 5 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 6.10 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 5 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.3 อยู่บริเวณที่เป็นรอยต่อของภาพ จึงมีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.5 กรณีศึกษาที่ 3

ประมาณค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่น จำนวน 18 สี บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย 3 ภาพ โดย
ใช้ฐานข้อมูลสีจำนวน 1178 สี ตามหัวข้อ 3.2.11.3 ได้ผลการทดลองดังนี้

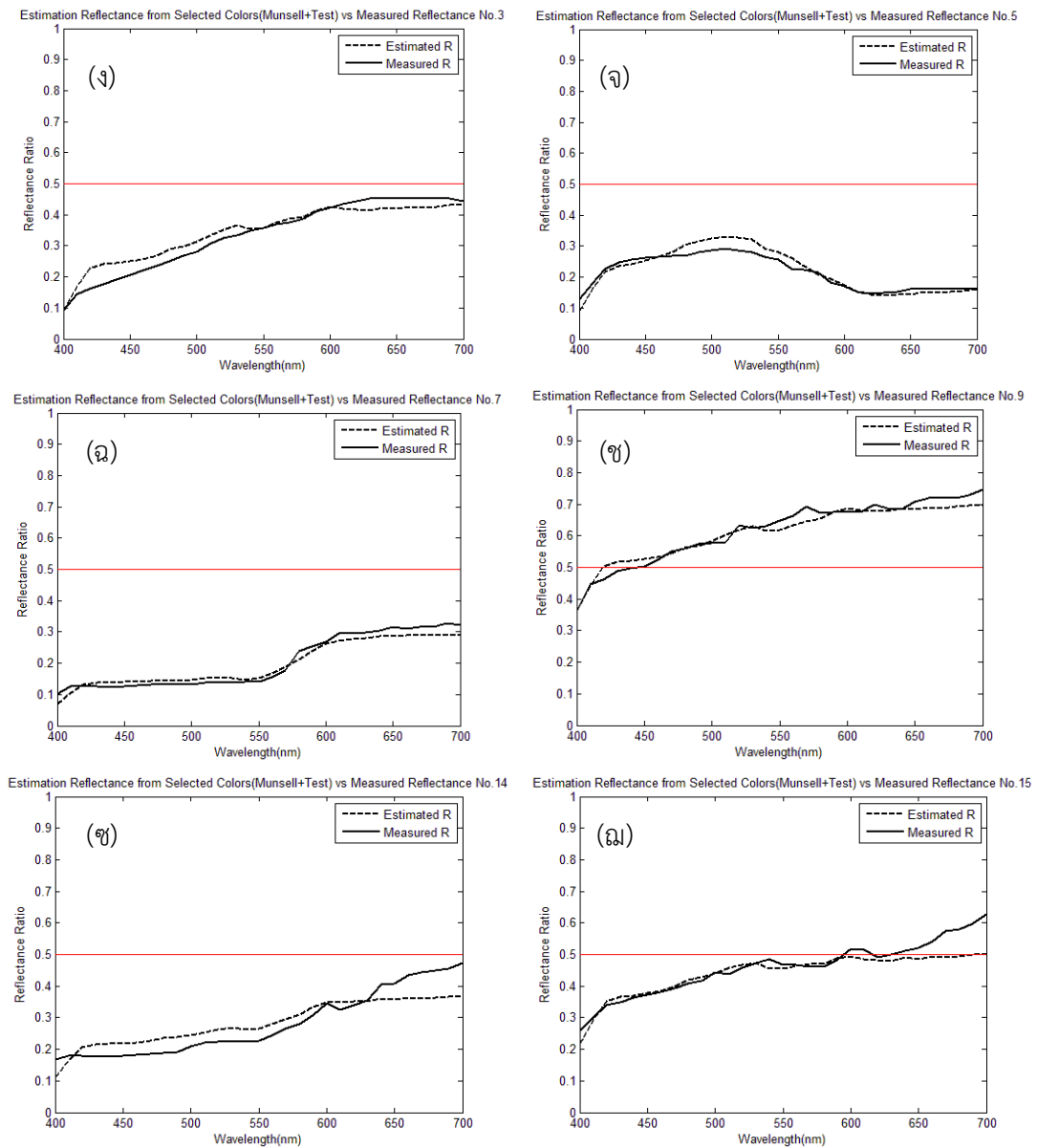
4.5.1 กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น



ภาพที่ 4.16 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3

ที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 4

(ค) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 17



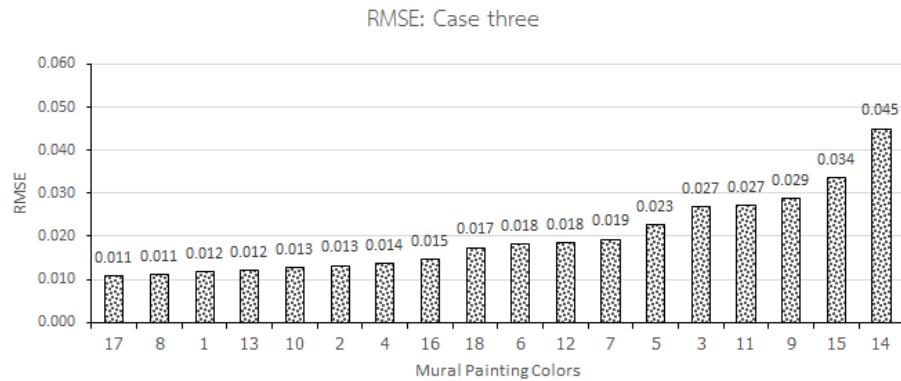
ภาพที่ 4.17 ค่าการค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3 ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้ (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ช) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ซ) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฌ) สีฝุ่นหมายเลข 15

จากภาพที่ 4.16 (ก) สีฝุ่นหมายเลข 1 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 4 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 8 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 10 (ค) สีฝุ่นหมายเลข 13 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 17 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงตลอดช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยตามหมายเลขดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) ขณะทำการถ่ายภาพ สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่ไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.5 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 13 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานะข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่สว่างกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

จากภาพที่ 4.17 (ง) สีฝุ่นหมายเลข 3 (จ) สีฝุ่นหมายเลข 5 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 7 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 9 (ข) สีฝุ่นหมายเลข 14 (ฉ) สีฝุ่นหมายเลข 15 ที่มีค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่ได้จากการประมาณค่าต่างจากค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยดังกล่าว แล้วพบว่าอยู่ในบริเวณที่มีค่าความสว่าง (lux) มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน และตำแหน่งของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย อยู่ในบริเวณต่อภาพที่มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพ ดังแสดงตามภาพที่ 4.5 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 14 เป็นต้น รวมทั้งสีในฐานะข้อมูลสีในกรณีศึกษาที่ 3 ซึ่งใช้ประมาณค่าอาจจะอยู่ในบริเวณพื้นที่การวัดค่าภายในตู้แสงที่มีต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ค่าที่ประมาณได้ต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)

การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าด้วยวิธีวีเนอร์ คำนวณความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าด้วย Root mean square error (RMSE) เป็นการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าที่วัดได้จริง มีผลดังนี้

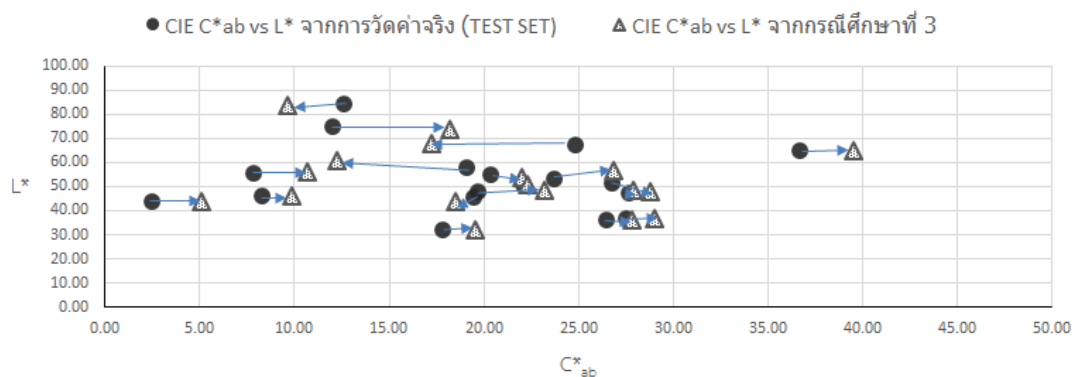


ภาพที่ 4.18 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3

จากภาพที่ 4.18 สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 17 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.011 ซึ่งน้อยที่สุดและมีค่าเข้าใกล้ 0 เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 17 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันน้อย ส่วนสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหมายเลข 14 มีค่า RMSE เท่ากับ 0.045 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ประมาณค่าได้กับค่าที่วัดได้จริงของสีฝุ่นหมายเลข 14 แต่ละจุดตลอดช่วงความยาวคลื่นมีความแตกต่างกันมาก

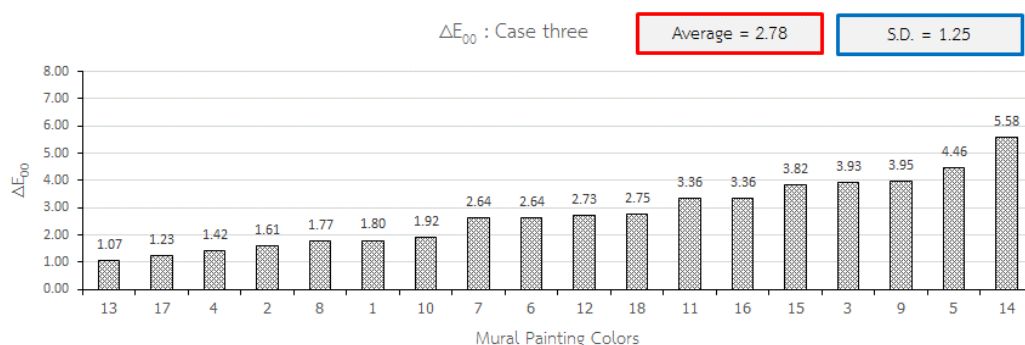
4.5.3 ค่าความแตกต่างของสี CIEDE2000 (ΔE_{00})

การเปรียบเทียบค่าสีจะแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมไปเป็นค่า CIE L^* , a^* , b^* และ C^*_{ab} และคำนวณค่าความแตกต่างสีด้วย CIEDE2000 Color Difference Formula (ΔE_{00}) เปรียบเทียบค่าสีที่ได้จากการประมาณค่ากับค่าสีที่วัดได้จริง มีผลดังนี้



ภาพที่ 4.19 ค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากการวัดค่าจริง (Test set) กับค่า CIE C^*_{ab} vs L^* จากค่าสีที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3

จากภาพที่ 4.19 พบว่าความแตกต่างของค่า L^* ของสีที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 2 ส่วนใหญ่แตกต่างกันน้อย แต่ความแตกต่างของค่า C^*_{ab} ของสีมีความแตกต่างกันโดยสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 3 ค่า C^*_{ab} มีแนวโน้มที่มากกว่าสีที่วัดได้จริง เนื่องจากค่าการสะท้อนบางช่วงของความยาวคลื่นของสีที่ประมาณค่าได้ มีความแตกต่างจากค่าการสะท้อนแสงของสีที่วัดได้จริง



ภาพที่ 4.20 ค่าความแตกต่างสี (ΔE_{00}) พร้อมค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากกรณีศึกษาที่ 3

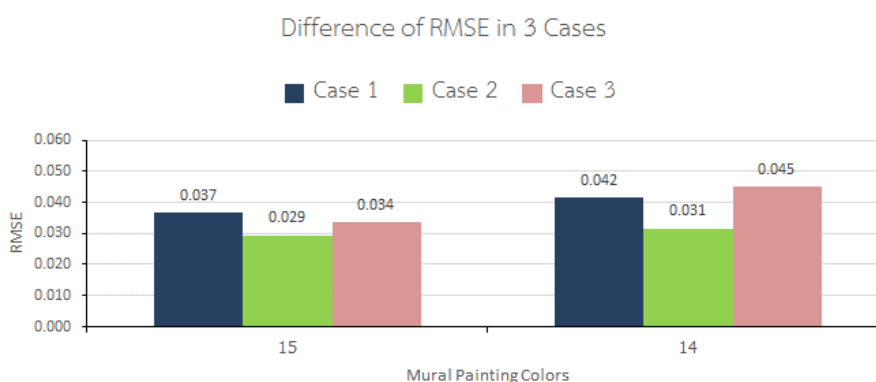
จากภาพที่ 4.20 พบว่าค่าความแตกต่างของสี (ΔE_{00}) ที่วัดได้จริงกับสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.78 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.25 แสดงถึงค่าความแตกต่างสีที่ได้จากการประมาณค่าจากกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยน้อยกว่า 3 หน่วย และเมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าความแตกต่างของสีแต่ละสีแตกต่างจากค่าเฉลี่ยมาก สีฝุ่นหมายเลข 13 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 1.07 ซึ่งน้อยที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 13 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.5 อยู่บริเวณที่ไม่ใช่รอยต่อของภาพ จึงไม่ได้มีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ส่วนฝุ่นหมายเลข 14 มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 5.58 ซึ่งมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งของสีฝุ่นหมายเลข 14 บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย ตามภาพที่ 4.5 อยู่บริเวณที่เป็นรอยต่อของภาพ จึงมีการเฉลี่ยค่าพิกเซลของภาพและทำให้ค่าสีที่ได้จากการประมาณค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง

4.6 เปรียบเทียบการประมาณค่าทั้ง 3 กรณีศึกษา

การเปรียบเทียบการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมทั้ง 3 กรณีศึกษา จะแบ่งการเปรียบเทียบตามหัวข้อดังนี้

4.6.1 ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE)

จากกรณีศึกษาที่ 1 ตามภาพที่ 4.8 กรณีศึกษาที่ 2 ตามภาพที่ 4.13 กรณีศึกษาที่ 3 ตามภาพที่ 4.18 ผลค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น (RMSE) ที่คำนวณได้ของสีส่วนใหญ่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีเพียงบางสีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSE) แตกต่างกันทั้ง 3 กรณีศึกษา ตามภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 RMSE ของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยที่แตกต่างทั้ง 3 กรณีศึกษา

จากภาพที่ 4.21 สีฝุ่นหมายเลข 15 และ 14 แตกต่างกันทั้ง 3 กรณีศึกษา เนื่องจากแต่ละกรณีศึกษาใช้ฐานข้อมูลสีที่ต่างกันในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม โดยผลจากกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ค่า RMSE แตกต่างกันไม่มากเพราะใช้ฐานข้อมูลสีส่วนใหญ่มาจากสี Munsell เหมือนกัน ส่วนกรณีศึกษาที่ 2 แตกต่างกับกรณีศึกษาอื่น ๆ เพราะเป็นกรณีศึกษาเดียวที่ใช้ฐานข้อมูลจากสี NCS ร่วมกับสี Munsell และสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย มาใช้ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม

4.6.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของสี CIEDE2000 (ΔE_{00})

ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) จากทั้ง 3 กรณีศึกษา มีผลดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) จาก 3 กรณีศึกษา (คำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS)

DE00			
Case	N	Mean	Std. Deviation
1	18	2.88	1.40
2	18	3.03	1.27
3	18	2.78	1.25

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีจากทั้ง 3 กรณีศึกษา พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) เท่ากับ 2.78 ซึ่งน้อยที่สุดและค่าความแตกต่างสีมีค่าน้อยกว่า 3 หน่วย มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 1.25 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด แสดงถึงค่าความแตกต่างสีของสีฝุ่นทั้ง 18 สี ที่ประมาณค่าได้จากกรณีศึกษาที่ 3 มีการกระจายตัวของค่าความแตกต่างสีที่น้อยกว่ากรณีศึกษาอื่น ๆ

4.6.3 ทดสอบสมมติฐานทางการวิจัย

การทดสอบสมมติฐานทางการวิจัยนี้จะใช้ One-Way ANOVA โดยต้องการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสี จาก 3 กรณีศึกษา ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ซึ่งค่าความแตกต่างสีจาก 3 กรณีศึกษา มีผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) จาก 3 กรณีศึกษา

Case 1		Case 2		Case 3	
Color No.	ΔE_{00}	Color No.	ΔE_{00}	Color No.	ΔE_{00}
1	1.71	1	2.23	1	1.80
2	1.07	2	1.20	2	1.61
3	3.55	3	3.08	3	3.93
4	1.93	4	2.29	4	1.42
5	5.48	5	6.10	5	4.46
6	2.84	6	3.22	6	2.64
7	1.37	7	2.82	7	2.64
8	3.68	8	3.64	8	1.77
9	4.16	9	4.19	9	3.95
10	1.87	10	2.18	10	1.92
11	3.15	11	4.25	11	3.36
12	2.97	12	2.22	12	2.73
13	0.79	13	0.98	13	1.07
14	5.14	14	4.59	14	5.58
15	4.65	15	3.84	15	3.82
16	3.07	16	3.20	16	3.36
17	1.44	17	1.95	17	1.23
18	3.05	18	2.58	18	2.75

จากตารางที่ 4.2 พบว่าตัวแปรอิสระมี 1 ตัว คือ กรณีศึกษา ซึ่งแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา และตัวแปรตาม คือ ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (ΔE_{00}) โดยตั้งสมมติฐาน ดังนี้

สมมติฐานทางการวิจัย

H_0 : ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสีในแต่ละกรณีศึกษาไม่แตกต่างกัน

H_1 : มีอย่างน้อย 2 กรณีศึกษา ที่มีค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสีที่ต่างกัน

สมมติฐานทางสถิติ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k$

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่ ; $i \neq j$

การตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธ H_0 จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วน F ที่คำนวณได้เทียบกับอัตราส่วนจากตารางมาตรฐาน โดยที่จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อค่า F ที่คำนวณได้ มากกว่าค่า F ในตาราง หรือค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานของ F (Sig.) ที่คำนวณได้น้อยกว่า α หรือระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ซึ่งมีผลการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า F และ Sig. ที่คำนวณด้วยวิธี One-Way ANOVA

จาก 3 กรณีศึกษา โดยใช้โปรแกรม SPSS

DE00

Source	F	Sig.
Between Groups	.168	.846

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า F และ Sig. มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 แสดงถึงยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีในแต่ละกรณีศึกษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 4.4 ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบจับคู่พหุคูณ ในแต่ละกรณีศึกษา

แบ่งเป็นกรณีที่ค่าความแปรปรวนเท่ากันและค่าความแปรปรวนไม่เท่ากัน

	(I) ...	(J) ...	Sig.
Scheffe	1	2	.945
		3	.972
	2	1	.945
		3	.847
	3	1	.972
		2	.847
Tamhane	1	2	.983
		3	.994
	2	1	.983
		3	.911
	3	1	.994
		2	.911

จากตารางที่ 4.4 พบว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทั้งกรณีที่ค่าความแปรปรวนเท่ากันและค่าความแปรปรวนไม่เท่ากัน ทุกคู่ทดสอบค่า Sig. มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 แสดงถึงยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีในแต่ละกรณีศึกษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมแบบวีเนอร์ของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัม แบ่งกรณีศึกษาในการประมาณค่าออกเป็น 3 กรณี วิเคราะห์ผลการวิจัยโดย นำค่าการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีบนจิตรกรรมฝาผนังไทยจากภาพมัลติสเปกตรัมมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงแต่ละสี ซึ่งแสดงเป็นกราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่ได้จากการประมาณค่าแบบวีเนอร์กับค่าที่วัดได้จริง พร้อมกับคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมด้วย RMSE และค่าความแตกต่างของสีด้วย CIEDE2000 (ΔE_{00}) และเปรียบเทียบและทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี One-Way ANOVA ว่ากรณีศึกษาใดให้ผลการประมาณค่าสีที่แตกต่างจากค่าสีที่วัดค่าได้น้อยที่สุด แบ่งการสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลของกราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม

การประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น ซึ่งอยู่บนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยจำนวน 3 ภาพ (18 สี) จากผลการทดลองทั้งหมด 3 กรณีศึกษาที่ใช้ฐานข้อมูลสีต่างกันในการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมด้วยวิธีวีเนอร์ พบว่าสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงจากเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ แต่บางสีมีกราฟค่าการสะท้อนแสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่ได้จากการประมาณค่าแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริงมาก เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่าเกิดจากความไม่ Uniform ของความเข้มแสงแต่ละจุดขณะถ่ายภาพ จึงทำให้ภาพที่ถ่ายได้มีค่าพิกเซลที่คลาดเคลื่อน รวมทั้งการต่อภาพจะมีการเฉลี่ยค่าพิกเซลบริเวณรอยต่อของภาพย่อย ที่คำนวณแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรมต่อภาพ ส่งผลให้ค่าพิกเซลของสีฝุ่นในภาพถ่ายมีความคลาดเคลื่อน ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่อยู่บริเวณรอยต่อของภาพที่ประมาณค่าได้จึงคลาดเคลื่อนและแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริงมาก สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยในพระอุโบสถที่เลือกมาทดสอบการประมาณค่านั้น นอกจากนี้แล้วในบริเวณพื้นที่วัดค่าด้วยสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์ มีลวดลายของภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยอยู่ในบริเวณขอบพื้นที่จุดวัดค่า ทำให้กราฟค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่วัดค่าได้ ก็มีความแตกต่างจากค่าที่ประมาณด้วยวิธีการประมาณค่าแบบวีเนอร์เช่นกัน รวมถึงการคำนวณพื้นที่วัดค่าซึ่งเป็นรูปวงกลมไปเป็นขอบเขตการตัดภาพรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามหัวข้อ 3.2.9.2 เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ค่าที่

ประมาณได้แตกต่างจากค่าที่วัดได้ เพราะเป็นเพียงการเทียบเคียงเท่านั้น ค่าที่คำนวณได้อาจไม่ตรงกับขนาดของพื้นที่จุดวัดค่าจริงของเครื่องสเปกโทรเรดิโอมิเตอร์ และเนื่องด้วยข้อจำกัดของจุดวัดค่าด้วย Standard Len ที่ระยะ 80 เซนติเมตร พื้นที่จุดวัดค่าจึงมีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ของสีฝุ่นที่จะวัดค่าเล็กน้อย จึงวัดค่าบริเวณพื้นที่สีฝุ่นและลวดลายของภาพที่ไม่ต้องการรวมเข้าไปด้วย

5.1.2 ผลของค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าการสะท้อนแสง

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าในงานวิจัยนี้วัดค่าด้วย ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) จากผลการทดลองในทุกกรณีศึกษา พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าจะแปรผันตรงกับค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้ หากค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นที่ประมาณค่าได้ แตกต่างจากค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จริงตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงมาก ค่า RMSE จะมากตามไปด้วย จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.6.1 พบว่ากรณีศึกษาที่ 2 มีค่าความคลาดเคลื่อนในบางสีลดลงเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 และ 3 เช่น สีฝุ่นหมายเลข 14 และสีฝุ่นหมายเลข 15 เป็นต้น เพราะเป็นกรณีศึกษาเดียวที่ประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมโดยใช้ฐานข้อมูลสีที่มีสี NCS ร่วมกับสี Munsell และสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทย ค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อน RMSE จากทั้ง 3 กรณีศึกษา มีค่าเท่ากับ 0.020 แต่หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Tsumura และคณะ [3] ที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 0.015 พบว่ายังมีค่าที่สูงอยู่ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการทดลอง ณ สถานที่จริง ซึ่งควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อการประมาณค่าได้ค่อนข้างยาก อีกทั้งภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยมีขนาดใหญ่ต้องถ่ายภาพเป็นภาพย่อยทั้งหมด 12 ภาพ และนำมาต่อภาพซึ่งการต่อภาพจะมีการเฉลี่ยค่าพิกเซลบริเวณรอยต่อของภาพ จึงทำให้ค่าพิกเซลของภาพคลาดเคลื่อน ส่งผลให้ค่าที่ประมาณได้ในบางสีมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ที่มากตามไปด้วย

5.1.3 ผลของค่าความแตกต่างของสี

การเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีในการวิจัยนี้จะคำนวณค่าความแตกต่างของสี ด้วย CIEDE2000 Color Difference Formula (ΔE_{00}) จากทั้ง 3 กรณีศึกษา พบว่าในกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 2.78 แต่หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Tsumura และคณะ [3] ซึ่งมีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 หากพิจารณาแล้วยังถือว่าผลของค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีค่าที่ค่อนข้างสูง โดยที่ค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยสูงสุดจากกรณีศึกษาที่ 2 มีค่าเท่ากับ 3.03 เพราะฐานข้อมูลสีที่ใช้ประมาณค่าในกรณีศึกษาที่ 2 มีจำนวนสีที่น้อยเกินไป ผลของ

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแตกต่างสีในกรณีศึกษาที่ 3 มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 1.25 แสดงถึงค่าความแตกต่างสีในกรณีศึกษาที่ 3 เกาะกลุ่มกันเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย เนื่องจากฐานข้อมูลสีที่ใช้ประมาณค่าในกรณีศึกษาที่ 3 มีการลดทอนสีในฐานข้อมูลสี Munsell ซึ่งคัดแยกเหลือ 1160 สี ร่วมกับสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทย จำนวน 18 สี ตามหัวข้อ 3.2.11.3 หากพิจารณาค่าเฉลี่ยในทุกกรณีศึกษา พบว่ามีผลที่ใกล้เคียงกันจึงได้ทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสี จาก 3 กรณีศึกษา ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ ด้วยวิธี One-Way ANOVA กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ผลคือค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างสีในแต่ละกรณีศึกษาไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ฐานข้อมูลสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลสีเทียบเคียงกับสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยเท่านั้น จึงทำให้ผลการทดลองที่ได้ ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าและค่าความแตกต่างของสีค่อนข้างสูงอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Tsumura และคณะ [3] หากใช้ฐานข้อมูลสีฝุ่นซึ่งเป็นสีจริงบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยหรือเพิ่มค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นในฐานข้อมูลสี สำหรับประมาณค่าให้เหมาะสม อาจให้ผลการประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมที่แม่นยำมากขึ้น

2. จากข้อจำกัดในการวัดค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยด้วยเครื่องสเปกโตรเรดิโอมิเตอร์พร้อมกับ Standard Lens ที่มีพื้นที่ในการวัดค่าขนาดใหญ่กว่าพื้นที่สีฝุ่นรวมทั้งภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยนั้นมีรายละเอียดมาก จึงวัดค่าบริเวณที่ไม่ต้องการรวมเข้าไปด้วย อีกทั้งบางบริเวณเป็นลวดลายของภาพ ค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นตลอดช่วงความยาวคลื่นที่วัดค่าได้จึงไม่ใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนแสงที่ประมาณได้ หากใช้ Macro Lens ที่มีขนาดพื้นที่จุดวัดค่าเล็กกว่าหรือขยับจุดวัดค่าให้ใกล้ภาพจิตรกรรมฝาผนังมากขึ้น อาจทำให้ค่าการสะท้อนแสงของสีฝุ่นที่วัดได้มีความเที่ยงตรงมากขึ้น

3. แก๊ไขความไม่ Uniform ของความเข้มแสงในภาพถ่ายย่อย ก่อนนำไปต่อภาพและประมาณค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัม อาจทำให้ค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยที่ประมาณค่าได้มีความแม่นยำมากขึ้น

4. ลดขนาดกล้องควบคุมแสงให้มีขนาดความกว้างและความสูงเท่ากับที่คำนวณได้ รวมถึงการปรับแก้การบิดเบี้ยวอันเนื่องมาจากเลนส์ (Lens Distortion) และปรับแก้ขอบของภาพที่มีต่ำกว่าความสว่างบริเวณกลางภาพ (Vignette) ของภาพถ่ายและลดรอยต่อของภาพย่อยทั้ง 12 ภาพ ก่อนนำไปต่อประกอบภาพ (Stitching images) อาจทำให้ค่าพิกเซลจากภาพถ่ายมีค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

5. สำหรับการใช้งานจริงหากแปลงค่าการสะท้อนแสงเชิงสเปกตรัมของสีฝุ่น ไปเป็นค่าสีที่แสดงผลบนจอภาพหรือสิ่งพิมพ์ จะทำให้จิตรกรผู้วาดภาพตรวจสอบสีได้ง่ายขึ้น หากมีการบูรณะภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยในอนาคต



รายการอ้างอิง

- [1] D. Javoršek, T. Jerman, and A. Javoršek, "Comparison of Two Digital Cameras based on Spectral Data Estimation Obtained with Two Methods," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 12, p. 190, 2015.
- [2] H. Haneishi, T. Hasegawa, A. Hosoi, Y. Yokoyama, N. Tsumura, and Y. Miyake, "System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings," *Applied Optics*, vol. 39, pp. 6621-6632, 2000.
- [3] N. Tsumura, Y. Miyake, and V. Bochko, "Spectral color imaging system for estimating spectral reflectance of paint," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 51, pp. 70-78, 2007.
- [4] Wikipedia Thai. จิตรกรรมไทย. [Online] 2015 [cited 2016, Nov 5]; Available from: https://th.wikipedia.org/wiki/จิตรกรรมไทย#cite_note-1.
- [5] Open Base. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับจิตรกรรมไทย. [Online] 2015 [cited 2016, Oct 24]; Available from: [www.openbase.in.th/files/a3\[1\].2\(ch.1\)จิตรกรรมฝาผนัง\(บทที่1%20\).pdf](http://www.openbase.in.th/files/a3[1].2(ch.1)จิตรกรรมฝาผนัง(บทที่1%20).pdf).
- [6] วรรณชาติ ครอบงำ. ลายไทยประยุกต์ (พุทธศิลป์) ผลงานของ อ.เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์. [Online] 2007 [cited 2016, Oct 10]; Available from: <http://oknation.nationtv.tv/blog/kyoung/gallery/1022>.
- [7] รศ.ดร.พิชญดา เกตุเมฆ, เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Optical Properties of Colored Materials*, 2557.
- [8] X-rite. *Typical Reflectance Curves*. [Online] 2016 [cited 2016, Nov 8]; Available from: <http://www.eri50.com/en/site/typical-reflectance-curves>.
- [9] สุรณี อิงคากุล. ความหมายของ *Remote Sensing*. [Online] 2001 [cited 2016, Oct 7]; Available from: <https://sites.google.com/site/bt324211/keiyw-kab-rs>.
- [10] Saudi Basic Industries Corporation. *Reflectance Curves*. [Online] 2014 [cited 2016, Oct 22]; Available from: https://www.sabic-ip.com/staticcxp/user/en/LearnAboutColor/ColorBasicsDetail/reflectance_curves.html.

- [11] GIS Geography. *Multispectral vs Hyperspectral Imagery Explained*. [Online] 2015 [cited 2016, Oct 25]; Available from: <http://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>.
- [12] B. F. Guolan Lu. *Medical hyperspectral imaging*. [Online] 2014 [cited 2016, Nov 2]; Available from: <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=1816617>.
- [13] Sciencepublishinggroup. *Multispectral VS Hyperspectral*. [Online] 2015 [cited 2016, Oct 20]; Available from: <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ajbls.s.2015030203.16.html>.
- [14] Markelowitz. *What is Imaging Spectroscopy*. [Online] 2012 [cited 2016, Oct 27]; Available from: <http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html>.
- [15] RWTH Aachen. *Multispectral Technology*. [Online] 2013 [cited 2016, Oct 25]; Available from: <http://www.lfb.rwth-aachen.de/en/research/basic-research/multispectral/>.
- [16] Fotofile. *What is Noise*. [Online] 2014 [cited 2016, Oct 28]; Available from: <http://www.fotofile.net/learning/noise/noise.html>.
- [17] Wikipedia Eng. *Signal-to-Noise Ratio (Imaging)*. [Online] 2016 [cited 2016, Oct 24]; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio_\(imaging\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio_(imaging)).
- [18] TELCA, "Signal to Noise Ratio," vol. 4, ed, 2004.
- [19] Mathwork. *Wiener Filter (2-D Adaptive Noise-Removal Filtering)*. [Online] 2016 [cited 2016, Oct 26]; Available from: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/wiener2.html>.
- [20] A. Image.Inc, "ISO-14524 Digital Camera Contrast Chart – 160:1," ed, 2006.
- [21] Wes Components. *Len Field of View for Camera Sensor (LOV)*. [Online] 2012 [cited 2016, Nov 5]; Available from: http://www.wescomponents.com/datasheets/dvr/CCD_Focal_Length_Calculator.htm.

- [22] Matthe Walun Brown. *Rectilinear Image Sttiching*. [Online] 2015 [cited 2016, Oct 21]; Available from: <http://matthewalunbrown.com/autostitch/autostitch.html>.
- [23] P. Stigell, K. Miyata, and M. Hauta-Kasari, "Wiener estimation method in estimating of spectral reflectance from RGB images," *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 17, pp. 233-242, 2007.
- [24] Kaggle. *Root Mean Squared Error (RMSE)*. [Online] 2016 [cited 2016, Oct 28]; Available from: <https://www.kaggle.com/wiki/RootMeanSquaredError>.
- [25] Skywalker. *Munsell Color System*. [Online] 2015 [cited 2016, Nov 1]; Available from: <https://www.algorithmhut.com/designart-munsell-color-system-ระบบสีแบบมันเชลล์/>.
- [26] R.W.G. Hunt and M.R. Pointer, *Measuring Colour*: WILEY, 2014.
- [27] Principles of Visual Art. ทฤษฎีสีที่เกี่ยวข้องกับทัศนศิลป์. [Online] 2014 [cited 2016, Oct 25]; Available from: [http://watkadarin.com/E-\(new\)1/02studio2classrm/unit4/chapt4.2thry%20of%20colr/thry%20color.htm](http://watkadarin.com/E-(new)1/02studio2classrm/unit4/chapt4.2thry%20of%20colr/thry%20color.htm).
- [28] ภมรเทพ อมรวณิชย์กิจ, "เครื่องมือช่วยเทียบแปลงสี ระหว่างโมเดลสีระบบดิจิทัล (อาร์จีบี) กับโมเดลสีระบบมาตรฐานสำหรับสีเคลือบผิวอาคาร (เอ็นซีเอส)," ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [29] Federal Highway Administration. *CIELAB*. [Online] 2013 [cited 2016, Oct 28]; Available from: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/13018/002.cfm>.
- [30] ณัฐ ทองคำ, "ผลของความแปรปรวนของความเข้มตัวสีและความสว่างสีต่อความชอบดวงตราไปรษณียากร," วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [31] Keyword. *CIE-Lch*. [Online] 2015 [cited 2016, Nov 17]; Available from: <http://www.keyword-suggestions.com/bGFilGNpZS0gbGNb/>.
- [32] Peter Blum, *Spectral Reflectance and Colorimetry*, 1997.
- [33] B. Bloom. *Delta E (CIE 2000)*. [Online] 2009 [cited 2016, Oct 26]; Available from: http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html.
- [34] รศ.ดร.กัลยา วานิชย์บัญชา, *หลักสถิติ*, 2557.

- [35] Y. Murakami, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, and Y. Komiya, "Spectral reflectance estimation from multi-band image using color chart," *Optics communications*, vol. 188, pp. 47-54, 2001.
- [36] P. Katemake and R. I. Preda, "Complete study of traditional thai colors used in mural paintings: Traditional thai color name dictionary," *Color Research & Application*, vol. 39, pp. 616-629, 2014.
- [37] ไฟสตูดิโอ. *Masterlite 1000 Set*. [Online] 2012 [cited 2016, Nov 17]; Available from: http://www.xn--l3cb3a7br5b7a4e1.com/สินค้า/ไฟวิดีโอ/ไฟเขียนไฟวิดีโอ_masterlite_1000_set.





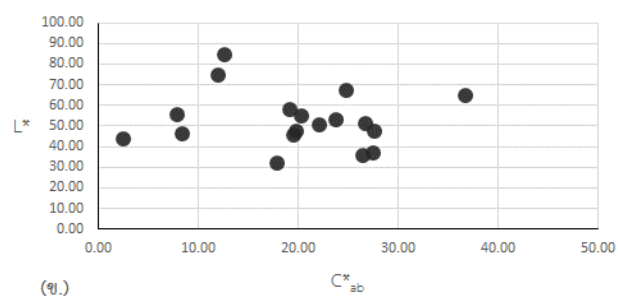
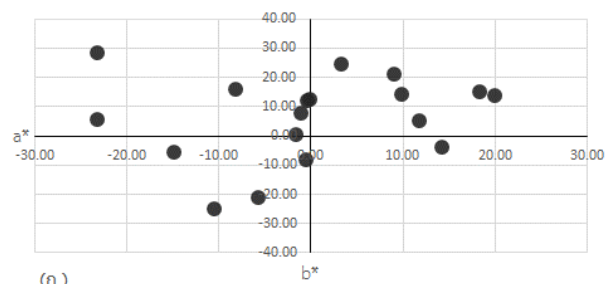
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับและค่าสี CIE L*, a*, b* และ C*_{ab} ที่วัดค่าได้ (Test set)

Name ▲	L	a	b	C
No.01	35.93	19.93	13.98	26.4
No.02	52.97	9.08	21.11	23.7
No.03	67.35	3.24	24.49	24.8
No.04	64.89	-23.12	28.30	36.7
No.05	54.75	-14.80	-5.62	20.4
No.06	55.61	-1.09	7.66	7.8
No.07	51.12	18.24	14.96	26.7
No.08	47.69	14.20	-3.77	19.7
No.09	84.38	-0.10	12.59	12.6
No.10	47.54	-23.21	5.49	27.6
No.11	50.54	-5.72	-21.08	22.1
No.12	43.82	-1.61	0.39	2.4
No.13	32.10	11.82	4.98	17.8
No.14	58.08	9.88	14.27	19.1
No.15	74.67	-0.34	12.00	12.0
No.16	45.65	-8.17	15.93	19.5
No.17	36.71	-10.54	-24.95	27.5
No.18	46.08	-0.49	-8.28	8.3

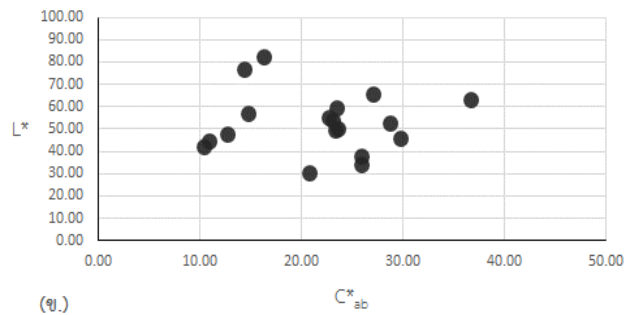
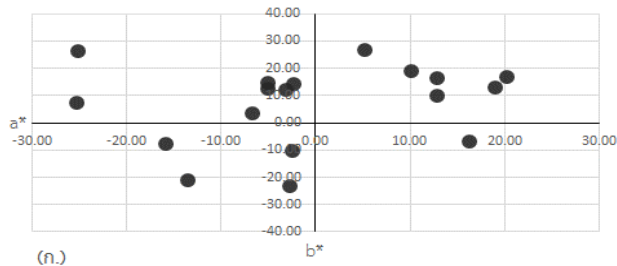


ภาพที่ ก.1 พิกัดสี (ก) CIE a*b* (ข) C*_{ab} L* ของสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับ ที่วัดค่าได้ (Test set)

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 สีฝุ่นบนภาพจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับและค่าสี CIE L*, a*, b* และ C*_{ab} ที่วัดค่าได้ (Training set)

Name ▲	L	a	b	C
No.01	33.93	18.93	12.98	25.9
No.02	54.97	10.08	19.11	22.7
No.03	65.35	5.24	26.49	27.1
No.04	62.89	-25.12	26.30	36.7
No.05	53.75	-15.80	-7.62	23.1
No.06	56.61	-5.09	12.66	14.7
No.07	52.12	20.24	16.96	28.7
No.08	49.69	16.20	-6.77	23.6
No.09	82.38	-5.10	14.59	16.3
No.10	45.54	-25.21	7.49	29.8
No.11	49.54	-2.72	-23.08	23.3
No.12	41.82	-6.61	3.39	10.5
No.13	30.10	12.82	9.98	20.8
No.14	59.08	12.88	16.27	23.5
No.15	76.67	-2.34	14.00	14.4
No.16	47.65	-3.17	11.93	12.8
No.17	37.71	-13.54	-20.95	25.9
No.18	44.08	-2.49	-10.28	10.9



ภาพที่ ข.1 พิกัดสี (ก) CIE a*b* (ข) C*_{ab} L* ของสีฝุ่นบนจิตรกรรมฝาผนังไทยต้นฉบับ ที่วัดค่าได้ (Training set)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐพล บัวเทศ เกิดเมื่อ 31 สิงหาคม พ.ศ.2530 ที่จังหวัดนครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2548 : สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

จากโรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์

พ.ศ.2552 : สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีการพิมพ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์

คณะครุศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ.2556 : เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2553 - 2554 : ทำงานกับ บริษัท ศิริวัฒนาอินเตอร์พริ้นท์ จำกัด(มหาชน)

โรงงานบางปะกง ตำแหน่ง พนักงาน Macintosh แผนก เตรียมการพิมพ์

พ.ศ.2554 - 2556 : ทำงานกับ บริษัท ไทยบริติชซีเคียวริตี้ พริ้นติ้ง จำกัด(มหาชน)

โรงงานปู่เจ้าสมิงพราย ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ Studio แผนก Security Document