การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงสำหรับการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์

นางสาวปัญญ์ชนก สานุสัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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

REDUCTION OF REFLECTANCE DATA FOR COLOUR MATCH PREDICTION BASED ON KUBELKA-MUNK THEORY

Miss Panchanok Sanusan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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	การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงสำหรับการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์
โดย	นางสาวปัญญ์ชนก สานุสัน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา สื่อประสาร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา สื่อประสาร)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คูร์พิพัฒน์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ พรทวี พึ่งรัศมี)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัญญ์ชนก สานุสัน : การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงสำหรับการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ (REDUCTION OF REFLECTANCE DATA FOR COLOUR MATCH PREDICTION BASED ON KUBELKA-MUNK THEORY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุจิตรา สื่อประสาร, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก และวิเคราะห์ผลความแม่นยำในการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ด้วยวิธี Single-constant เปรียบเทียบการทำนายระหว่างฐานข้อมูลที่ลดและไม่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง ทำการทดลองสร้างฐานข้อมูลของสีน้ำมันเคลือบเงาจำนวน 9 สี จำแนกฐานข้อมูลตามความเข้มข้นของชุดตัวอย่างสีที่ใช้เตรียมข้อมูล 7 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ฐานข้อมูลสีเดี่ยว (mass tone) กลุ่มที่ 2-6 ฐานข้อมูลสีเจือจางที่ได้จากการผสมสีเดี่ยวกับสีขาวที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ระดับ (Tint 1-5) และกลุ่มที่ 7 All tints เป็นชุดตัวอย่างสีรวม เก็บค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างสีตั้งแต่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร ซึ่งแต่ละสีจะมีค่าการสะท้อนแสงทั้งหมด 31 ค่า เมื่อนำค่าการสะท้อนแสงมาลดข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก สามารถลดค่าการสะท้อนแสงของสีในฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 ลงเหลือจำนวน 9 ค่า แต่กลุ่มที่ 7 นั้นไม่สามารถลดข้อมูลได้ เลือกค่าการสะท้อนแสงที่ลดข้อมูลจากค่า loading ที่มากที่สุดของแต่ละส่วนประกอบหลักภายหลังการหมุนแกนปัจจัยร่วมแบบ varimax จากนั้นคำนวณหาค่า *k/s* ของแต่ละสีในฐานข้อมูลและทำนายผลการเทียบสีกับสีทดสอบ จากผลการทดลองพบว่า ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีขึ้นกับการเตรียมฐานข้อมูล เช่น ฐานข้อมูลที่เตรียมจากสีเจือจางที่มีความเข้มข้นต่ำให้ผลแม่นยำกว่ากับสีทดสอบที่มีความสว่างสูง ความแม่นยำในการทำนายด้วยฐานข้อมูลที่มีการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงมีผลใกล้เคียงกัน โดยให้ผลค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ไม่เกิน 3 หน่วย และค่าการสะท้อนแสงของสีที่ทำนายนั้นไม่เกิดเมทาเมอริซึม

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางภาพ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

ปีการศึกษา 2559

5772054823 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY
KEYWORDS: PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS (PCA)/REFLECTANCE DATA/KUBELKA-MUNK THEORY/SINGLE-CONSTANT/ENAMEL PAINT

PANCHANOK SANUSAN: REDUCTION OF REFLECTANCE DATA FOR COLOUR MATCH PREDICTION BASED ON KUBELKA-MUNK THEORY. ADVISOR: ASST. PROF. SUCHITRA SUEEPRASAN, Ph.D., 78 pp.

The aim of this research is to investigate a method of reducing reflectance data by means of the principal components analysis (PCA) for colour match prediction based on the Kubelka-Munk theory with Single-constant equations. The accuracy of predictions is compared between reduced and non-reduced databases of reflectance data. The databases were prepared for nine colours of enamel paint according to concentration of training sets. Seven groups of the training sets were: Mass tone, Tints 1-5 (mixtures of mass tone and white with 5 different concentrations) and All tints (a combination of all groups). The reflectance data of each colour were collected at wavelengths from 400-700 nm at 10 nm intervals, i.e. 31 wavelengths. When applying PCA, the reflectance data in all databases except All tints could be reduced to 9 wavelengths. The wavelengths used in the reduced databases were selected based on the loading values after common factors axis rotation by varimax. The *k/s* values for each colour were then computed and colour match predictions were made for test samples. The results showed that the accuracy of predictions depended on the method of preparing databases. For instance, the database prepared from tints with low concentration gave better predictions for high lightness colour. The databases with reduced and non-reduced reflectance data gave similar results with CIEDE2000 of no more than 3 units, and no illuminant metamerism.

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

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือ มีเมตตา ชี้แนะและคอยดูแลอย่างใกล้ชิดตลอดในการศึกษาปริญญาโท จนสำเร็จการศึกษา

ขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลาอันมีค่าในการดำเนินการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณาจารย์และบุคคลากร ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในทุกเรื่องตลอดการศึกษาปริญญาโท

ขอบคุณนาย ธนัช หรือพี่โอ๊ต ตัวแทนจำหน่ายสีน้ำมันมาร์โก ที่สนับสนุนตัวอย่างสีในการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอบคุณบรรดาเพื่อน พี่ ๆ และน้อง ๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ ส่งแรงผลักดันและคอยสนับสนุน ให้คำแนะนำในทุก ๆ ด้าน

ขอบคุณกำลังใจที่สำคัญที่สุดจากคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่คอยเป็นแรงผลักดันและส่งกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาในทุก ๆ ด้านเสมอมา

Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญภาพ... ญ

สารบัญตาราง...ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.. 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.. 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 4

2.1 แนวคิดและทฤษฎี.. 4

2.1.1 สีทา.. 4

2.1.2 ค่าการสะท้อนแสง (reflectance)... 5

2.1.3 ทฤษฎีคูเบลคา-มังค์... 6

2.1.4 วิธีการลดข้อมูล 9

2.1.4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA) 10

2.1.4.2 การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis).. 17

2.1.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization).. 19

2.1.6 การประมาณค่าในช่วง (Interpolation)... 20

2.1.7 ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 21

หน้า

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 25
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 25
3.2 วิธีการวิจัย 26
ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างสี 26
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างฐานข้อมูล 28
ขั้นตอนที่ 3 การลดข้อมูล 33
ขั้นตอนที่ 4 การทำนายสูตรการผสมสี 34
ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ความแม่นยำ 37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 38
4.1 ผลการลดข้อมูล 38
4.2 ความแม่นยำของค่าความแตกต่างสี 41
4.2.1 ไม่ลดข้อมูล 42
4.2.2 ลดข้อมูล 46
4.3 ความแม่นยำของค่าความเข้มข้น 49
4.3.1 ไม่ลดข้อมูล 49
4.3.2 ลดข้อมูล 53
บทที่ 5 ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 58
5.1 สรุปผลการวิจัย 58
5.1.1 วิธีการลดข้อมูลและเลือกข้อมูล 58
5.1.2 ชุดตัวอย่างสี (training set) ในการเตรียมฐานข้อมูล 59
5.1.3 ความแม่นยำของการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล 59
5.2 ข้อเสนอแนะ 60

หน้า

รายการอ้างอิง 61

ภาคผนวก ก 64

ภาคผนวก ข 70

ภาคผนวก ค 73

ภาคผนวก ง 75

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 การสะท้อนแสงบนวัตถุที่มีพื้นผิวต่างกัน 5
ภาพที่ 2.2 สเปกตรัมของแสง 5
ภาพที่ 2.3 การสะท้อนแสงของชั้นผิวของวัตถุทึบแสง 6
ภาพที่ 2.4 ค่าเฉพาะ (eigenvalue) กับส่วนประกอบหลักที่ 1-10 13
ภาพที่ 2.5 ค่าเฉพาะของตัวอย่าง 15
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างจุดในการประมาณค่า 21
ภาพที่ 3.1 ขนาดกระดาษอาร์ตมันสำหรับปาดสี 27
ภาพที่ 3.2 สีเมื่อไม่ทึบแสง (ซ้าย) สีเมื่อทึบแสง (ขวา) 28
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า k / s 29
ภาพที่ 3.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีเดี่ยว (mass tone) 30
ภาพที่ 3.5 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 1 (Tint 1) 31
ภาพที่ 3.6 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 2 (Tint 2) 31
ภาพที่ 3.7 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 3 (Tint 3) 32
ภาพที่ 3.8 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 4 (Tint 4) 32
ภาพที่ 3.9 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 5 (Tint 5) 33
ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงของ Unknown 35
ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงของ Test 35
ภาพที่ 3.12 การทำนายค่าความเข้มข้นในการผสมสี 36
ภาพที่ 4.1 ค่าเฉพาะของส่วนประกอบในแต่ละฐานข้อมูล 39
ภาพที่ 4.2 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Quiet Pink เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วย Tint 3 (ไม่ลดข้อมูล) 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.3 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Quiet Pink เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วย Tint 5 (ไม่ลดข้อมูล) 45

ภาพที่ 4.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Teak เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วยด้วยสีเดี่ยวและ All tints (ไม่ลดข้อมูล) 46

ภาพที่ 4.5 ค่า k/s ของสี Reddish Yellow ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 51

ภาพที่ 4.6 ค่า k/s ของสี River Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 51

ภาพที่ 4.7 ค่า k/s ของสี Ocean Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 52

ภาพที่ 4.8 ค่า k/s ของสี Tinting Red ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 53

ภาพที่ 4.9 ค่า k/s ของสี Reddish Yellow ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 55

ภาพที่ 4.10 ค่า k/s ของสี River Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 55

ภาพที่ 4.11 ค่า k/s ของสี Ocean Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 56

ภาพที่ 4.12 ค่า k/s ของสี Tinting Red ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 57

ภาพที่ ข.1 ค่าการสะท้อนแสงของสี Light Sky (ไม่ลดข้อมูล) 70

ภาพที่ ข.2 ค่าการสะท้อนแสงของสี Quiet Pink (ไม่ลดข้อมูล) 70

ภาพที่ ข.3 ค่าการสะท้อนแสงของสี Teak (ไม่ลดข้อมูล) 71

ภาพที่ ข.4 ค่าการสะท้อนแสงของสี Light Sky (ลดข้อมูล) 71

ภาพที่ ข.5 ค่าการสะท้อนแสงของสี Quiet Pink (ลดข้อมูล) 72

ภาพที่ ข.6 ค่าการสะท้อนแสงของสี Teak (ลดข้อมูล) 72

ภาพที่ ค.1 ค่าการสะท้อนแสงของสีเขียว (ไม่ลดข้อมูล) 73

ภาพที่ ค.2 ค่าการสะท้อนแสงของสีม่วง (ไม่ลดข้อมูล) 73

ภาพที่ ค.3 การสะท้อนแสงของสีเขียว (ลดข้อมูล) 74

ภาพที่ ค.4 การสะท้อนแสงของสีม่วง (ลดข้อมูล) 74

ภาพที่ ง.1 ค่า k/s ของสี Orange ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 75

ภาพที่ ง.2 ค่า k/s ของสี Laurel Green ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล) 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ง.3 ค่า k/s ของสี Smoke ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล).. 76

ภาพที่ ง.4 ค่า k/s ของสี Orange ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 76

ภาพที่ ง.5 ค่า k/s ของสี Laurel Green ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล) 77

ภาพที่ ง.6 ค่า k/s ของสี Smoke ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)... 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลตัวอย่าง.......... 14
ตารางที่ 4.1 ร้อยละค่าความแปรปรวนสะสมของส่วนประกอบหลักของแต่ละฐานข้อมูล 40
ตารางที่ 4.2 ความยาวคลื่นที่ลดข้อมูลลง.......... 41
ตารางที่ 4.3 ผลค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Unknown (ไม่ลดข้อมูล).......... 42
ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Light Sky (ไม่ลดข้อมูล) 43
ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Quiet Pink (ไม่ลดข้อมูล).......... 43
ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Teak (ไม่ลดข้อมูล).......... 43
ตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างสีจากการผสมจริง 45
ตารางที่ 4.8 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Unknown (ลดข้อมูล) 47
ตารางที่ 4.9 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Light Sky (ลดข้อมูล) 47
ตารางที่ 4.10 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Quiet Pink (ลดข้อมูล) 47
ตารางที่ 4.11 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Teak (ลดข้อมูล).......... 48
ตารางที่ 4.12 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Test (ไม่ลดข้อมูล).......... 49
ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีเขียว (ไม่ลดข้อมูล) 49
ตารางที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีม่วง (ไม่ลดข้อมูล).......... 50
ตารางที่ 4.15 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Test (ลดข้อมูล).......... 53
ตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีเขียว (ลดข้อมูล) 54
ตารางที่ 4.17 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีม่วง (ลดข้อมูล).......... 54
ตารางที่ ก.1 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูลสีเดี่ยว.......... 64
ตารางที่ ก.2 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 1 65
ตารางที่ ก.3 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 2 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.4 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 3 67
ตารางที่ ก.5 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 4 68
ตารางที่ ก.6 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 5 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สี คือ การรับรู้ความถี่หรือความยาวคลื่นของแสงในแต่ละช่วงของความถี่ที่แตกต่างกัน[1] มนุษย์สามารถมองเห็นและแยกแยะสีได้ประมาณ 10 ล้านสี[2] อย่างไรก็ดีในแง่ของการผลิตสีแล้ว สีต่าง ๆ ที่มองเห็นนั้นไม่จำเป็นต้องผลิตจากสารสี (colorant) ที่ให้สีสีนั้นโดยเฉพาะ แต่สามารถเกิดจากการผสมสารสีตั้งต้นที่มีอยู่และเทียบเคียงสีได้เหมือนกับสีที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ระบบการพิมพ์ที่ใช้แม่สี 4 สี ได้แก่ สีไซแอน สีมาเจนต้า สีเหลือง และสีดำ เมื่อพิมพ์ด้วยสัดส่วนร้อยละเม็ดสกรีนที่แตกต่างกัน สามารถผลิตสีต่าง ๆ ได้มากมาย การมีฐานข้อมูลสีจึงมีประโยชน์ต่อการผลิตสีในอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการทำนายการเทียบสี (colour match prediction) กล่าวคือ ใช้ในการหาสูตรการผสมสีจากสีที่มีอยู่ในฐานข้อมูลสีนั่นเอง การหาสูตรการผสมสีอาจใช้วิธีการเทียบสีด้วยตาและทำนายสีและปริมาณที่ต้องนำมาผสม ซึ่งวิธีนี้ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงาน และไม่มีความเที่ยงของการทำซ้ำ ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมกว่าคือ วิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่อาศัยการวัดและวิเคราะห์ค่าสี ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีจะขึ้นกับเครื่องมือและวิธีการที่ใช้หาสูตรการผสมสี หนึ่งในวิธีการที่นิยมใช้เพื่อทำนายการเทียบสีคือ วิธีการบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ (Kubelka-Munk theory)

ทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ เป็นทฤษฎีหนึ่งที่ใช้ในการทำนายปริมาณแสงที่ผิวหน้าวัตถุที่สะท้อนออกมาในแต่ละความยาวคลื่น โดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของแสงที่สะท้อนบนผิวหน้าและส่วนประกอบภายในของวัตถุ หรือพิจารณาฟลักซ์ที่เคลื่อนตัวของผิววัตถุ (energy flux) ในผิวของวัตถุนั้นที่มีการเคลื่อนที่ของฟลักซ์[3] วิธีการทำนายปริมาณแสงบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์มีหลายวิธี เช่น วิธี Multi-flux ที่พิจารณาฟลักซ์ที่มีการถ่ายโอนพลังงานทั้งหมดในชั้นผิว เป็นวิธีที่มีการคำนวณค่อนข้างซับซ้อน และวิธี Two-flux ที่พิจารณาฟลักซ์ 2 ชนิดที่มากระทบบนวัตถุ ซึ่งวิธีนี้จะแบ่งออกเป็นวิธี Single-constant ใช้ค่าอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการกระเจิงแสง (k/s) เป็นวิธีที่มีการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน เหมาะกับงานประเภทระบบสีย้อมผ้า (dyed system) และวิธี Two-constant ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (s) ซึ่งมีการคำนวณที่มีความซับซ้อนและยุ่งยาก แต่จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าวิธี Single-constant

จากงานวิจัยของ Berns และคณะ[4, 5] ได้เปรียบเทียบการคำนวณด้วยวิธี Single-constant และวิธี Two-constant สำหรับการทำนายการเทียบสีของระบบสีทา (paint system) โดยเตรียมฐานข้อมูลด้วยสีเจือจาง (tint) และสีเดี่ยว (mass tone) พบว่า Single-constant ให้ผลดี

กับการทดลองเมื่อใช้ฐานข้อมูลที่เตรียมด้วยสีเจือจาง แต่จะมีบางสีที่ทำให้เกิดเมทาเมอริซึม (metamerism) และได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการปรับสูตรการคำนวณหาความเข้มข้นของวิธี Single-constant จากวิธีการสำหรับระบบสีย้อมผ้ามาใช้กับระบบสีทา พบว่า เมื่อใช้วิธี Single-constant ที่ปรับสูตรการหาความเข้มข้นมาทำนายการเทียบสีกับระบบสีทาให้ผลการทำนายที่ดีกว่าแบบไม่ปรับสูตรที่ใช้กับระบบสีย้อมผ้า และจากงานวิจัยของ Koirala และคณะ[6] ได้ทำการทดลองการคำนวณหาค่า *K/S* ที่เหมาะสมของแต่ละสารสี (pigment) สีเดี่ยวด้วยวิธี Single-constant โดยเตรียมฐานข้อมูลสีที่มาใช้ในการทำนายด้วยการนำสารสีผสมกับสารเติมเต็ม (filling material) ทำนายหาความเข้มข้นที่จะนำมาใช้งานจริงพบว่า วิธี Single-constant และการสร้างฐานข้อมูลจากสีเจือจางสามารถทำนายการเทียบสีได้อย่างแม่นยำ จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า วิธี Single-constant และการสร้างฐานข้อมูลสีจากสีเจือจาง สามารถใช้ทำนายการเทียบสีในระบบสีทาได้ ซึ่งสามารถลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของการคำนวณเมื่อเทียบกับการทำนายด้วยวิธี Two-constant

ในการทำนายสูตรการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ โดยทั่วไปข้อมูลที่ใช้คือ ค่าการสะท้อนแสงของสีตัวอย่าง ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร ดังนั้นค่าการสะท้อนแสงของสีหนึ่งสีจะมีทั้งหมด 31 ค่าหรือ 31 ความยาวคลื่น หากในฐานข้อมูลสำหรับทำนายการเทียบสีมีสีอยู่จำนวนมาก ข้อมูลค่าการสะท้อนแสงย่อมมีมากเช่นกัน ฐานข้อมูลที่มีสีอยู่จำนวนมากจะมีชุดข้อมูลสีที่มีขนาดใหญ่ และการเตรียมตัวอย่างสีก็จะยุ่งยากไปด้วย ส่งผลให้การคำนวณนั้นมีความล่าช้า สิ้นเปลืองเวลาและทรัพยากร อย่างไรก็ดีสิ่งที่สำคัญในการทำนายการเทียบสี คือ ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละความยาวคลื่นของแต่ละสีที่มีค่าแตกต่างกัน เพื่อให้สามารถแยกแยะสีแต่ละสีออกจากกันได้ ดังนั้นหากสามารถลดข้อมูลในส่วนที่ไม่จำเป็นต่อการใช้งานลงได้ย่อมช่วยให้การคำนวณนั้นประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดเวลา ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและลดทรัพยากรหรือพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลสี

สีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงาสามารถพบเจอได้ง่ายในชีวิตประจำวัน ใช้ในการทาปิดพื้นผิวของวัสดุ เป็นสีที่ทนต่อน้ำเค็ม สารเคมี แสงแดด หรือสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ได้ดีกว่าสีทาประเภทสีอะคริลิก สามารถล้างและทำความสะอาดได้ง่าย สีน้ำมันเคลือบเงานี้ให้ความเงางามของสี จึงเหมาะกับการใช้งานประเภทไม้ โลหะ หรือพื้นปูนคอนกรีต ทำให้ชิ้นงานดูมีสีสันสวยงาม และมีสีให้เลือกใช้หลากหลายสี หรือใช้สีที่มีอยู่ผสมให้เกิดเป็นสีใหม่ได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของสีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงา เพื่อสร้างฐานข้อมูลสำหรับการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ ทำการทดลองลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA) และทำนายการเทียบสีด้วยวิธี Single-constant โดยการคำนวณหาค่า *k/s* ของแต่ละสีในฐานข้อมูลจากชุดตัวอย่าง (training set)

สีเดี่ยวและสีเจือจางที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบผลความแม่นยำในการทำนายการเทียบสีจากฐานข้อมูลที่มีการลดและไม่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่ใช้ในการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์
2. วิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีที่ได้จากการลดข้อมูล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงและวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ด้วยวิธี Single-constant สำหรับสีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงา โดยมีพารามิเตอร์ในการทดลองดังนี้

1. สีน้ำมันเคลือบเงา Marco high gloss enamel จำนวน 9 สี ได้แก่ สี Tinting Red, Orange, Reddish Yellow, Laurel Green, Ocean Blue, River Blue, Smoke, Black และ White
2. ข้อมูลค่าการสะท้อนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร
3. ฐานข้อมูลสีเตรียมจากชุดตัวอย่างสีที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ แบ่งเป็น 7 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มที่ 1 สีเดี่ยว (mass tone), กลุ่มที่ 2-6 สีเจือจาง (tint) ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ระดับ และกลุ่มที่ 7 All tints เป็นชุดตัวอย่างสีรวมของกลุ่มที่ 1-6
4. การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงใช้วิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักด้วยคำสั่งในโปรแกรมภาษาอาร์
5. ความแม่นยำของทำนายการเทียบสีวิเคราะห์จากค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ภายใต้สภาวะ D65/10

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีการลดข้อมูลและผลความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีที่ได้จากการลดข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงและวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ด้วยวิธี Single-constant สำหรับสีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงา ใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักในการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง ดังนั้นทฤษฎีที่สำคัญเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่ สีทา ค่าการสะท้อนแสง ทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ วิธีการลดข้อมูล การหาค่าเหมาะสมที่สุด การประมาณค่าในช่วง และค่าความแตกต่างสี

2.1.1 สีทา

อาคารบ้านเรือนที่พบเห็นนั้นโดยส่วนใหญ่มีการตกแต่งสีสันเพื่อให้เกิดความสวยงาม น่ามอง หรือเป็นสัญลักษณ์ในการจดจำ เช่น การตกแต่งด้วยต้นไม้ ไม้ดอก ไม้ประดับ รูปปั้นต่าง ๆ รวมถึงของตัวบ้าน ซึ่งเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในการใช้สีทาบ้าน เพื่อตกแต่งบ้านให้มีความสวยงามสะอาดตา ดูสง่าน่าอยู่อาศัย สีทาบ้านที่นิยมใช้โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ[7]

1. สีพลาสติก

สีพลาสติกหรือสีอะคริลิก (acrylic) เป็นสีที่ผลิตขึ้นจากลาเท็กซ์ พีวีเอซี โคพอลิเมอร์ (latex PVAc copolymer) ผสมกับแม่สี ซึ่งเป็นสีที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหรือผสมสีให้จาง เมื่อนำไปใช้งานแล้วสีจะไม่ละลายน้ำหรือหลุดลอกไปตามน้ำ โดยทั่วไปจะใช้สำหรับทาผิวพื้นปูนหรือคอนกรีตทั่วไป สีทาประเภทนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ สีสำหรับทาภายในและสีสำหรับทาภายนอก สีพลาสติกสำหรับทาภายนอกนั้นมีคุณสมบัติทนต่อแดดและฝนได้ดีกว่าสีสำหรับทาภายใน สีพลาสติกเป็นสีที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด ในปัจจุบันสีพลาสติกได้มีการผลิตสีให้มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น เช่น สีที่มีความยืดหยุ่นตัวสูง เพื่อปกปิดรอยร้าวบนผนัง สีสามารถเช็ดออกได้ง่ายขึ้น ป้องกันเชื้อราและตะไคร่น้ำ เป็นต้น

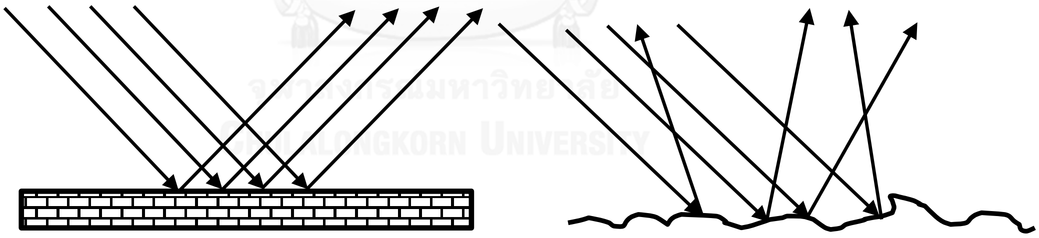
2. สีน้ำมัน

สีน้ำมันหรือสีเคลือบเงา เป็นสีที่ผลิตขึ้นจากแอลคิดเรซิน (alkyd resin) ผสมกับแม่สี ใช้น้ำมันหรือทินเนอร์เป็นตัวทำละลายหรือผสมสีให้เจือจาง สีน้ำมันนี้เหมาะสำหรับการใช้งานประเภทไม้ โลหะ หรือพื้นปูนคอนกรีต เพื่อให้เกิดความเงางาม สามารถทำความสะอาดได้ง่าย สีน้ำมันมี

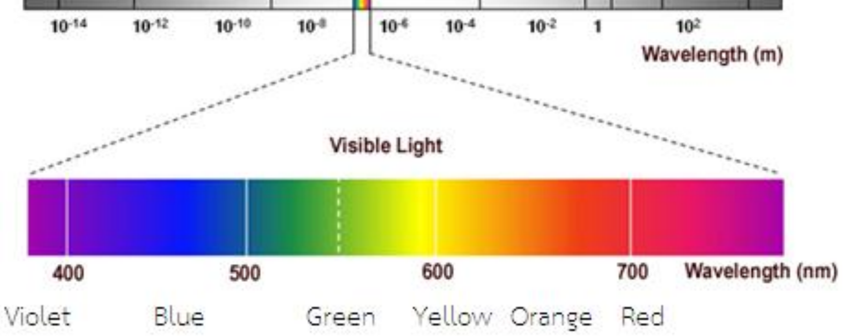
คุณสมบัติที่ต่างกันเพื่อให้ทนกับการใช้งาน เช่น ทนต่อน้ำเค็ม สารเคมี ความร้อน เป็นต้น ซึ่งความคงทนนั้นจะขึ้นอยู่กับราคา และสีต่างยี่ห้อก็ย่อมให้ราคาและคุณสมบัติในการใช้งานที่ต่างกันอีกด้วย อย่างไรก็ตามในการใช้งานสีน้ำมันนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับราคาหรือยี่ห้อเพียงอย่างเดียว ขั้นตอนในการผสมสีนั้นมีความสำคัญมาก หากมีการผสมผิดพลาดไปก็จะทำให้เนื้อสีที่ทานั้นไม่มีความสวยงาม หรือความคงทนอาจสูญหายไป อาจเกิดจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้นั้นเก่าเกินไป ตัวทำละลายมีปริมาณมากเกินไป หรือพื้นผิวที่มีฝุ่น สนิม หรือมีวัสดุที่หลุดล่อนออกมา

2.1.2 ค่าการสะท้อนแสง (reflectance)

แสงมีสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเดินทางเป็นเส้นตรง เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางและไปตกกระทบกับผิววัตถุ แสงจะมีปฏิสัมพันธ์กับผิวหน้าวัตถุเกิดการสะท้อนแสงออกมา บนพื้นผิววัตถุที่มีความแตกต่างกันย่อมให้การสะท้อนแสงของวัตถุที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2.1 ถ้าวัตถุมีพื้นผิวเรียบแสงตกกระทบจะสะท้อนอย่างเป็นระเบียบ แต่ถ้าวัตถุมีผิวขรุขระแสงสะท้อนจะมีหลายทิศทางไม่แน่นอน ทั้งนี้ปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุนั้นขึ้นอยู่กับพื้นผิว ปริมาณแสงสว่างที่เข้ามาตกกระทบกับวัตถุจะสะท้อนออกมามากน้อยเพียงใดสามารถอธิบายได้ด้วยตัวเลข เรียกว่า ค่าการสะท้อนแสง ช่วงคลื่นแสงที่เราสามารถมองเป็นเห็นช่วงคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 380-730 นาโนเมตร ซึ่งแสงในแต่ละความยาวคลื่นนั้นจะมีสีที่ต่างกันดังภาพที่ 2.2

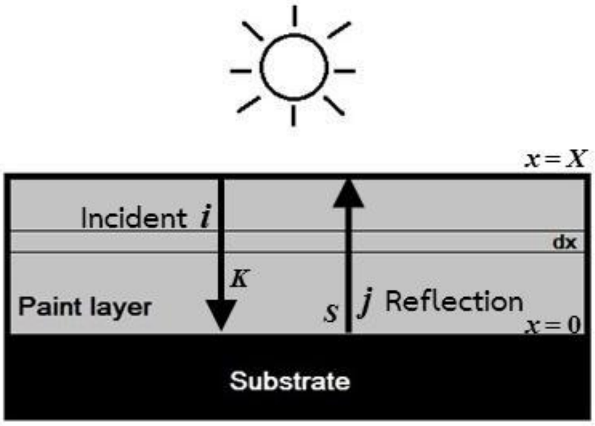


ภาพที่ 2.1 การสะท้อนแสงบนวัตถุที่มีพื้นผิวต่างกัน



ภาพที่ 2.2 สเปกตรัมของแสง

2.1.3 ทฤษฎีคูเบลคา-มังค์



ภาพที่ 2.3 การสะท้อนแสงของชั้นผิวของวัตถุทึบแสง

คูเบลคา (Kubelka) และมังค์ (Munk) ได้ทำการศึกษาปฏิสัมพันธ์ของแสงที่สะท้อนบนพื้นผิวหน้าและส่วนประกอบภายในของวัตถุดังภาพที่ 2.3 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของฟลักซ์ 2 ชนิด ที่มีทิศทางต่างกันผ่านชั้นผิวของวัตถุที่มีความหนา X โดยที่ฟลักซ์ i เป็นแสงที่ตกกระทบลงบนผิววัตถุหรือทิศทางเข้าหาวัตถุ (substrate) และฟลักซ์ j เป็นแสงที่สะท้อนจากผิววัตถุหรือทิศออกจากวัตถุในชั้นผิวของวัตถุมีการสูญเสียและได้รับพลังงานของระบบ แสดงได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient, K) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (scattering coefficient, S) สำหรับชั้นผิวบนวัตถุที่ความหนา X เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นวัตถุบาง ๆ dx ปริมาณพลังงานของแสงทั้งหมดที่ระบบได้รับในแต่ละฟลักซ์คือ

$$-di(x) = -Ki(x)\cdot dx - Si(x)\cdot dx + Sj(x)\cdot dx \tag{2.1}$$

$$dj(x) = -Kj(x)\cdot dx - Sj(x)\cdot dx + Si(x)\cdot dx \tag{2.2}$$

จากสมการ (2.1) และ (2.2) กำหนดให้แสงที่ได้รับพลังงานจากระบบ ซึ่งมีทิศออกจากวัตถุมีค่าเป็นบวก และแสงที่สูญเสียพลังงานจากระบบ ซึ่งมีทิศเข้าหาวัตถุมีค่าเป็นลบ เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$-\frac{di(x)}{dx} = -(K+S)i(x) + Sj(x) \tag{2.3}$$

$$\frac{dj(x)}{dx} = -(K+S)\,j(x) + Si(x) \tag{2.4}$$

พิจารณาค่าการสะท้อนแสงบนวัตถุทึบแสง (opaque material) ดังนั้นสัดส่วนการสะท้อนแสงบนผิวหน้าวัตถุมีค่าเท่ากับแสงที่สะท้อนเทียบกับแสงที่ตกกระทบดังสมการ (2.5)

$$r(x) = \frac{j(x)}{i(x)} \tag{2.5}$$

จากสมการ (2.5) เมื่ออนุพันธ์สัดส่วนค่าการสะท้อนแสงเทียบกับความหนาของวัตถุบาง ๆ จะได้

$$\frac{dr(x)}{dx} = \frac{d\left(\frac{j(x)}{i(x)}\right)}{dx} = \frac{i(x)\cdot\frac{dj(x)}{dx} - j(x)\cdot\frac{di(x)}{dx}}{i(x)^2} \tag{2.6}$$

จัดรูปสมการ (2.3) และ (2.4) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{dr(x)}{dx} = S - 2(K+S)\cdot r(x) + S\cdot r(x)^2 \tag{2.7}$$

เมื่อปริพันธ์ของค่าการสะท้อนแสงของผิวหน้าวัตถุทั้งหมดบนวัตถุทึบแสง (R_∞) ที่มีความหนา X ดังสมการ (2.8)

$$\int_0^X dx = \int_{R_g}^{R} \frac{dr(x)}{S - 2(K+S)\cdot r(x) + S\cdot r(x)^2} \tag{2.8}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จะได้ค่าการสะท้อนแสงบนผิวหน้าของวัตถุทึบแสงเป็น

$$R = \frac{1 - R_g(a - b\coth(bSX))}{a - R_g + b\coth(bSX)} \tag{2.9}$$

เมื่อ $a = 1 + (K/S)$ และ $b = \sqrt{(1+(K/S))^2 - 1}$ ค่าการสะท้อนของชั้นในของผิววัตถุ (R_g) เป็นศูนย์ ดังนั้นค่าการสะท้อนแสงของผิวหน้าวัตถุทั้งหมดบนวัตถุทึบแสงคือ

$$R_\infty = \left(1 + \frac{K}{S}\right) - \sqrt{\left(1 + \frac{K}{S}\right)^2 - 1} \tag{2.10}$$

เมื่อกลับสมการ (2.10) จะได้

$$\frac{K}{S}=\frac{\left(1-R_{\infty}\right)^{2}}{2R_{\infty}} \tag{2.11}$$

จะเห็นว่า ค่าการสะท้อนแสงบนวัตถุทึบแสงขึ้นกับอัตราส่วนของ K/S เท่านั้น จากสมการดังกล่าวคือ สมการที่ใช้ในการอธิบายทฤษฎีของคูเบลคา-มังค์ (Kubelka-Munk theory)[8, 9]

ค่าการสะท้อนแสงบนผิวหน้าของวัตถุนี้ไม่ได้คำนึงค่าดัชนีการหักเหของชั้นผิว ซอนเดอร์สันได้ศึกษาและแก้ไขค่าการสะท้อนแสงจากทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ โดยพิจารณาดัชนีการหักเหภายในชั้นผิว (K_1) และดัชนีการหักเหภายนอกชั้นผิว (K_2) ซึ่งดัชนีของชั้นผิวขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ เช่น พอลิเมอร์ (polymer) มีดัชนีการหักเหเท่ากับ 1.5 ทำให้ได้ค่า $K_1=0.04$ และ $K_2=0.4$ เป็นต้น ค่าการสะท้อนแสงบนผิวหน้าวัตถุที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ นำมาคำนวณแก้ไขด้วยสมการซอนเดอร์สัน (Saunderson's correction) ดังนี้

$$r_{\lambda,i}=\frac{R_{\lambda,m}-K_1}{1-K_1-K_2+K_2R_{\lambda,m}} \tag{2.12}$$

$$r_{\lambda,i}=\frac{R_{\lambda,m}}{1-K_1-K_2+K_2R_{\lambda,m}} \tag{2.13}$$

ซึ่งสมการ (2.12) เป็นการคำนวณค่าการสะท้อนแสงที่รวมแสงสเปกคิวลาร์ (specular included) และสมการ (2.13) เป็นการคำนวณค่าการสะท้อนแสงโดยไม่รวมแสงสเปกคิวลาร์ (specular excluded) เมื่อกลับสมการ (2.12) จะได้

$$R_{\lambda,m}=K_1+\frac{(1-K_1)(1-K_2)r_{\lambda,i}}{1-K_2r_{\lambda,i}} \tag{2.14}$$

จากทฤษฎีคูเบลคา-มังค์มีการทำนายหาสูตรการเทียบสี 2 วิธีคือ[8]

1. วิธี Single-constant

วิธีการนี้พิจารณาอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและการกระเจิงแสง (k/s) ของสี (colorant) ในฐานข้อมูล ซึ่งถ่วงน้ำหนักด้วยความเข้มข้น (c) ของสีที่ i เมื่อ $i=1,2,3,\ldots,n$ (n คือจำนวนสีทั้งหมดในฐานข้อมูล) วิธีการนี้พิจารณาว่าการกระเจิงแสงของสีมีค่าน้อยมาก ๆ หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และการกระเจิงแสงเกิดจากวัสดุ (substrate) เป็นหลัก ลักษณะกราฟของอัตราส่วนนี้

ควรให้ลักษณะที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกัน (scalable) ระหว่างสีเดี่ยว (mass tone) และสีเจือจาง (tint) ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนเป็นผลมาจากค่าการเปลี่ยนแปลงของค่า k สามารถทำนายสูตรการผสมสีได้จากสมการต่อไปนี้

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,mixture} = c_1\left(\frac{k}{s}\right)_{\lambda,1} + c_2\left(\frac{k}{s}\right)_{\lambda,2} + \cdots + c_n\left(\frac{k}{s}\right)_{\lambda,n} \qquad (2.15)$$

ดังนั้นค่าของ k/s สามารถหาได้จากสมการ (2.16) ดังนี้

$$\left(\frac{k}{s}\right)_{\lambda,i} = \frac{\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,mixture} - c_w\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,w}}{c_i} \qquad (2.16)$$

โดยที่ c_i คือ ค่าความเข้มข้นที่ใช้ของสีที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \ldots, n$ (n คือจำนวนสีทั้งหมดในฐานข้อมูล), c_w คือ ค่าความเข้มข้นของสีขาว และ $\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,w}$ ค่าสีของสีขาว

2. วิธี Two-constant

วิธีการนี้พิจารณาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสีในฐานข้อมูล (k) และสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของสีในฐานข้อมูล (s) เนื่องจากค่าการกระเจิงแสงของชั้นผิวในแต่ละชนิดให้ค่าที่ไม่คงที่ ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,mixture} = \frac{c_1 k_{\lambda,1} + c_2 k_{\lambda,2} + \cdots + c_n k_{\lambda,n}}{c_1 s_{\lambda,1} + c_2 s_{\lambda,2} + \cdots + c_n s_{\lambda,n}} \qquad (2.17)$$

โดยที่ c_i คือ ค่าความเข้มข้นที่ใช้ของสีที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \ldots, n$ (n คือจำนวนสีทั้งหมดในฐานข้อมูล) และ $\sum_{i=1}^{n} c_i = 1$

2.1.4 วิธีการลดข้อมูล

การลดจำนวนตัวแปรของข้อมูลมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายชุดข้อมูลเหล่านั้นให้ง่ายและสะดวก การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรทางสถิติมีหลายวิธี แต่ละวิธีให้ผลที่

แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ย่อมได้ แต่ขั้นตอนในการวิเคราะห์นั้นแตกต่างกันไป วิธีการลดข้อมูลที่นิยมใช้ในการนำมาวิเคราะห์ข้อมูล เช่น การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA), การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis, FA), วิธีการแยกค่าแบบเดี่ยว (Single Value Decomposition, SVD) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการลดข้อมูลดังนี้

2.1.4.1 การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA)

การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดตัวแปร เพื่อลดจำนวนตัวแปรของข้อมูลที่มีจำนวนมาก โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นที่มีลักษณะร่วมกัน ทำให้ได้ชุดข้อมูลใหม่ที่มีความสัมพันธ์ของข้อมูลเดิมอยู่ ซึ่งข้อมูลใหม่จะต้องมีจำนวนตัวแปรที่น้อยกว่าตัวแปรเดิม กล่าวคือ ถ้าชุดข้อมูลมีตัวแปรทั้งหมด p ตัว จำนวนตัวแปรใหม่มี m ตัว จะได้ว่า $m \le p$ โดยการลดจำนวนตัวแปรนั้นจะพิจารณาจากค่าความแปรปรวนของข้อมูลเดิมที่มีค่ามากที่สุด นำมาจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันกลายเป็นส่วนประกอบหลักที่ 1 (PC_1) ถ้ามีตัวแปรอื่นที่ไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกันในส่วนประกอบหลักที่ 1 จะจัดกลุ่มอยู่ในส่วนประกอบหลักที่ 2 (PC_2) และถ้ามีตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับส่วนประกอบหลักที่ 1 และ 2 จะจัดกลุ่มอยู่ในส่วนประกอบถัดไป (PC_i) จนครบจำนวนตัวแปรเดิม ส่วนประกอบหลักที่จัดกลุ่มเหล่านั้นคือ ตัวแปรใหม่ที่ได้มาจากการพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมกันกับตัวแปรเดิม ในการสร้างส่วนประกอบหลักของข้อมูลนั้นสามารถสร้างได้โดยกำหนดให้ PC_i แทนตัวประกอบหลักที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3, ..., p$ การสร้างส่วนประกอบหลักมีขั้นตอนดังนี้[10]

กำหนดให้ตัวแปรสุ่ม $X^T = (x_1, x_2, ..., x_p)$

1. PC_1 ส่วนประกอบหลักที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว ซึ่งมีความแปรปรวนของข้อมูลมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนประกอบหลักอื่น ๆ โดยที่

$$PC_1 = A_1^T X \quad \text{หรือ} \quad PC_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \tag{2.18}$$

ซึ่งมีค่าความแปรปรวน $\mathrm{var}(A_1^T X)$ มากที่สุด โดย $A_1^T A_1 = 1$ หรือ

$$A_1^T A_1 = a_{11}^2 + a_{12}^2 + \cdots + a_{1p}^2 = 1 \tag{2.19}$$

2. PC_2 ส่วนประกอบหลักที่ 2 ซึ่งเป็นตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว โดยสกัดตัวแปรที่เหลือและไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับส่วนประกอบหลักที่ 1 ให้มากที่สุด หรือต้องตั้งฉากกับส่วนประกอบหลักที่ 1 โดยที่

$$PC_2 = A_2^T X \text{ หรือ } PC_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \tag{2.20}$$

ซึ่งมีค่าความแปรปรวน $\mathrm{var}(A_2^T X)$ มากที่สุด โดย $A_2^T A_2 = 1$, $A_1^T A_2 = 0$ และ $\mathrm{cov}(A_1^T X, A_2^T X) = 0$ กล่าวคือ PC_1 และ PC_2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

3. PC_p ส่วนประกอบหลักที่ p ซึ่งเป็นตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของตัวแปรเดิม p ตัว โดยสกัดตัวแปรที่เหลือและไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกันกับส่วนประกอบที่ $1, 2, 3, \ldots, p-1$ ให้มากที่สุด โดยที่

$$PC_p = A_p^T X \text{ หรือ } PC_p = a_{p1}x_1 + a_{p2}x_2 + \cdots + a_{pp}x_p \tag{2.21}$$

ซึ่งมีค่าความแปรปรวน $\mathrm{var}(A_p^T X)$ มากที่สุด โดย $A_p^T A_p = 1$ และ $\mathrm{cov}(A_p^T X, A_j^T X) = 0$ สำหรับ $j < p$ กล่าวคือ

$$\mathrm{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \bar{X}\right)\left(Y_i - \bar{Y}\right)}{N - 1} \tag{2.22}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากขั้นตอนการสร้างส่วนประกอบหลักจะได้ว่า ค่าความแปรปรวนของส่วนประกอบหลักที่ 1 มีค่ามากที่สุดและค่าความแปรปรวนของส่วนประกอบหลักอื่น ๆ นั้นจะลดลงเรื่อยๆ จนทำให้ค่าความแปรปรวนของส่วนประกอบหลักที่ p นั้นมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ

$$\mathrm{var}(PC_1) > \mathrm{var}(PC_2) > \ldots > \mathrm{var}(PC_p) \tag{2.23}$$

จากตัวแปรสุ่ม X^T ซึ่งมีเมทริกซ์ค่าความแปรปรวนร่วม D และมีค่าเฉพาะ (eigenvalue) $e_1 \geq e_2 \geq \ldots \geq e_p \geq 0$ ซึ่งค่าเฉพาะนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ โดยค่าความแปรปรวนของส่วนประกอบหลักคือ

$$\text{var}(PC_1) = A_i^T D A_i \quad \text{เมื่อ} \quad i = 1, 2, 3, ..., p \tag{2.24}$$

และความแปรปรวนร่วมของส่วนประกอบหลักที่ i และ j คือ

$$\text{cov}(PC_i, PC_j) = A_i^T D A_j \text{ โดยที่ } i \neq j \text{ และ } i, j = 1, 2, 3, ..., p \tag{2.25}$$

สัดส่วนค่าความแปรปรวนของแต่ละส่วนประกอบหาได้จาก

$$PC_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^{p} e_i} \tag{2.26}$$

จากส่วนประกอบหลักที่ไม่มีความสัมพันธ์กันในแต่ละส่วนประกอบ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเดิมกับส่วนประกอบหลักได้จากค่า loading ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบหลักที่ i และตัวแปรเดิม i ดังนั้นค่า loading จึงใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบหลักและตัวแปรเดิม ถ้าค่า loading มีค่ามาก (เข้าใกล้ -1 หรือ $+1$) โดยทั่วไปพิจารณาค่า loading ที่ ± 0.5 แสดงว่าตัวแปรเดิมนั้นมีอิทธิพลต่อส่วนประกอบหลักนั้นมาก ดังสมการต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\left.\begin{aligned} X_1 &= l_{11}PC_1 + l_{12}PC_2 + \cdots + l_{1p}PC_p \\ X_2 &= l_{21}PC_1 + l_{22}PC_2 + \cdots + l_{2p}PC_p \\ &\vdots \\ X_p &= l_{p1}PC_1 + l_{p2}PC_2 + \cdots + l_{pp}PC_p \end{aligned}\right\} \tag{2.27}$$

สำหรับค่า loading สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$l_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\text{var}(X_j)}}\sqrt{e_i} \tag{2.28}$$

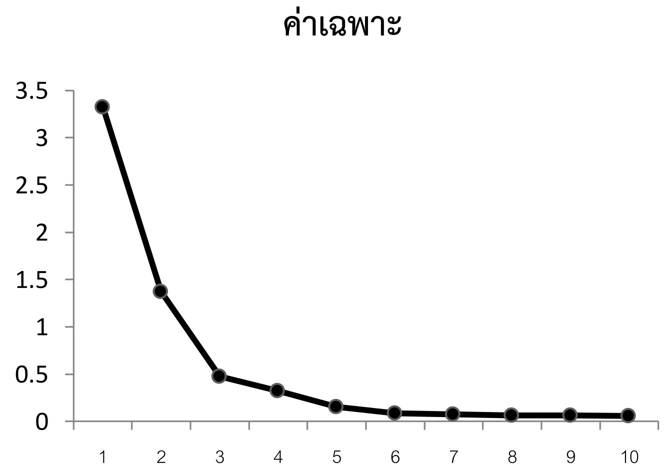
โดยที่ l_{ij} คือค่า loading ของตัวแปรเดิมที่ j หรือ X_j กับส่วนประกอบหลักที่ i หรือ PC_i

a_{ij} คือน้ำหนักของตัวแปรเดิมที่ j ในการสร้างส่วนประกอบหลักที่ i

e_i คือค่าเฉพาะของส่วนประกอบหลักที่ i

$\mathrm{var}(X_j)$ คือ ค่าความแปรปรวนของตัวแปรเดิมที่ j หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรเดิมที่ j

จากค่าเฉพาะ ใช้ Scree plot ซึ่งเป็นกราฟที่พล็อตค่าเฉพาะของแต่ละส่วนประกอบเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังภาพที่ 2.4 เพื่อพิจารณาการเลือกจำนวนส่วนประกอบหลักที่เหมาะสม โดยพิจารณากราฟดูค่าเฉพาะที่เหมาะสม ถ้าค่าเฉพาะนั้นลดลงอย่างรวดเร็วจนลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งให้เลือกกลุ่มของค่าเฉพาะที่มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ เนื่องจากค่าเฉพาะนั้นอธิบายถึงความแปรปรวนของข้อมูล ถ้าค่าเฉพาะของกลุ่มข้อมูลนั้นน้อยมาก แสดงว่ากลุ่มข้อมูลนั้นให้ความแปรปรวนที่น้อยมาก ไม่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดังนั้นสามารถสกัดชุดข้อมูลเหล่านั้นทิ้งได้



ภาพที่ 2.4 ค่าเฉพาะ (eigenvalue) กับส่วนประกอบหลักที่ 1-10

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลตัวอย่างเพื่อแสดงวิธีการสกัดตัวแปรจากข้อมูลนี้ ซึ่งประกอบด้วยทั้งหมด 6 ตัวแปร X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 และ X_6 จาก 10 ตัวอย่าง หากเทียบกับข้อมูลในงานวิจัยนี้ ตัวแปร X คือ ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เช่น X_1 คือ ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร X_2 คือ ค่าที่ 410 นาโนเมตร เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องการลดจำนวนข้อมูล ส่วนตัวอย่างที่ 1 ถึง 10 เทียบได้กับสีแต่ละสีในฐานข้อมูลเพื่อทำนายสูตรการเทียบสี

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลตัวอย่าง

ตัวอย่าง	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
1	2	10	5	3	10	5
2	3	14	9	5	10	8
3	4	5	4	10	7	5
4	6	7	10	6	2	10
5	10	8	10	9	8	4
6	12	4	13	4	5	9
7	8	10	6	8	9	7
8	9	9	8	8	4	7
9	3	5	4	3	7	3
10	5	8	10	6	7	10
ค่าเฉลี่ย	6.2	8	7.9	6.2	6.9	6.8

จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 จะได้เมทริกซ์ค่าความแปรปรวนร่วมดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} 11.511 & -3.111 & 6.800 & 2.844 & -3.756 & 2.044 \\ -3.111 & 8.889 & -0.222 & -0.111 & 4.222 & 1.000 \\ 6.800 & -0.222 & 9.211 & -0.422 & -3.122 & 5.200 \\ 2.844 & -0.111 & -0.422 & 6.178 & -0.756 & -0.400 \\ -3.756 & 4.222 & -3.122 & -0.756 & 6.767 & -2.800 \\ 2.044 & 1.000 & 5.200 & -0.400 & -2.800 & 6.178 \end{bmatrix}$$

โดยที่เมทริกซ์ค่าเฉลี่ยของข้อมูลคือ $\bar{X} = \begin{bmatrix} 6.2 \\ 8 \\ 7.9 \\ 6.2 \\ 6.9 \\ 6.8 \end{bmatrix}$

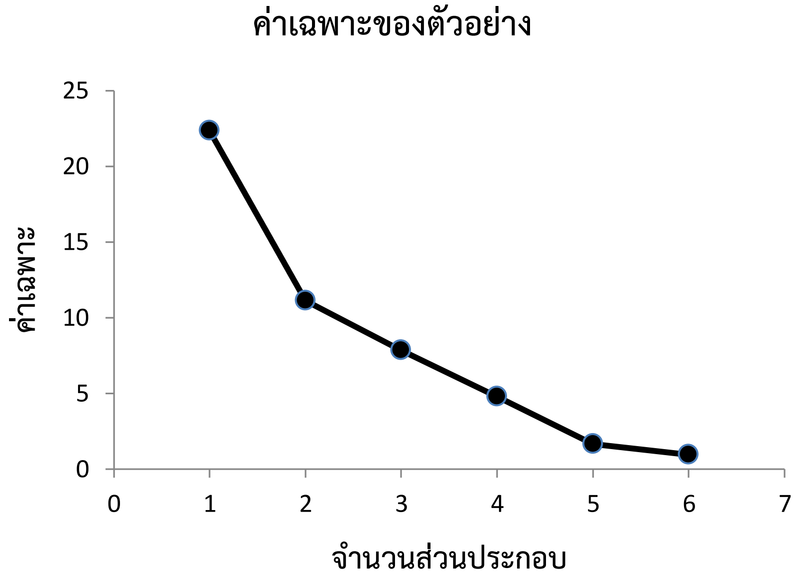
ค่าความแปรปรวนทั้งหมด

$$\sum_{i=1}^{6} \mathrm{var}(X_i) = 11.511 + 8.889 + 9.211 + 6.178 + 6.767 + 6.178 = 48.733$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สัดส่วนค่าความแปรปรวนของ X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 และ X_6 คือ 23.62% , 18.24% , 18.90% , 12.68% , 13.89% และ 12.68% ตามลำดับ

เมื่อคำนวณค่าเฉพาะจากเมทริกซ์ค่าความแปรปรวนร่วมจะได้ค่าเฉพาะดังนี้ $e_1 = 22.357$, $e_2 = 11.126$, $e_3 = 7.855$, $e_4 = 4.796$, $e_5 = 1.649$ และ $e_6 = 0.952$ ตามลำดับ สามารถสร้างกราฟ scree ได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ค่าเฉพาะของตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และได้ค่าเวกเตอร์เฉพาะดังนี้

$$A_1^T = (0.629, 0.087, -0.451, 0.385, 0.265, 0.419),$$
$$A_2^T = (-0.254, -0.737, -0.338, -0.128, 0.511, -0.036),$$
$$A_3^T = (0.537, -0.419, 0.105, 0.217, -0.259, -0.641),$$
$$A_4^T = (0.109, 0.174, -0.690, -0.585, -0.312, -0.208),$$
$$A_5^T = (-0.387, -0.242, -0.332, 0.507, -0.620, 0.201) \text{ และ}$$
$$A_6^T = (0.301, -0.430, 0.293, -0.436, -0.346, 0.573)$$

ดังนั้นสามารถสร้างส่วนประกอบหลักได้ 6 ตัวดังต่อไปนี้

$$PC_1 = 0.629x_1 + 0.086802x_2 - 0.451x_3 + 0.385x_4 + 0.265x_5 + 0.419x_6$$
$$PC_2 = -0.254x_1 - 0.737x_2 - 0.338x_3 - 0.128x_4 + 0.511x_5 - 0.036x_6$$
$$PC_3 = 0.537x_1 - 0.419x_2 + 0.105x_3 + 0.217x_4 - 0.259x_5 - 0.641x_6$$
$$PC_4 = 0.109x_1 + 0.174x_2 - 0.690x_3 - 0.585x_4 - 0.312x_5 - 0.208x_6$$
$$PC_5 = -0.387x_1 - 0.242x_2 - 0.332x_3 + 0.507x_4 - 0.620x_5 + 0.201x_6$$
$$PC_6 = 0.301x_1 - 0.430x_2 + 0.293x_3 - 0.436x_4 - 0.346x_5 + 0.573x_6$$

โดยที่

$$A_1^T A_1 = 0.629^2 + 0.087^2 + (-0.451)^2 + 0.385^2 + 0.265^2 + 0.419^2 = 1,$$
$$A_2^T A_2 = (-0.254)^2 + (-0.737)^2 + (-0.338)^2 + (-0.128)^2 + 0.511^2 + (-0.036)^2 = 1,$$
$$A_3^T A_3 = 0.537^2 + (-0.419)^2 + 0.105^2 + 0.217^2 + (-0.259)^2 + (-0.641)^2 = 1,$$
$$A_4^T A_4 = 0.109^2 + 0.174^2 + (-0.690)^2 + (-0.585)^2 + (-0.312)^2 + (-0.208)^2 = 1,$$
$$A_5^T A_5 = (-0.387)^2 + (-0.242)^2 + (-0.332)^2 + 0.507^2 + (-0.620)^2 + 0.201^2 = 1$$

และ $A_6^T A_6 = 0.301^2 + (-0.430)^2 + 0.293^2 + (-0.436)^2 + (-0.346)^2 + 0.573^2 = 1$

ดังนั้นค่าความแปรปรวนของส่วนประกอบที่ได้คือ

$\text{var}(PC_1) = e_1 = 22.357$, $\text{var}(PC_2) = e_2 = 11.126$, $\text{var}(PC_3) = e_3 = 7.855$, $\text{var}(PC_4) = e_4 = 4.795$, $\text{var}(PC_5) = e_5 = 1.649$ และ $\text{var}(PC_6) = e_6 = 0.952$

ค่าความแปรปรวนรวมของตัวแปรใหม่คือ

$$\sum_{i=1}^{6} \text{var}(PC_i) = 48.73 = \sum_{i=1}^{6} e_i$$

และจากสมการ (2.26) จะได้สัดส่วนของค่าความแปรปรวนของ PC_1, PC_2, PC_3, PC_4, PC_5 และ PC_6 คือ 45.88% , 22.83% , 16.12% , 9.84% , 3.38% และ 1.95% ตามลำดับ กล่าวได้ว่า ส่วนประกอบหลักที่ 1 หรือ PC_1 นั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเดิมได้ 45.88% ส่วนประกอบหลักที่ 2 หรือ PC_2 นั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเดิมได้ 22.83% และส่วนประกอบหลักที่ 3 หรือ PC_3 นั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเดิมได้ 16.12% แสดงให้เห็นว่า ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนแรกสามารถอธิบายตัวแปรเดิมได้มากกว่า 80% จากสมการ (2.28) สามารถคำนวณหาค่า loading ได้ดังนี้

$$\begin{array}{c} \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{array}\begin{array}{cccccc} PC_1 & PC_2 & PC_3 & PC_4 & PC_5 & PC_6 \\ \left[\begin{array}{cccccc} \mathbf{0.876179} & 0.085338 & -0.37257 & 0.248257 & 0.100347 & 0.120492 \\ -0.40284 & \mathbf{-0.82430} & -0.31772 & -0.0938 & 0.219934 & -0.01178 \\ \mathbf{0.836366} & -0.46047 & 0.097156 & 0.15665 & -0.10945 & -0.20616 \\ 0.207187 & 0.233415 & \mathbf{-0.77762} & -0.51503 & -0.16126 & -0.08151 \\ -0.70349 & -0.31027 & -0.35718 & 0.42645 & -0.30610 & 0.075552 \\ 0.571808 & \mathbf{-0.57767} & 0.33023 & -0.38424 & -0.17893 & 0.224985 \end{array}\right] \end{array}$$

จะเห็นได้ว่า PC_1 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ X_1 และ X_3 ได้ดีกว่าส่วนประกอบอื่น ๆ เพราะมีค่า loading มาก ส่วน PC_2 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ X_2 และ X_6 ได้ดีกว่าส่วนประกอบอื่น ๆ ส่วน PC_3 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของ X_4 ได้ดีกว่า PC_4 เพราะมีค่า loading มากกว่า ส่วนประกอบอื่น ๆ (PC_5 และ PC_6) ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้เลย เนื่องจากมีค่า loading ที่น้อยกว่า ± 0.5 และจะเห็นได้ว่า X_5 ไม่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ใด ๆ ได้เลย

2.1.4.2 การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis)

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักเพื่อลดจำนวนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน ซึ่งวิธีนี้เป็นการอธิบายค่าความแปรปรวนของตัวแปรของข้อมูล เพื่อนำมาสกัดตัวแปร แต่การเลือกข้อมูลใดมาวิเคราะห์นั้นอาจจะเกิดปัญหาได้ จึงต้องมีวิธีในการเลือกชุดข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผล ดังนั้นในหัวข้อนี้กล่าวถึง การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis) การวิเคราะห์ปัจจัยมีเทคนิคการวิเคราะห์ 2 ประเภทคือ[10]

1. การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis)

การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจเป็นการวิเคราะห์ที่ไม่ทราบโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร เช่น การทำนายสูตรการผสมสี ถ้าหากไม่ทราบฐานข้อมูลของสี องค์ประกอบในการทำนายสีหรือความสัมพันธ์ของสีแต่ละสี ก็ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์หรือทำนายสูตรการผสมสีได้ เพราะไม่ทราบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์อย่างไร และทำให้ไม่สามารถจัดกลุ่มปัจจัยของตัวแปรแต่ละชนิดได้ เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis)

การวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยันเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ทราบโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรหรือคาดได้ว่าโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นรูปแบบใด หรือคาดได้ว่าตัวแปรใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กันมากและควรอยู่ในปัจจัยเดียวกัน ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นการยืนยันความสัมพันธ์ของตัวแปร ทำให้สามารถนำผลมาวิเคราะห์ได้อย่างชัดเจน

การวิเคราะห์ปัจจัยเป็นวิธีการลดจำนวนตัวแปรอีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นการสร้างปัจจัย (factor) โดยจัดกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันให้อยู่ในปัจจัยเดียวกัน กล่าวคือ พิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยดูค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation) คำนวณหาค่าปัจจัย (factor score) ซึ่งเป็นค่าข้อมูลของปัจจัยที่สร้างขึ้น และค่าน้ำหนักปัจจัย (factor loading) เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเดิมกับปัจจัยร่วมที่สร้างขึ้น จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก หากค่า loading มีค่าน้อยกว่า ± 0.5 จะให้การเลือกตัวแปรที่จะเป็นตัวแทนของข้อมูลนั้นยาก ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องนำข้อมูลมาวิเคราะห์ปัจจัยหลัก โดยการหมุนแกนเพื่อทำให้ค่า loading ของปัจจัยร่วมใดปัจจัยหนึ่งนั้นเพิ่มขึ้น วิธีการหมุนแกนปัจจัยมี 2 วิธี คือ[10]

1. การหมุนแกนปัจจัยร่วมให้ตั้งฉากกัน (Orthogonal Rotation)

   1.1 วิธี Varimax

   วิธี Varimax เป็นวิธีที่ทำให้จำนวนตัวแปรน้อยที่สุดที่มีค่า loading สูงในปัจจัยร่วมเพียงปัจจัยเดียว วิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและมักใช้กับวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก

   1.2 วิธี Quartimax

   วิธี Quartimax เป็นวิธีการหมุนแกนปัจจัยเพื่อให้ค่าน้ำหนักปัจจัยมีค่า loading ที่สูงเพียง 1 ค่าในปัจจัยร่วมใดปัจจัยหนึ่ง กล่าวคือ ต้องมีปัจจัยหนึ่งซึ่งเป็นปัจจัยร่วมของทุกตัวแปรเรียกปัจจัยนี้ว่า ปัจจัยทั่วไป (general Factor)

   1.3 วิธี Equamax

   วิธี Equamax เป็นวิธีการหมุนแกนปัจจัยร่วมรวมกันระหว่าง วิธี Varimax และวิธี Quartimax วิธีนี้จะให้ตัวแปรในการวิเคราะห์นั้นลดลงและทำให้ได้ค่า loading สูงขึ้น

2. การหมุนแกนแบบเฉียง (Oblique Rotation)

   การหมุนแกนแบบเฉียงเป็นการหมุนแกนปัจจัยร่วมแล้วไม่ทำให้แกนปัจจัยร่วมตั้งฉากกัน ซึ่งมีหลายวิธี วิธีที่นิยมได้แก่ วิธี Covarimin, วิธี Oblimax

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1 วิธี Covarimin

วิธี Covarimin เป็นวิธีการหมุนแกนแบบวิธี Varimax แต่แกนปัจจัยร่วมนั้นไม่ตั้งฉากกัน

2.2 วิธี Oblimax

วิธี Oblimax เป็นวิธีที่ทำให้ค่า loading ที่มีค่ามากและมีค่าน้อยเพิ่มมากขึ้น เพื่อทำให้การจัดตัวแปรง่ายขึ้น

2.1.5 การหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming, LP), กำหนดการไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming, NLP) และ วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex method) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นมีข้อจำกัดในการคำนวณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชุดข้อมูลที่นำมาคำนวณ ในงานวิจัยนี้ได้หาค่าเหมาะสมที่สุดของข้อมูลด้วยวิธีการเชิงเส้นเนื่องจากชุดข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นข้อมูลลักษณะเชิงเส้น จึงได้ศึกษาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเชิงเส้นหรือกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming)

บทนิยามของกำหนดการเชิงเส้น (Linear optimization) ให้ A เป็นเมทริกซ์ $m \times n$ อยู่ในจำนวนจริงบวก $\mathbb{R}^+$ โดยที่พจน์คงตัว (constant term) b และสัมประสิทธิ์ (coefficient) a_{ij} เมื่อ $i = \{1, 2, \ldots, m\}$ และ $j = \{1, 2, \ldots, n\}$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป[11, 12]

$$\left.\begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \qquad \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m \end{array}\right\} \tag{2.29}$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$A\vec{x} = \vec{b} \tag{2.30}$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \ \vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \text{ และ } \vec{\mathrm{b}} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

จากสมการ (2.30) สามารถคำนวณหาค่า $\vec{x}$ ได้ดังนี้

$$A\vec{x} = \vec{b}$$

$$A^T A\vec{x} = A^T b$$

$$\vec{x} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

เรียก $(A^T A)^{-1} A^T$ ว่า Pseudo inverse

2.1.6 การประมาณค่าในช่วง (Interpolation)

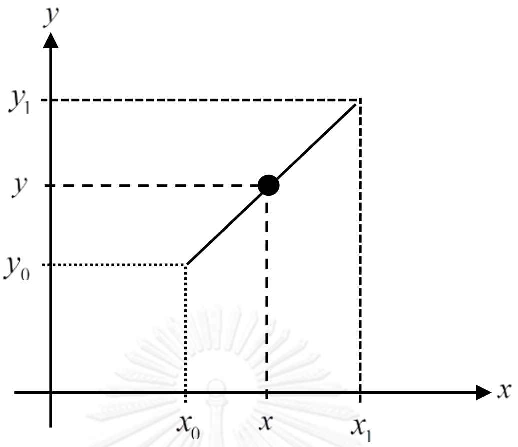
การประมาณค่าในช่วงเป็นการประมาณค่าจากข้อมูลตัวอย่างเป็นช่วง ๆ ในช่วงใดช่วงหนึ่ง การประมาณค่านี้มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย เนื่องจากการแบ่งช่วงในการประมาณนั้นหากแบ่งช่วงถี่มากเท่าใดค่าที่ประมาณจะมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น การประมาณค่าในช่วงมีหลายวิธี เช่น การประมาณค่าในช่วงด้วยเชิงเส้น (Linear Interpolation), การประมาณค่าในช่วงด้วยพหุนาม (Polynomial Interpolation), การประมาณค่าในช่วงด้วยฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (Spline Interpolation) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประมาณค่าในช่วงด้วยเชิงเส้น

การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolation) เป็นวิธีที่สะดวกและง่ายที่สุดในการประมาณค่า โดยพิจารณาจากสมการเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 2 จุด คือ (x_0, y_0) และ (x_1, y_1) เมื่อประมาณค่า y ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า x โดยที่ $x_0 \le x \le x_1$ และ $y_0 \le y \le y_1$ พิจารณาดังภาพที่ 2.6 จากคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า[13]

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0} \tag{2.31}$$

ดังนั้นค่า y ที่ได้จากการประมาณคือ

$$y = y_0 + \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0}\right)(y_1 - y_0) \tag{2.32}$$



ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างจุดในการประมาณค่า

2.1.7 ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000

ค่าความแตกต่างสีคือ ค่าที่ใช้บอกความแตกต่างของสีสองสีเป็นตัวเลข ถึงแม้ว่าสีสองสีนั้นจะไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า แต่อาจมีค่าความแตกต่างสีไม่เท่ากับศูนย์ได้ เนื่องจากสีสองสีนั้นมีสีใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่าความแตกต่างสีเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้แสดงถึงความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจน ซึ่งสมการคำนวณค่าความแตกต่างสีมีอยู่หลายสมการ ในงานวิจัยนี้ใช้ CIEDE2000 เนื่องจากเป็นสมการที่แนะนำโดย CIE เหมาะสมกับตัวอย่างทุกประเภท โดยมีวิธีการคำนวณค่าความแตกต่างสีดังนี้[14]

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)\left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \tag{2.33}$$

โดยที่

$$\bar{L}' = \frac{L_1 + L_2}{2} \tag{2.34}$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \tag{2.35}$$

$$C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \tag{2.36}$$

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2} \tag{2.37}$$

$$G = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right) \tag{2.38}$$

$$a_1' = a_1\left(1 + G\right) \tag{2.39}$$

$$a_2' = a_2\left(1 + G\right) \tag{2.40}$$

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2} \tag{2.41}$$

$$h_1' = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{b_1}{a_1'}\right) & ;\ \arctan\left(\dfrac{b_1}{a_1'}\right) \geq 0 \\ \arctan\left(\dfrac{b_1}{a_1'}\right) + 360° & ;\ \arctan\left(\dfrac{b_1}{a_1'}\right) < 0 \end{cases} \tag{2.42}$$

$$h_2' = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{b_2}{a_2'}\right) & ;\ \arctan\left(\dfrac{b_2}{a_2'}\right) \geq 0 \\ \arctan\left(\dfrac{b_2}{a_2'}\right) + 360° & ;\ \arctan\left(\dfrac{b_2}{a_2'}\right) < 0 \end{cases} \tag{2.43}$$

$$\bar{H}' = \begin{cases} \dfrac{h_1' + h_2' + 360°}{2} & ;\ \left|h_1' - h_2'\right| > 180° \\ \dfrac{h_1' + h_2'}{2} & ;\ \left|h_1' - h_2'\right| \leq 180° \end{cases} \tag{2.44}$$

$$T = 1 - 0.17\cos\left(\bar{H}' - 30°\right) + 0.24\cos\left(2\bar{H}'\right) + 0.32\cos\left(3\bar{H}' + 6°\right) - 0.20\cos\left(4\bar{H}' - 63°\right) \tag{2.45}$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & ; \ \left|h_1' - h_2'\right| \le 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & ; \ \left|h_1' - h_2'\right| > 180^\circ, h_2' \le h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & ; \ \left|h_1' - h_2'\right| > 180^\circ, \ h_2' > h_1' \end{cases} \tag{2.46}$$

$$\Delta L' = L_2 - L_1 \tag{2.47}$$

$$\Delta C' = C_2' - C_1' \tag{2.48}$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \tag{2.49}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \tag{2.50}$$

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}' \tag{2.51}$$

$$S_H = 1 + 0.015\bar{C}'T \tag{2.52}$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25}\right)^2\right\} \tag{2.53}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \tag{2.54}$$

$$R_T = -R_C \sin\left(2\Delta\theta\right) \tag{2.55}$$

$$\left.\begin{array}{l} K_L = 1 \\ K_C = 1 \\ K_H = 1 \end{array}\right\} \text{ ค่าโดยปริยาย (default)}$$

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Berns และคณะ[5] ได้ทำการทดลองทำนายการเทียบสีด้วยทฤษฎีของคูเบลคา-มังค์ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการคำนวณ 2 วิธีคือ Single-constant และ Two-constant สำหรับสีทาประเภทสีอะคริลิกพบว่า การทำนายจากการเตรียมฐานข้อมูลด้วยสีเจือจาง (tint) ซึ่งได้จากสีเดี่ยว (mass tone) ผสมกับสีขาวในอัตราส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 4 ค่า ให้ความคลาดเคลื่อนของค่าการสะท้อนแสงที่ดีเมื่อคำนวณด้วยวิธี Single-constant ซึ่งผลที่ได้ไม่แตกต่างไปจากการคำนวณด้วยวิธี Two-constant แต่หากใช้สีเดี่ยวในการทำนายค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าใช้สีเจือจาง เนื่องจากสีเดี่ยวให้ลักษณะกราฟของค่าการสะท้อนแสงที่มีรูปร่างสอดคล้องกันกับสีเจือจางในความเข้มข้นต่าง ๆ กัน และอาจทำให้เกิดเมทาเมอริซึม (metamerism) สำหรับสีบางสี ทำให้การสร้างฐานข้อมูลจากสีตัวอย่างนั้นเมื่อคำนวณด้วยวิธี Single-constant ได้ผลลัพธ์ที่ดี และอีกงานวิจัยของ Berns และคณะ[4] ได้ทำการทดลองเพิ่มเติม เพราะ Single-constant นั้นจะได้ผลดีในระบบสีย้อมผ้า (dyed system) ดังนั้นเพื่อการคำนวณด้วยวิธีนี้ในระบบสีทานั้น ผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนสูตรความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายการเทียบสีพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนสูตรความเข้มข้นแล้วในระบบสีทานั้นให้ความแม่นยำในการคำนวณด้วยวิธี Single-constant ดีกว่าระบบสีย้อมผ้า ทำให้การคำนวณด้วยวิธี Single-constant นั้นใช้ในการทำนายการเทียบสีได้ดีกว่า อีกทั้งยังมีการคำนวณที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อน

Koirala และคณะ[6] ได้ทำการทดลองโดยใช้การทำนายหาค่า K/S ที่เหมาะสมของแต่ละสารสีเดี่ยวด้วยวิธี Single-constant โดยเตรียมสารสี (pigment) ที่มาใช้ในการทำนายด้วยการนำสารสีเดี่ยวผสมกับสารเติมเต็ม (filling material) ทำนายหาความเข้มข้นที่จะนำมาใช้งานจริงพบว่าวิธี Single-constant และการสร้างฐานข้อมูลจากสีเจือจางสามารถทำนายการเทียบสีได้อย่างแม่นยำ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ Macbook 2010 13 inches
   - Processor 2.4 GHz Intel core2Duo
   - RAM 4 GB
   - OS: windows 7 (32 bit)
2. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
   - X-Rite รุ่น SP62
   - Geometry d/8°
   - Aperture size 4 มิลลิเมตร
   - Wavelength range 400-700 นาโนเมตร
   - Spectral bandwidth 10 นาโนเมตร
   - Light source: Gas-filled tungsten lamp
   - Illumination type: D65
   - Standard observer: 10°
   - Specular included
   - X-Rite color master
3. โปรแกรมภาษาอาร์
4. โปรแกรม Matlab R2013b
5. โปรแกรม Microsoft office
   - Microsoft word 2010
   - Microsoft excel 2010
6. K bar เบอร์ 8 เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 มิลลิเมตร
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก (ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. สีน้ำมันมาร์โก 9 สีได้แก่ Tinting red, Orange, Reddish yellow, Laurel green, Ocean blue, River blue, Smoke, White และ Black
9. กระดาษอาร์ตมัน
10. สมุดตัวอย่างสีสีน้ำมัน

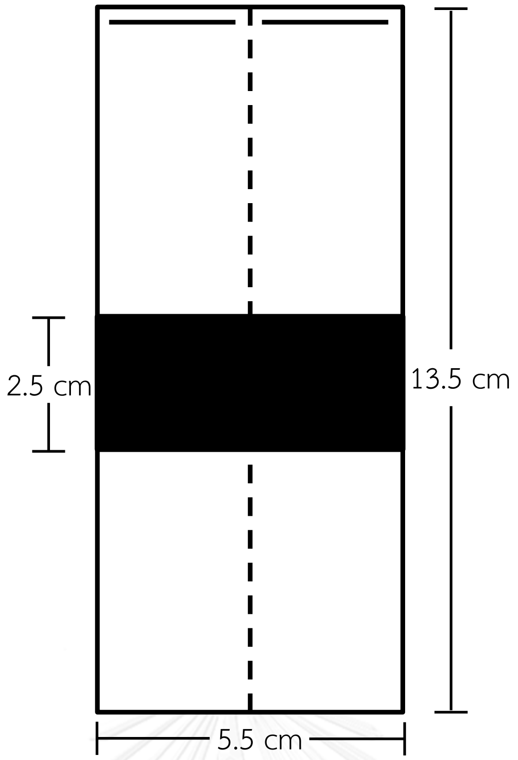
3.2 วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการหาสูตรการเทียบสี ซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การเตรียมตัวอย่างสี การสร้างฐานข้อมูล การลดข้อมูล การทำนายสูตรการเทียบสี และการวิเคราะห์ความแม่นยำ

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างสี

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการสะท้อนแสงของชุดตัวอย่างสี (training set) เพื่อนำค่าการสะท้อนแสงไปหาค่า k/s สำหรับสร้างฐานข้อมูลสีต่อไป ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสีและวัดค่าการสะท้อนแสงมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างสีน้ำมันเคลือบเงา จำนวน 9 สี ประกอบด้วย
   1) Neutral colour จำนวน 2 สี คือ สี White และ Black เนื่องจากเป็นสีที่ช่วยปรับความสว่างของสีผสม ทำให้ดีสีที่เข้มขึ้น (การผสมสีดำ) หรือซีดจางลง (การผสมสีขาว)
   2) สีที่ใกล้เคียงกับแม่สีในระบบการผสมสีแบบลบจำนวน 3 สี ได้แก่ สี Ocean Blue, Tinting Red และ Reddish Yellow เพื่อเป็นตัวแทนของสี cyan, magenta และ yellow ตามลำดับ เนื่องจากสีน้ำมันมาร์โกไม่มีสีเหล่านี้
   3) สีที่เป็นตัวแทนของสีทุติยภูมิในการผสมสีแบบลบจำนวน 3 สี ได้แก่ สี Orange, Laurel Green และ River Blue เป็นตัวแทนของสี red, green และ blue ตามลำดับ
   4) สีที่นิยมใช้กันคือ สี Smoke
2. เตรียมกระดาษอาร์ตมันที่พิมพ์แถบดำคาดตามขวางไว้บนกระดาษขนาด 5.5x13.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.1 เพื่อใช้ในการสังเกตในการทึบแสงของสีที่ปาดลงบนกระดาษ



ภาพที่ 3.1 ขนาดกระดาษอาร์ตมันสำหรับปาดสี

3. นำสีเดี่ยวผสมกับสีขาวที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นโดยน้ำหนักที่ต่างกันดังนี้ 0.15, 0.25, 0.35, 0.70 และ 0.85 สีเดี่ยวที่ผสมกับสีขาวนี้เรียกว่า สีเจือจาง (tint) ซึ่งได้ตัวอย่างสีทั้งหมด 49 สี แบ่งเป็นสีเจือจางจำนวน 40 สี และสีเดี่ยวจำนวน 9 สี
4. นำตัวอย่างสีแต่ละสีปาดลงบนกระดาษอาร์ตมัน (drawdown) จนทึบแสงดังภาพที่ 3.2
5. เมื่อตัวอย่างสีทึบแสงและแห้งแล้ว จึงเก็บข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างสีทั้งหมด โดยวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์อย่างน้อย 10 ตำแหน่ง เลือกตำแหน่งที่มีพื้นผิวของสีค่อนข้างเรียบ เนื่องจากแผ่นตัวอย่างสีที่แห้งนั้นมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ สาเหตุมาจากอากาศและสิ่งแวดล้อมรอบข้างทำให้มีฝุ่นเกาะ และเนื้อสีที่ไม่สม่ำเสมอ กำหนดวิธีการวัดแบบรวมแสงสเปกคิวลาร์ (specular included) เพื่อให้ได้ค่าข้อมูลเฉพาะตัวอย่างสีที่ไม่ขึ้นกับลักษณะของพื้นผิวตัวอย่างสี
6. นำค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างสี

ภาพที่ 3.2 สีเมื่อไม่ทึบแสง (ซ้าย) สีเมื่อทึบแสง (ขวา)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างฐานข้อมูล

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่า k / s ของสีน้ำมันเคลือบเงาจำนวน 9 สี ในข้อ 1 (ขั้นตอนที่ 1) เพื่อสร้างฐานข้อมูลของแม่สีในการผสมสี ขั้นตอนการหาค่า k / s มีรายละเอียดดังนี้

1. จับกลุ่มฐานข้อมูลตามความเข้มข้นของตัวอย่างสีที่เตรียมในขั้นตอนที่ 1 เป็น 7 กลุ่ม ดังนี้

   กลุ่มที่ 1 Mass tone เป็นชุดข้อมูลของสีเดี่ยว 9 สี

   กลุ่มที่ 2 Tint 1 เป็นชุดข้อมูลของสี 9 สี ประกอบด้วยสีเจือจาง 8 สี $(0.15c + 0.85w)$ กับสีขาว 1 สี

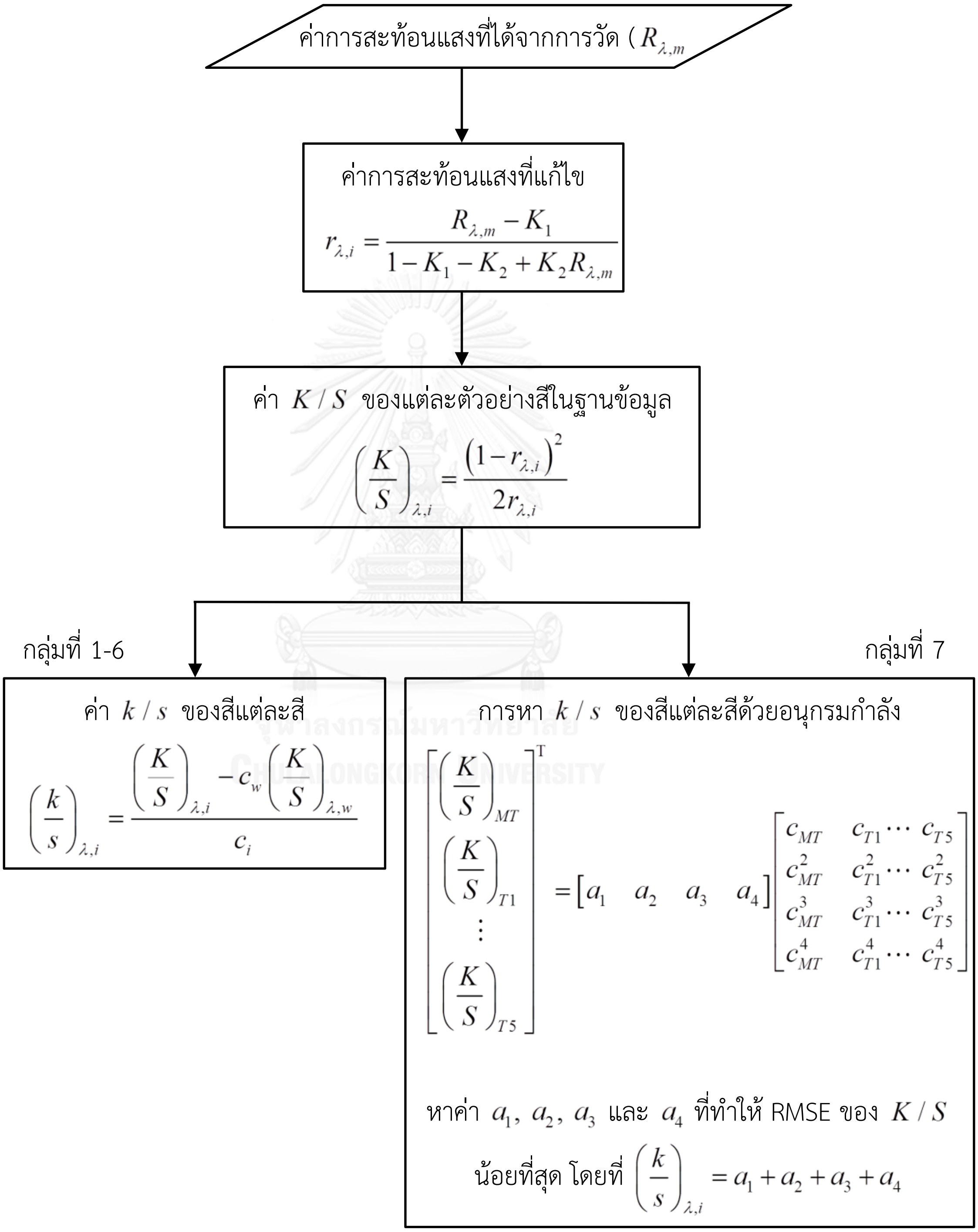
   กลุ่มที่ 3 Tint 2 เป็นชุดข้อมูลของสี 9 สี ประกอบด้วยสีเจือจาง 8 สี $(0.25c + 0.75w)$ กับสีขาว 1 สี

   กลุ่มที่ 4 Tint 3 เป็นชุดข้อมูลของสี 9 สี ประกอบด้วยสีเจือจาง 8 สี $(0.35c + 0.65w)$ กับสีขาว 1 สี

   กลุ่มที่ 5 Tint 4 เป็นชุดข้อมูลของสี 9 สี ประกอบด้วยสีเจือจาง 8 สี $(0.70c + 0.30w)$ กับสีขาว 1 สี

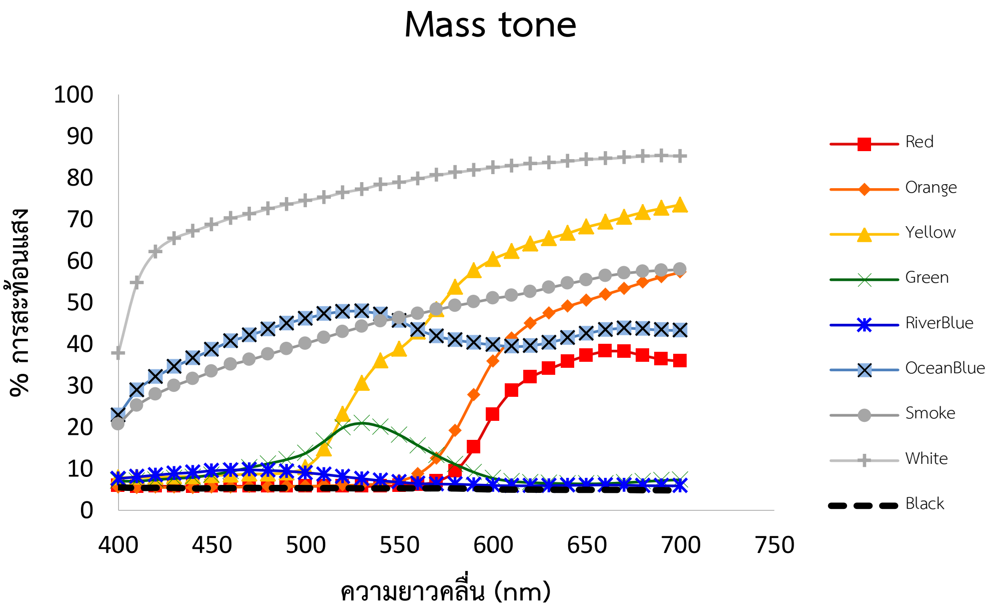
กลุ่มที่ 6 Tint 5 เป็นชุดข้อมูลของสี 9 สี ประกอบด้วยสีเจือจาง 8 สี $(0.85c + 0.15w)$ กับสีขาว 1 สี

กลุ่มที่ 7 All tints เป็นชุดข้อมูลรวมของกลุ่มที่ 1-6 มีทั้งหมด 49 สี

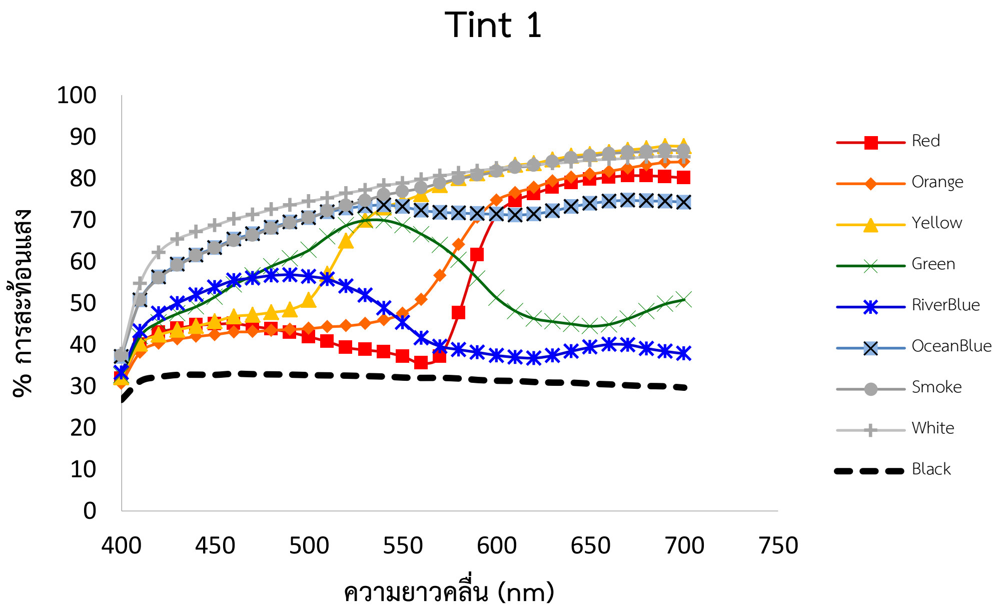


ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า k/s

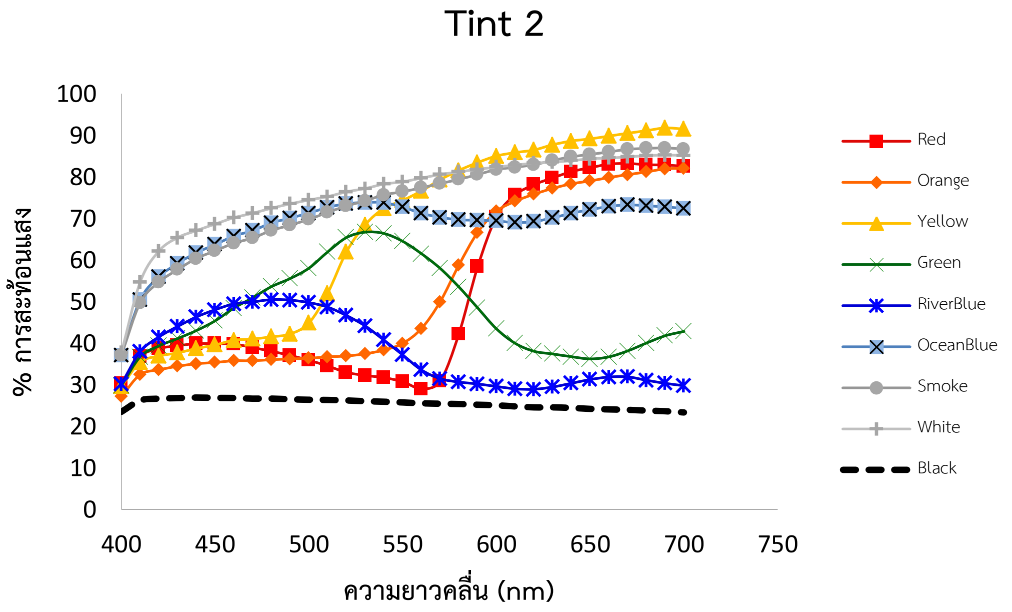
2. ภาพที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่า k/s ของสีแต่ละสีแยกตามฐานข้อมูล เริ่มจากค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.4-3.9
3. แก้ไขค่าการสะท้อนแสงด้วยสมการซอนเดอร์สัน (สมการที่ 2.12)
4. นำข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่แก้ไขแล้ว $(r_{\lambda,i})$ มาคำนวณหาค่า K/S ด้วยสมการ (2.11) จะได้ค่า K/S ของแต่ละตัวอย่างสีในฐานข้อมูลแต่ละกลุ่ม
5. สำหรับสีแต่ละสีในฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 คำนวณหาค่า k/s ด้วยสมการ (2.16) หากคำนวณค่า k/s ได้น้อยกว่าศูนย์ จะทำให้สูตรทำนายการผสมสีนั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงกำหนดให้ค่า k/s ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าศูนย์
6. ในทางอุดมคติ ค่า k/s ที่ได้ในข้อ 5 จากฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 ควรมีค่าเท่ากัน เพราะเป็นค่า k/s ของสีเดียวกันที่ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าความเข้มข้นที่ไม่เท่ากัน จึงได้ค่า K/S ในข้อ 4 ที่ต่างกัน แต่ในการปฏิบัติไม่ได้ผลเช่นนั้น ดังนั้นจึงรวมฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 เข้าด้วยกัน เป็นฐานข้อมูลของกลุ่มที่ 7 All tints เพื่อคำนวณหาค่า k/s ที่เหมาะสมที่สุดในทุกความเข้มข้นด้วยวิธีอนุกรมกำลัง
7. ในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูลมีชุดข้อมูลสีของค่า k/s ทั้งหมด 9 สี ซึ่งคำนวณได้จากชุดข้อมูลสี (training set) ตามฐานข้อมูลที่ต่างกัน



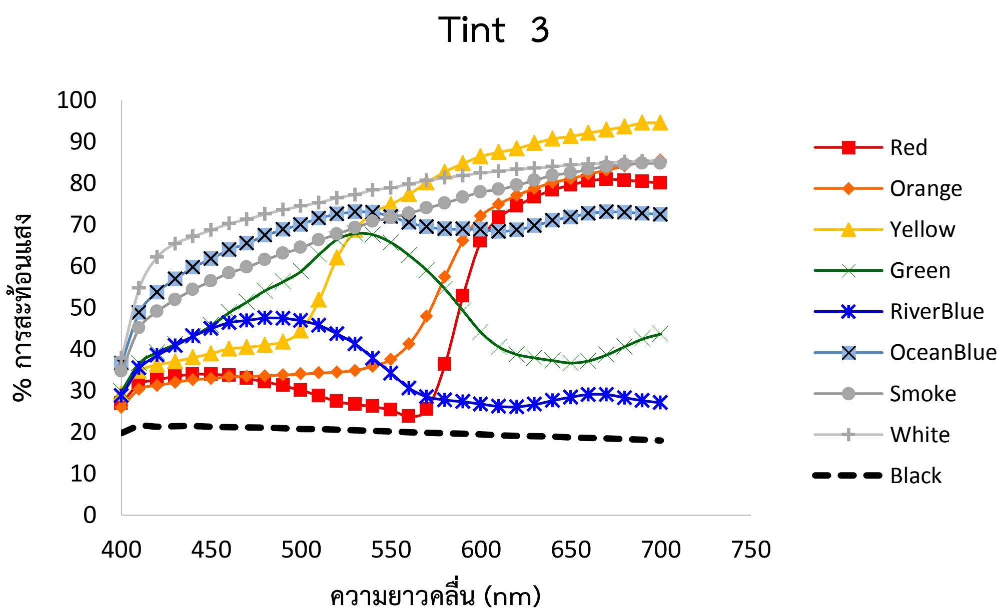
ภาพที่ 3.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีเดี่ยว (mass tone)



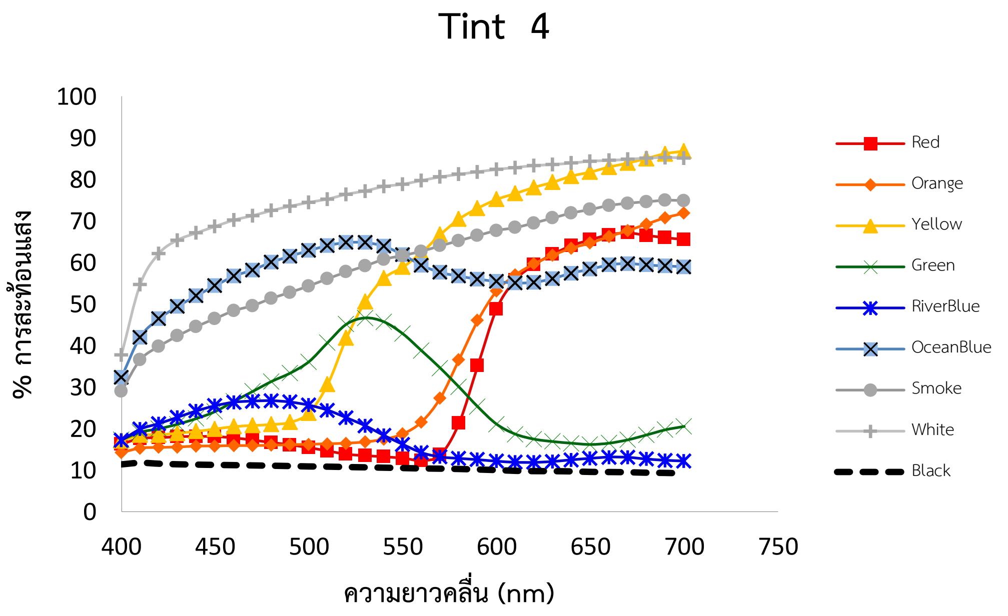
ภาพที่ 3.5 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 1 (Tint 1)



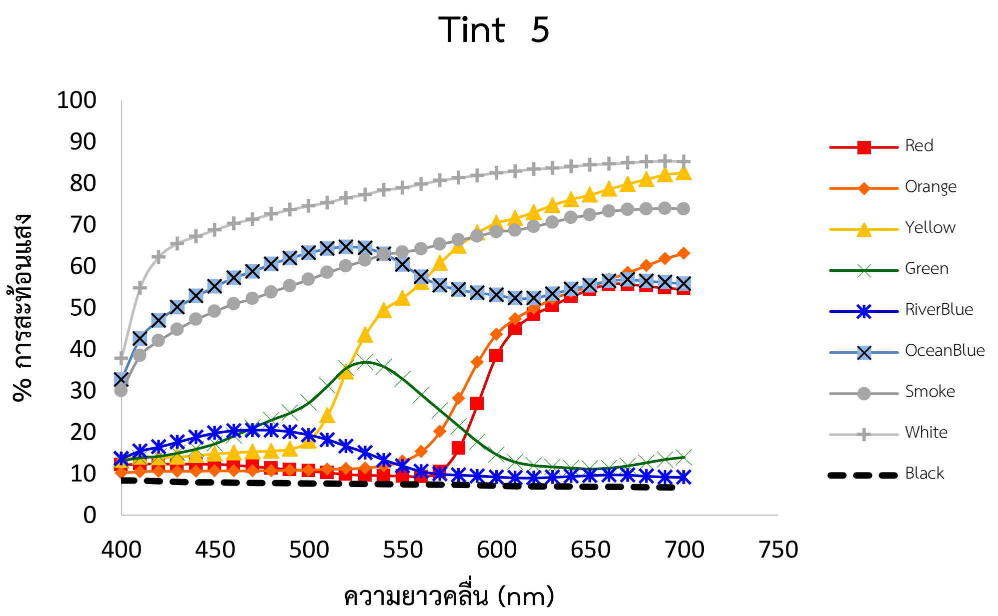
ภาพที่ 3.6 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 2 (Tint 2)



ภาพที่ 3.7 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 3 (Tint 3)



ภาพที่ 3.8 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 4 (Tint 4)



ภาพที่ 3.9 ค่าการสะท้อนแสงของสีเจือจางของความเข้มข้นที่ 5 (Tint 5)

ขั้นตอนที่ 3 การลดข้อมูล

ในขั้นตอนนี้จะลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่แก้ไขแล้วด้วยสมการซอนเดอร์สัน เพื่อเป็นการลดจำนวนข้อมูลค่า k / s ตามความยาวคลื่นของแต่ละสีที่จัดเก็บเป็นฐานข้อมูลสำหรับใช้ทำนายสูตรการผสมสี โดยมีรายละเอียดในการลดข้อมูลดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. ข้อมูลค่าการสะท้อนแสงจากการวัดในแต่ละตัวอย่างสีมี 31 ค่า คือ ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร ซึ่งคือ จำนวนข้อมูลที่ต้องการลดจำนวนลง โดยทำการทดลองตามกลุ่มฐานข้อมูลสีในขั้นตอนที่ 2 ข้อ 1
2. นำค่าการสะท้อนแสงที่แก้ไขด้วยสมการซอนเดอร์สันแล้วมาลดข้อมูลการสะท้อนแสงด้วยวิธีวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก โดยใช้โปรแกรมภาษาอาร์ในการคำนวณ เลือกใช้คำสั่ง “prcomp” ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้ค่าความแปรปรวนร่วมของข้อมูลในการสกัดตัวแปร และใช้คำสั่ง “varimax” เพื่อหมุนแกนข้อมูลให้ตั้งฉากและมีค่า loading เพิ่มมากขึ้น
3. นำผลค่าเฉพาะและค่าความแปรปรวนจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักมากำหนดจำนวนข้อมูลที่สามารถลดได้ โดยผลการทดลองจะแสดงในบทที่ 4 หัวข้อ 4.1 ซึ่งพบว่าค่าการสะท้อนแสง 31 ค่า หรือ ค่าที่ 31 ความยาวคลื่นของสีในฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6

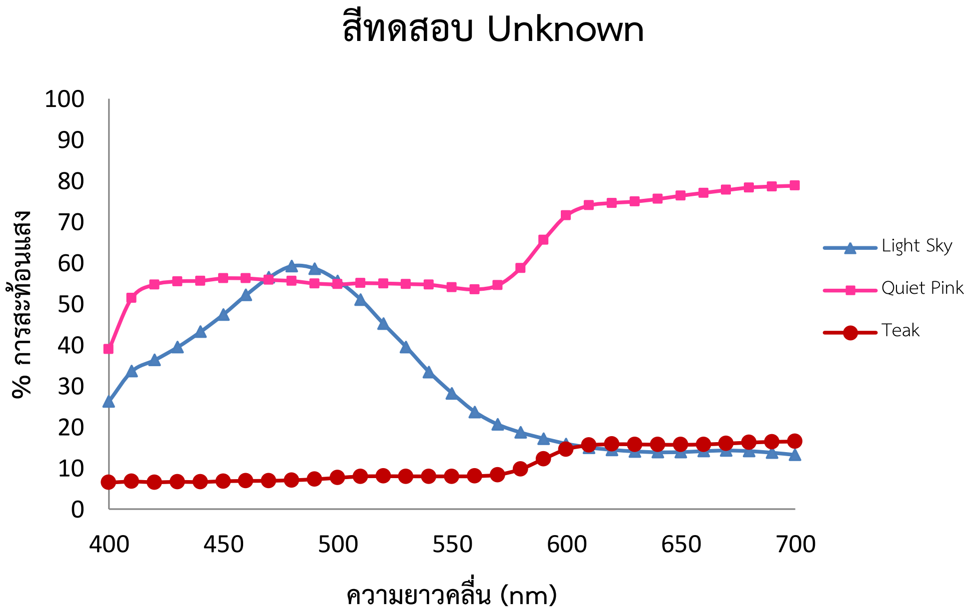
สามารถลดข้อมูลเหลือเพียง 9 ความยาวคลื่นของในแต่ละสี แต่สำหรับกลุ่มที่ 7 All tints เป็นชุดข้อมูลที่ไม่สามารถลดข้อมูลได้ เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดไม่มีความสัมพันธ์ใด ๆ ร่วมกัน

4. นำค่า loading มาวิเคราะห์เลือกความยาวคลื่นที่เป็นตัวแทนของแต่ละส่วนประกอบหลัก 9 ส่วนในข้อ 3 โดยกำหนดความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ 400 นาโนเมตร และความยาวคลื่นสุดท้ายที่ 700 นาโนเมตรเสมอ
5. นำข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่ลดจำนวนลงของแต่ละสีตัวอย่างจำแนกตามฐานข้อมูลไปคำนวณหา k / s ของแต่ละสีตามขั้นตอนที่ 2 เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลลดลง
6. ในการคำนวณย้อนกลับคืนเพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนแสง 31 ค่า ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น

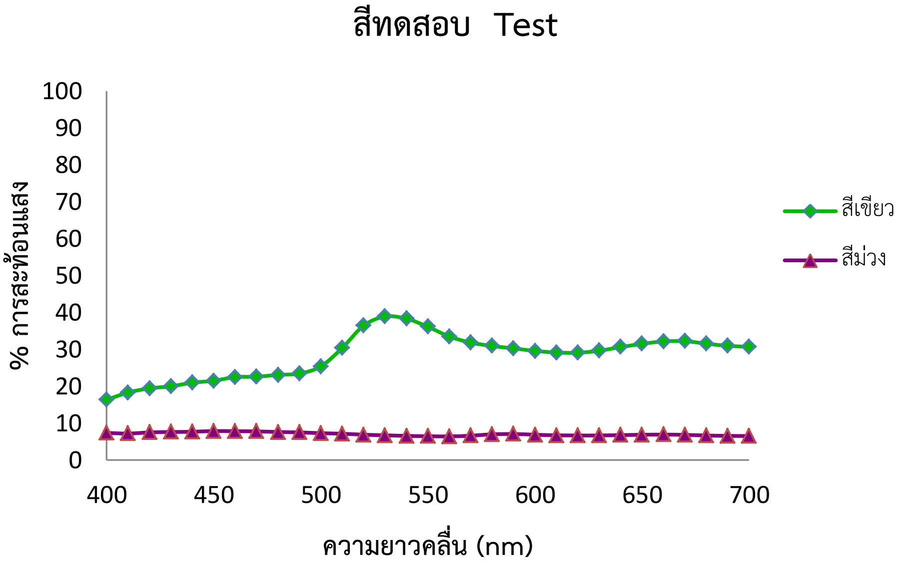
ขั้นตอนที่ 4 การทำนายสูตรการผสมสี

ขั้นตอนนี้เป็นการทำนายหาความเข้มข้นของสีในฐานข้อมูล เพื่อการผสมสีให้ได้สีเหมือนกับสีทดสอบ ซึ่งมีสีทดสอบจำนวน 5 สี โดยแบ่งสีทดสอบเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 สีทดสอบจากสมุดตัวอย่างสีน้ำมันจำนวน 3 สีได้แก่ Light Sky, Quiet Pink และ Teak ซึ่งเป็นสีที่ทราบเพียงค่าการสะท้อนแสง เรียกว่า Unknown และชุดที่ 2 คือ สีทดสอบที่ผสมขึ้นโดยกำหนดความเข้มข้นเรียกว่า Test ได้แก่ สีเขียว เกิดจากการผสมสี Reddish Yellow, Ocean Blue และ River Blue ที่ความเข้มข้น 0.46, 0.45 และ 0.09 ตามลำดับ และสีม่วง เกิดจากการผสมสี Tinting Red และ River Blue ที่ความเข้มข้น 0.45 และ 0.55 ตามลำดับ โดยมีวิธีการทำนายสูตรการผสมสีดังนี้

1. วัดค่าการสะท้อนแสงของสีทดสอบ ซึ่งได้ค่าการสะท้อนแสงดังภาพที่ 3.10-3.11
2. ภาพที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการทำนายค่าความเข้มข้น (c) ของแต่ละสีในการผสมสี นำค่า k / s ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 จากฐานข้อมูล Mass tone ทำนายหาค่าความเข้มข้นของแต่ละสี โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของรากค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ของ K / S นั้นมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง K / S ที่ได้จากการคำนวณและการทำนายมีค่าน้อยที่สุด

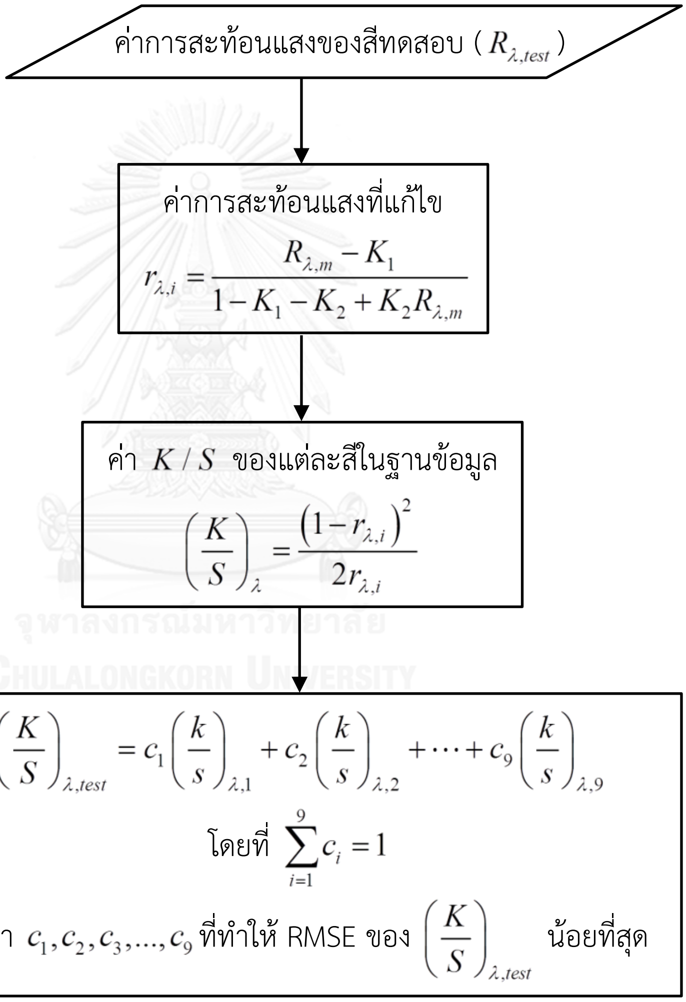


ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงของ Unknown



ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงค่าการสะท้อนแสงของ Test

3. นำค่าความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณหาค่า K / S ของสีผสมด้วยสมการ (2.15) และคำนวณสมการ (2.10) ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการทำนาย กล่าวคือ เป็นการคำนวณย้อนกลับของขั้นตอนในภาพที่ 3.12
4. นำค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการทำนาย ($r_{predicted}$) มาคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าการสะท้อนแสงที่แท้จริง ($R_{predicted}$) ด้วยสมการ (2.14)



ภาพที่ 3.12 การทำนายค่าความเข้มข้นในการผสมสี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5. นำค่าการสะท้อนแสงที่แท้จริงที่ได้จากการทำนายและค่าการสะท้อนแสงของสีทดสอบที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาค่าสีภายใต้สภาวะ D65/10 และหาค่าความแตกต่างสี CIEDE2000

6. ทำเช่นนี้กับฐานข้อมูลทุกกลุ่มและเลือกค่าความแตกต่างสีที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดที่ไม่เกิน 3 หน่วยของแต่ละสีทดสอบจากการทำนายด้วยฐานข้อมูลที่ต่างกัน
7. นำความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายที่เลือกมาในข้อ 6 มาผสมจริง
8. นำสีที่ผสมแล้วปาดลงบนกระดาษอาร์ตมันจนทึบแสง
9. วัดค่าการสะท้อนแสงของสีผสมที่ได้จากการทำนาย
10. ทำการทดลองซ้ำกับฐานข้อมูลที่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงของแต่ละสีเหลือ 9 ความยาวคลื่น โดยเลือกความยาวคลื่นของสีทดสอบตามความยาวคลื่นของสีในฐานข้อมูลและใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น เพื่อเติมข้อมูลที่ไม่มี เมื่อต้องการให้มีจำนวนข้อมูลค่าการสะท้อนแสงจากการทำนายเท่ากับจำนวนที่ได้จากการวัด นั่นคือ 31 ความยาวคลื่น เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสีและค่าความแตกต่างสีในข้อ 5

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ความแม่นยำ

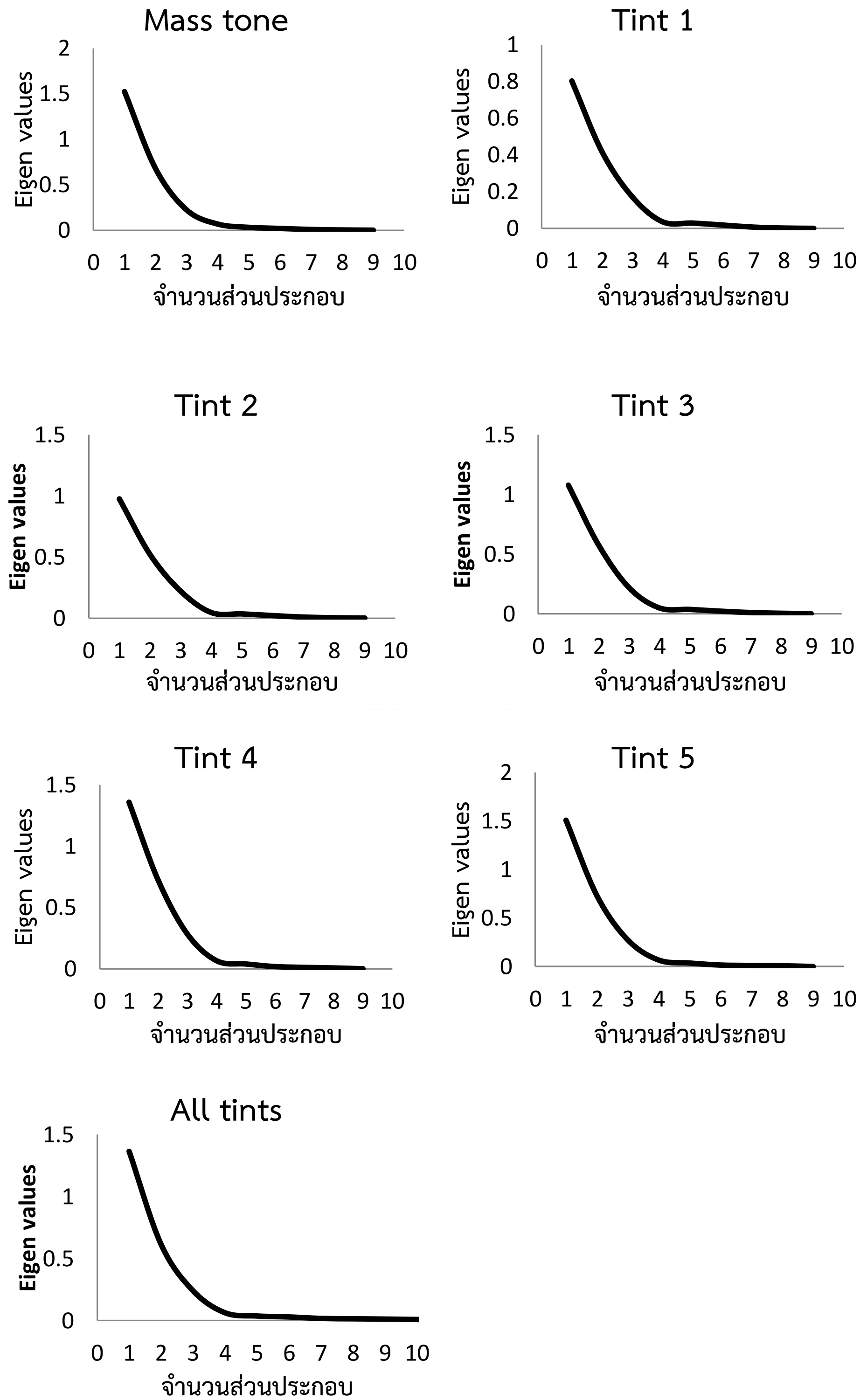
1. เปรียบเทียบผลค่าความแตกต่างสีจากการทำนายสูตรการเทียบสีด้วยชุดข้อมูลที่ต่างกัน ได้แก่ Mass tone, Tint 1, Tint 2, Tint 3, Tint 4, Tint 5 และ All tints
2. เปรียบเทียบค่าความเข้มเข้นจริงและจากการทำนาย เพื่อดูความแตกต่างของผลที่ได้จากการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล
3. เปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดและการทำนาย เพื่อดูความแตกต่างของผลที่ได้จากการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล และดูแนวโน้มการเกิดเมทาเมอริซึม

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงและวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ด้วยวิธี Single-constant สำหรับสีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงา ใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักในการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง ซึ่งผลการทดลองแบ่งได้ดังนี้ 4.1 ผลการลดข้อมูล แสดงผลการลดจำนวนข้อมูลค่าการสะท้อนแสงในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูล 4.2 วิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายด้วยค่าความแตกต่างสีแบบไม่ลดข้อมูลและลดข้อมูล และดูแนวโน้มการเกิดเมทาเมอริซึม และ 4.3 วิเคราะห์ความแม่นยำของค่าความเข้มข้น เพื่อดูผลการทำนายว่าใช้สีในฐานข้อมูลสีเดียวกันหรือแตกต่างกันตามค่าความเข้มข้นที่กำหนดขึ้น

4.1 ผลการลดข้อมูล

จากค่าการสะท้อนแสงที่ 31 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร ของสีจำนวน 9 สี ในฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 (Mass tone และ Tint 1-5) และจำนวน 49 สี ในฐานข้อมูลกลุ่มที่ 7 (All tints) เมื่อนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักได้ผลค่าเฉพาะของแต่ละส่วนประกอบดังภาพที่ 4.1 ซึ่งเห็นได้ว่า ค่าเฉพาะของส่วนประกอบหลักในแต่ละฐานข้อมูลมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์ตั้งแต่ส่วนประกอบหลักที่ 6 (PC6) และมีค่าคงที่ตั้งแต่ส่วนประกอบหลักที่ 7 (PC7) เป็นต้นไป เมื่อพิจารณาค่าความแปรปรวนสะสม (ตารางที่ 4.1) พบว่า ที่ส่วนประกอบหลักที่ 2 (PC2) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้มากกว่า 90% แล้ว ซึ่งหากใช้เพียง 2 ส่วนประกอบหลักในการวิเคราะห์ข้อมูลก็ย่อมได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานหากเลือกค่าการสะท้อนแสงมาเพียงที่ 2 ความยาวคลื่น อาจเกิดความผิดพลาดในการเลือกสีเพื่อมาผสมได้ง่าย เพราะมีสีในฐานข้อมูลที่ให้ค่าการสะท้อนแสงซ้อนทับและ/หรือติดกันในหลายช่วงความยาวคลื่น ดังนั้นถ้าลดข้อมูลลงเหลือเพียง 2 ความยาวคลื่นที่มีสี 2 สีหรือมากกว่านั้น มีค่าเท่ากันที่ 2 ความยาวคลื่นนี้พอดีระบบการทำนายสูตรการเทียบสีจะไม่สามารถเลือกสีที่ถูกต้องได้เสมอไป เพราะระบบมองเห็นสี 2 สีนั้นเป็นสีเดียวกัน ทั้งที่สี 2 สีนั้นมีค่าการสะท้อนแสงต่างกันที่ความยาวคลื่นอื่น แต่ค่านั้นไม่อยู่ในฐานข้อมูล ดังนั้นการเพิ่มจำนวนส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำนายที่ดีกว่า จึงเลือกใช้ 9 ส่วนประกอบหลัก เนื่องจากจะมีจำนวนความยาวคลื่นที่มากขึ้น สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ครบ 100% และยังลดจำนวนข้อมูลลงเหลือเพียงประมาณ 1 ใน 3 ของข้อมูลเดิม



ภาพที่ 4.1 ค่าเฉพาะของส่วนประกอบในแต่ละฐานข้อมูล

ตารางที่ 4.1 ร้อยละค่าความแปรปรวนสะสมของส่วนประกอบหลักของแต่ละฐานข้อมูล

ชุดข้อมูล	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
Mass tone	81.94	98.05	99.79	99.95	99.99	100	100	100	100
Tint 1	75.84	96.25	99.71	99.86	99.96	99.99	100	100	100
Tint 2	74.71	95.94	99.72	99.87	99.96	100	100	100	100
Tint 3	75.33	96.66	99.73	99.88	99.97	99.99	100	100	100
Tint 4	75.34	96.52	99.75	99.92	99.98	99.99	100	100	100
Tint 5	78.72	97.18	99.79	99.94	99.99	99.99	100	100	100
All tints	80.95	97.26	99.72	99.89	99.94	99.97	99.99	99.99	100

ในการเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม 9 ความยาวคลื่น ใช้การพิจารณาจากค่า loading ซึ่งพบว่า ผลจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักของทุกฐานข้อมูลมีค่า loading น้อยว่า ± 0.5 จึงนำข้อมูลมาหมุนแกนปัจจัยร่วมด้วยวิธี varimax เพื่อทำให้ค่า loading เพิ่มขึ้น ผลของค่า loading จากการหมุนแกนแสดงในภาคผนวก ก ในแต่ละส่วนประกอบหลักจะมีกลุ่มของความยาวคลื่นที่จัดอยู่ในส่วนประกอบเดียวกัน หมายความว่า ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นเหล่านั้นมีส่วนประกอบร่วมกัน ไม่จำเป็นต้องใช้ทุกค่าในการอธิบายตัวแปร เพราะข้อมูลมีความสัมพันธ์กันมาก จึงลดข้อมูลลงได้โดยการเลือกตัวแทนของข้อมูลนั้น ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกตัวแทนของข้อมูลในส่วนประกอบนั้น ๆ ด้วยค่า loading โดยเลือกความยาวคลื่นที่มีค่า loading สูงที่สุดของกลุ่มในส่วนประกอบนั้น เพราะนั่นแสดงว่า ความยาวคลื่นนั้นมีความสัมพันธ์มากที่สุด ซึ่ง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นนั้น ค่าการสะท้อนแสงของแต่ละสีในฐานข้อมูลจะมีความแตกต่างกันมากที่สุดในส่วนประกอบนั้น ผลการเลือกค่าความยาวคลื่นของแต่ละฐานข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่า แต่ละฐานข้อมูลได้ค่าความยาวคลื่นที่เป็นตัวแทนของกลุ่มไม่เหมือนกัน ขึ้นกับลักษณะการสะท้อนแสงของสีที่อยู่ในฐานข้อมูล เพราะจะเป็นความยาวคลื่นที่แต่ละสีในฐานข้อมูลมีค่าการสะท้อนแสงต่างกัน (ดูภาพที่ 3.4-3.9) สำหรับกลุ่มที่ 7 All tints ไม่มีผลแสดงในตารางที่ 4.2 เนื่องจากภายหลังการหมุนแกนปัจจัยพบว่า ในแต่ละส่วนประกอบไม่มีความยาวคลื่นที่จัดกลุ่มอยู่ในส่วนประกอบเดียวกัน แต่ละส่วนประกอบมีความยาวคลื่นเดียวและมีค่า loading เท่ากับ ± 1 แสดงให้เห็นว่า ที่ทุกความยาวคลื่น สีต่าง ๆ ที่อยู่ในฐานข้อมูล All tints มีค่าการสะท้อนแสงที่ต่างกัน โดยไม่มีค่าที่ความยาวคลื่นใดสัมพันธ์กันหรือมีส่วนประกอบร่วมกันในการอธิบายตัวแปร จึงไม่สามารถลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงลงได้

ตารางที่ 4.2 ความยาวคลื่นที่ลดข้อมูลลง

จำนวน	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
1	400	420	420	400	410	420
2	410	450	460	430	460	460
3	460	490	500	470	500	500
4	500	530	530	500	530	530
5	530	570	560	520	560	580
6	560	610	580	560	580	620
7	590	640	610	580	620	660
8	620	650	660	660	650	690
9	660	700	700	700	660	700

จากตารางที่ 4.2 ค่าความยาวคลื่น 9 ค่า ที่ได้จากการเลือกค่า loading นั้นมีความยาวคลื่นเริ่มต้นที่ความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูล หากต้องการนำข้อมูลไปใช้เพื่อคำนวณค่าสีต้องมีการประมาณค่าในช่วง เพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ดังนั้นจึงกำหนดค่าความยาวคลื่นเริ่มต้นเป็น 400 นาโนเมตร และความยาวคลื่นสุดท้ายเป็น 700 นาโนเมตร ในทุกกลุ่มฐานข้อมูลเสมอ เพื่อให้สามารถประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 ความแม่นยำของค่าความแตกต่างสี

ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายสูตรการเทียบสี ใช้ผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสีที่นำมาผสมกันให้ได้สีเหมือนกับสีทดสอบ Unknown ซึ่งเป็นสีตัวอย่างจากสมุดสีตัวอย่างสีน้ำมัน เมื่อได้ค่าความเข้มข้นแล้ว นำมาใช้คำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการทำนายและใช้ในการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างสีของสีที่ได้จากวัดและการทำนาย ผลความแม่นยำของการทำนายจากฐานข้อมูลที่ไม่มีการลดข้อมูล (4.2.1) และการทำนายจากฐานข้อมูลที่มีการลดข้อมูล (4.2.2) มีดังนี้

4.2.1 ไม่ลดข้อมูล

ตารางที่ 4.3 ผลค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Unknown (ไม่ลดข้อมูล)

สีทดสอบ	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Light Sky	13.46	10.42	10.29	10.77	10.99	11.03	13.43
Quiet Pink	10.31	**0.41**	**0.39**	**0.36**	**0.60**	**1.95**	5.10
Teak	**0.29**	16.19	16.34	16.09	13.37	7.98	**0.17**

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ระหว่างสีทดสอบ Unknown จำนวน 3 สี ได้แก่ Light Sky, Quiet Pink และ Teak ที่ได้จากการวัดกับสีที่ได้จากการทำนาย (ผลการทำนายค่าการสะท้อนแสงของสีทดสอบทั้ง 3 สีแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ค่าความแตกต่างสีของ Quiet Pink เมื่อทำนายด้วยกลุ่มฐานข้อมูล Tint 1-5 ให้ค่าความแตกต่างสีต่ำกว่า การทำนายด้วย Mass tone และ All tints ในทางกลับกันสำหรับสี Teak เมื่อทำนายด้วย Mass tone และ All tints ให้ค่าความแตกต่างสีดีกว่าการทำนายด้วย Tint 1-5 ส่วนการทำนายสี Light Sky ด้วยกลุ่มฐานข้อมูลทั้งหมด ได้ค่าความแตกต่างสีที่สูงเกินกว่า 10 หน่วย แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถทำนายการเทียบสีได้ถูกต้อง สีผสมจะเห็นต่างจากสีต้นฉบับอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.4-4.6 แสดงผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสีในการผสมให้ได้สีเหมือนสีทดสอบ Light Sky, Quiet Pink และ Teak ตามลำดับ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลค่าความแตกต่างสีในตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ในการผสมสี Light Sky ซึ่งเป็นสีฟ้าอ่อน การทำนายด้วยฐานข้อมูลสีเดี่ยว สีเจือจางที่ความเข้มข้นสูง (Tint 4 และ 5) และ All tints ใช้สีในฐานข้อมูล 3 สี ซึ่งมีการผสมสีขาวอยู่ด้วย สำหรับ Tint 3 ทำนายว่า ไม่ต้องมีการผสมสีใช้สี River Blue เท่านั้น ซึ่งผลเช่นนี้ไม่ถูกต้องอย่างแน่นอน เนื่องจาก River Blue ซึ่งเป็นสีน้ำเงินเข้ม ต่างจาก Light Sky ซึ่งมีลักษณะสีเป็นสีฟ้าอ่อน และในฐานข้อมูลอื่น ๆ ทำนายว่า มีส่วนผสมของสี Laurel Green อยู่ด้วย จึงทำให้ทุกฐานข้อมูลให้ค่าความแตกต่างสีสูง นั่นคือ ไม่สามารถทำนายการเทียบสีได้ถูกต้องนั่นเอง

ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Light Sky (ไม่ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Light Sky						
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Laurel Green	0.04	0.11	0.20	-	0.16	0.11	0.04
River Blue	0.10	0.89	0.80	1.00	0.38	0.26	0.10
White	0.87	-	-	-	0.46	0.63	0.86

ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Quiet Pink (ไม่ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Quiet Pink						
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Tinting Red	-	0.04	0.04	0.04	0.02	0.01	-
Ocean Blue	-	-	-	-	-	0.03	-
Smoke	0.11	-	-	-	-	-	-
White	0.89	0.96	0.96	0.96	0.98	0.96	1.00

จากตารางที่ 4.5 ฐานข้อมูลที่ให้การทำนายที่ดี (ค่าความแตกต่างสีต่ำกว่า 1.00) ได้แก่ Tint 1-4 ใช้สี Tinting Red และ White ในการผสมเท่านั้น ซึ่งสี Quiet Pink มีลักษณะเป็นสีชมพูอ่อน จึงสอดคล้องกับผลค่าความแตกต่างสีที่ได้ ขณะที่ฐานข้อมูลสีเดี่ยวและ All tints ทำนายผิดพลาดเพราะไม่มีส่วนผสมของสี Tinting Red อยู่เลย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Teak (ไม่ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Teak						
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Tinting Red	0.35	-	-	-	-	-	0.35
Orange	-	-	-	-	0.34	0.70	-
Reddish Yellow	0.53	-	-	-	-	-	0.53
River Blue	0.12	-	-	-	-	-	0.12
Black	-	1.00	1.00	1.00	0.66	0.30	-

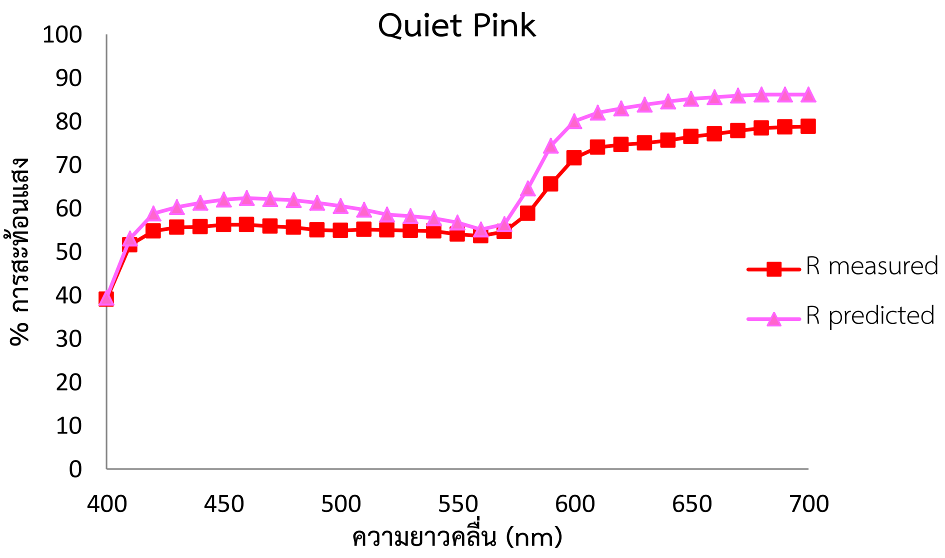
จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า ในการผสมสี Teak ซึ่งเป็นสีน้ำตาลเข้ม การทำนายด้วยฐานข้อมูลสีเดี่ยวและ All tints ให้ผลค่าความแตกต่างสีที่ต่ำกว่า 1.00 ซึ่งใช้สี Tinting Red, Reddish Yellow และ River Blue ในการผสม สำหรับการใช้ฐานข้อมูลของ Tint 4 และ 5 จะใช้สี Orange และ Black ในการผสม ซึ่งจากตาราง 4.3 การใช้ฐานข้อมูลนี้ให้ค่าความแตกต่างสีสูงมาก ดังนั้นหากผสมจริงก็จะได้สีที่แตกต่างจากสีต้นฉบับอย่างชัดเจน และเมื่อทำนายด้วยฐานข้อมูลสีเจือจางที่มีความเข้มข้นต่ำ (Tint 1-3) จะใช้เพียงแค่สี Black ในการผสมเท่านั้น ซึ่งได้ผลการทำนายที่ไม่ถูกต้องอย่างชัดเจน เพราะสี Black เป็นสีดำต่างจากสี Teak ซึ่งเป็นสีน้ำตาลเข้ม

จากผลในตารางที่ 4.3 พิจารณาฐานข้อมูลที่ให้ค่า CIEDE2000 ต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 3 หน่วยของสี Quiet Pink และ Teak พบว่าค่าความแตกต่างสีของ Quiet Pink ที่ให้ค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่ไม่เกิน 3 หน่วยคือ 0.36 และ 1.95 เมื่อทำนายด้วย Tint 3 และ 5 ตามลำดับ และค่าความแตกต่างสีของ Teak ที่ให้ค่าต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่ไม่เกิน 3 หน่วยคือ 0.17 และ 0.29 เมื่อทำนายด้วย All tints และสีเดี่ยว ตามลำดับ นำผลการทำนายความเข้มข้นด้วยฐานข้อมูลนั้น ๆ มาผสมจริงและวัดค่าการสะท้อนแสงเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากสีทดสอบต้นฉบับ ค่าความแตกต่างสีที่จากการผสมจริงแสดงในตารางที่ 4.7 จะเห็นว่า ค่าความแตกต่างที่ได้จากการผสมจริงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผสมสีจะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการชั่งตวงวัดในการผสมสีและความเรียบ ความสม่ำเสมอในการปาดสี อย่างไรก็ดีผลโดยรวมพบว่า เมื่อนำค่าจากการทำนายมาผสมจริงและเทียบสีค่าความแตกต่างสีมีค่าไม่เกิน 3 หน่วย ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่การผสมจริงของสี Quiet Pink จากการทำนายด้วย Tint 5 ให้ค่าความแตกต่างสีที่สูงมาก เนื่องจากใช้สี Ocean Blue ซึ่งเป็นสีฟ้าอ่อนในการผสมด้วย ซึ่งสี Quiet Pink เป็นสีชมพูอ่อนจึงไม่ควรมีส่วนผสมของสีฟ้า และการผสมจริงของสี Teak จากการทำนายด้วยสีเดี่ยวและ All tints ค่าความแตกต่างสีที่ได้มีค่าเท่ากัน เนื่องจากการทำนายค่าความเข้มข้นดังตารางที่ 4.6 ให้สีในการผสมและค่าความเข้มข้นเดียวกัน

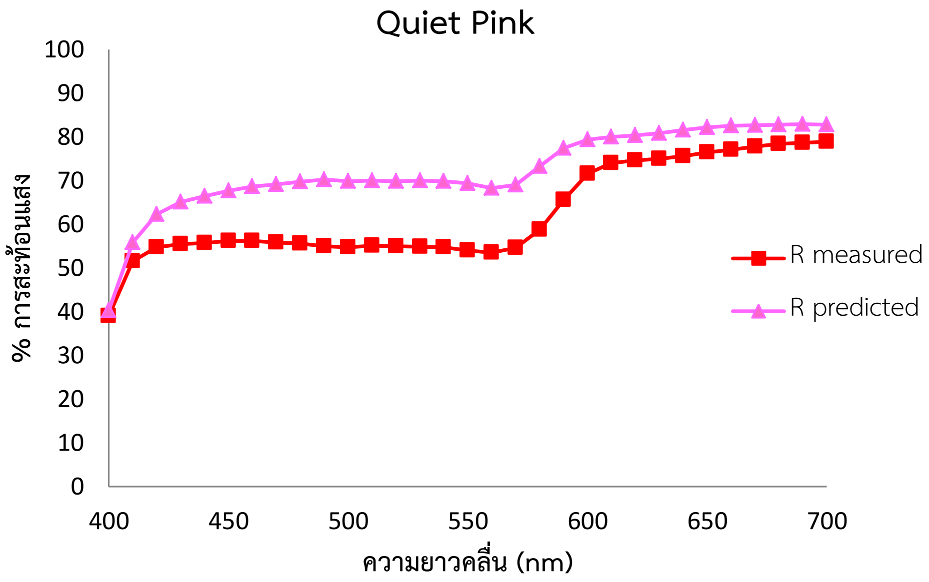
ค่าการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดสีต้นฉบับและสีจากการผสมจริงแสดงดังภาพที่ 4.2-4.4 จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟมีส่วนทับซ้อนและ/หรือตัดกันไม่ถึง 3 ตำแหน่ง แสดงให้เห็นว่า คู่สีที่เทียบกันนั้นจะไม่เกิดเมทาเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง และจากผลในตารางที่ 4.3 สำหรับสี Light Sky ผลการทำนายค่าความแตกต่างสีนั้นมีค่ามากกว่า 10 หน่วย หากนำมาผสมจริงก็จะไม่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ เนื่องจากค่าความแตกต่างสีนั้นสามารถช่วยให้ตัดสินใจได้ว่าควรใช้ผลการทดลองแบบใดจึงจะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ที่สุด

ตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างสีจากการผสมจริง

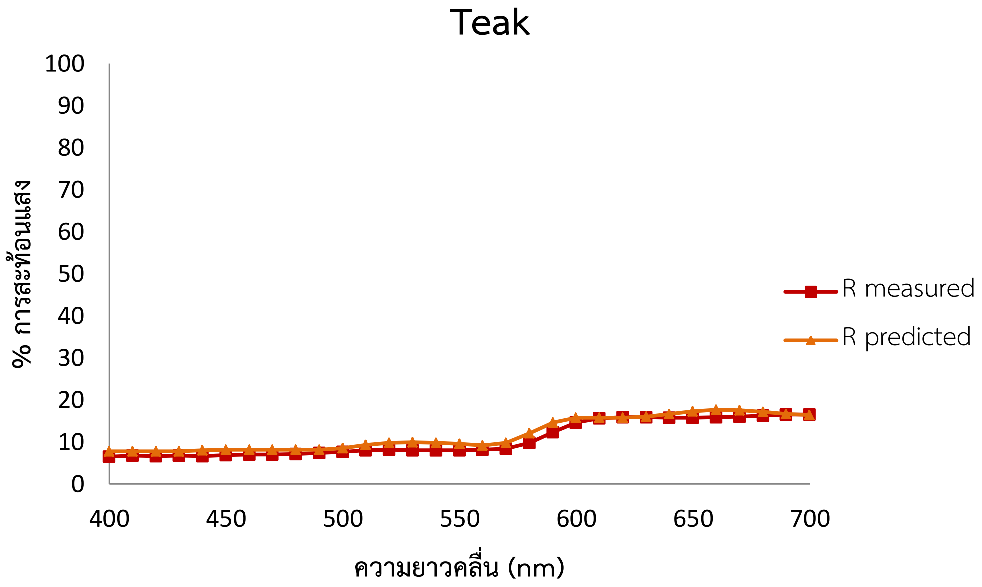
สีทดสอบ	Tint 3	Tint 5	MT	AT
Quiet Pink	2.60	7.99	-	-
Teak	-	-	2.73	2.73



ภาพที่ 4.2 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Quiet Pink เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วย Tint 3 (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ 4.3 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Quiet Pink เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วย Tint 5 (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ 4.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีต้นฉบับ Teak เปรียบเทียบกับสีที่ผสมจริงจากการทำนายด้วยด้วยสีเดี่ยวและ All tints (ไม่ลดข้อมูล)

ค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ที่คำนวณนั้นอยู่ภายใต้สภาวะ D65/10 คู่สีที่มีค่า CIEDE2000 ต่ำภายใต้สภาวะนี้ จะมีสีปรากฏใกล้เคียงกันภายใต้สภาวะที่ใช้คำนวณค่าสี แต่ผลอาจไม่เป็นเช่นเดิมหากเปลี่ยนสภาวะไป แต่จากการวิเคราะห์กราฟค่าการสะท้อนแสง (ภาพที่ 4.2-4.4) พบว่า จะไม่เกิดเมทาเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง กล่าวคือ เมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจาก D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่ใช้โดยทั่วไป คู่สีนั้นจะยังคงดูต่างกันหรือใกล้เคียงกัน เฉกเช่นเดียวกับที่เห็นภายใต้แสง D65

4.2.2 ลดข้อมูล

เมื่อนำฐานข้อมูลที่ลดจำนวนของข้อมูลค่าการสะท้อนแสงจาก 31 ค่าต่อสี เหลือ 9 ค่าต่อสี และนำมาทำนายสูตรการเทียบสี ผลค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 (D65/10) ระหว่างสีทดสอบ Unknown กับสีที่ทำนายแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า มีเพียงสี Quiet Pink เท่านั้นที่มีผลค่า CIEDE2000 ต่ำกว่า 3 หน่วย สำหรับฐานข้อมูล Tint 1-5 แสดงว่า สีที่ทำนายให้สีใกล้เคียงกับต้นฉบับ

ตารางที่ 4.8 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Unknown (ลดข้อมูล)

สีทดสอบ	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Light Sky	13.29	10.83	10.69	10.98	11.28	11.18
Quiet Pink	11.43	0.94	0.35	2.76	1.17	2.99
Teak	33.26	16.16	16.33	16.07	6.70	8.41

ตารางที่ 4.9 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Light Sky (ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Light Sky					
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Laurel Green	0.02	0.11	0.20	-	0.08	0.11
River Blue	0.09	0.89	0.80	1.00	0.19	0.26
White	0.88	-	-	-	0.73	0.63

ตารางที่ 4.10 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Quiet Pink (ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Quiet Pink					
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Tinting Red	-	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01
Ocean Blue	-	-	-	-	-	0.03
Smoke	0.05	-	-	-	-	-
White	0.95	0.96	0.96	0.96	0.99	0.96

จากตารางที่ 4.9-4.11 จะเห็นว่า ผลการทำนายในการผสมสี Light Sky และ Quiet Pink จะใช้สีในการผสมแบบเดียวกันกับการทำนายแบบไม่ลดข้อมูล แต่ใช้ค่าความเข้มข้นที่ต่างกัน สำหรับสี Teak นั้น ผลการทำนายด้วยสีเดี่ยวจะใช้สี Reddish Yellow, Laurel Green, River Blue, Smoke, และ White ในการผสม ซึ่งผลการทำนายทำให้ค่าความแตกต่างสีนั้นมีค่าที่สูงมากดังตารางที่ 4.8 เพราะใช้ฐานข้อมูลสี Smoke และ White ซึ่งเป็นที่สว่าง จะแตกต่างจาก Teak ที่เป็นสีน้ำตาลเข้ม

ตารางที่ 4.11 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีทดสอบ Teak (ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Teak					
	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Orange	-	-	-	-	0.76	0.70
Reddish Yellow	0.11	-	-	-	-	-
Laurel Green	0.01	-	-	-	-	-
River Blue	0.02	-	-	-	-	-
Smoke	0.51	-	-	-	-	-
White	0.36	-	-	-	-	-
Black	-	1.00	1.00	1.00	0.24	0.30

จากผลในตารางที่ 4.8 พิจารณาฐานข้อมูลที่ให้ค่า CIEDE2000 ต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่มีค่าไม่เกิน 3 หน่วยของสี Quiet Pink คือ 0.35 และ 2.99 เมื่อทำนายด้วย Tint 2 และ Tint 5 ตามลำดับ นำผลการทำนายความเข้มข้นด้วยฐานข้อมูลนั้น ๆ มาผสมจริงและวัดค่าการสะท้อนแสงเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากสีทดสอบต้นฉบับ ซึ่งผลการทำนายของ Quiet Pink ให้ค่าความแตกต่างสีเหมือนกันกับแบบไม่ลดข้อมูล เนื่องจากค่าความเข้มข้นของ Tint 2 แบบลดข้อมูลมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของ Tint 3 แบบไม่ลดข้อมูล และทำให้ค่าการสะท้อนแสงนั้นมีค่าเท่ากันดังภาพที่ 4.2 ในทำนองเดียวกับ Tint 5 ที่ให้ผลการทำนายแบบเดียวกันกับการไม่ลดข้อมูล สำหรับสี Light Sky และ Teak นั้นให้ค่าความความแตกต่างสีที่มากกว่า 3 หน่วยเกินกว่าที่ยอมรับได้ และพิจารณาค่าความเข้มข้นที่ได้นั้นจะเห็นว่า สีที่นำมาผสมนั้นไม่สามารถผสมจริงแล้วได้สีเหมือนกับสีทดสอบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องนำมาผสมจริง

จากการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 นี้ เพื่อทดสอบความแม่นยำของสูตรการเทียบสีแบบลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล โดยใช้สีทดสอบจากสมุดสีน้ำมันพบว่า การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงนั้นให้ค่าความแตกต่างที่สูงกว่าการทำนายแบบไม่ลดข้อมูล แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน 3 หน่วย) เนื่องจากข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่ลดไปนั้นอาจเป็นค่าที่แสดงความต่างของสีบางสีกับอีกสีหนึ่ง ทำให้ระบบเลือกสีที่นำมาทำนายนั้นผิดพลาด ทำให้ผลค่าความแตกต่างสีของการลดข้อมูลมีค่ามากกว่าการไม่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง ดังนั้นเพื่อการวิเคราะห์ผลการทำนายให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น จึงต้องทราบค่าความเข้มข้นจริงของสีทดสอบและพิจารณาค่าการสะท้อนแสงหรือค่า k/s ของกลุ่มฐานข้อมูลในแต่ละสีในลำดับต่อไป

4.3 ความแม่นยำของค่าความเข้มข้น

ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายค่าความเข้มข้น ใช้สีทดสอบ Test จำนวน 2 สี ได้แก่ สีเขียวและสีม่วง ที่ได้จากการกำหนดความเข้มข้นของสีในฐานข้อมูลและนำมาผสม เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย และวิเคราะห์ค่า k/s ของสีที่นำมาทำนายค่าความเข้มข้น ผลการทำนายค่าความเข้มข้นจากฐานข้อมูลที่ไม่มีการลดข้อมูล (4.3.1) และการทำนายความเข้มข้นจากฐานข้อมูลที่มีการลดข้อมูล (4.3.2) มีดังนี้

4.3.1 ไม่ลดข้อมูล

ตารางที่ 4.12 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Test (ไม่ลดข้อมูล)

สีทดสอบ	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
สีเขียว	1.18	3.26	3.31	7.50	6.14	0.88	1.15
สีม่วง	1.79	8.82	9.01	7.68	4.10	2.01	1.77

ตารางที่ 4.12 แสดงผลค่าความแตกต่างสี CIEDE2000 ระหว่างสีทดสอบ Test ที่กำหนดความเข้มข้นจำนวน 2 สี ได้แก่ สีเขียวและสีม่วง ที่ได้จากการวัดและการทำนาย (ผลการทำนายค่าสะท้อนแสงของสีทดสอบทั้ง 2 สี แสดงในภาคผนวก ค) พบว่า ค่าความแตกต่างสีของสีเขียวและสีม่วงนั้น เมื่อทำนายด้วยกลุ่มฐานข้อมูลสีเดี่ยว, Tint 5 และ All tints ให้ค่าความแตกต่างที่ต่ำกว่าการทำนายด้วย Tint 1-4 และมีค่าไม่เกิน 3 หน่วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีเขียว (ไม่ลดข้อมูล)

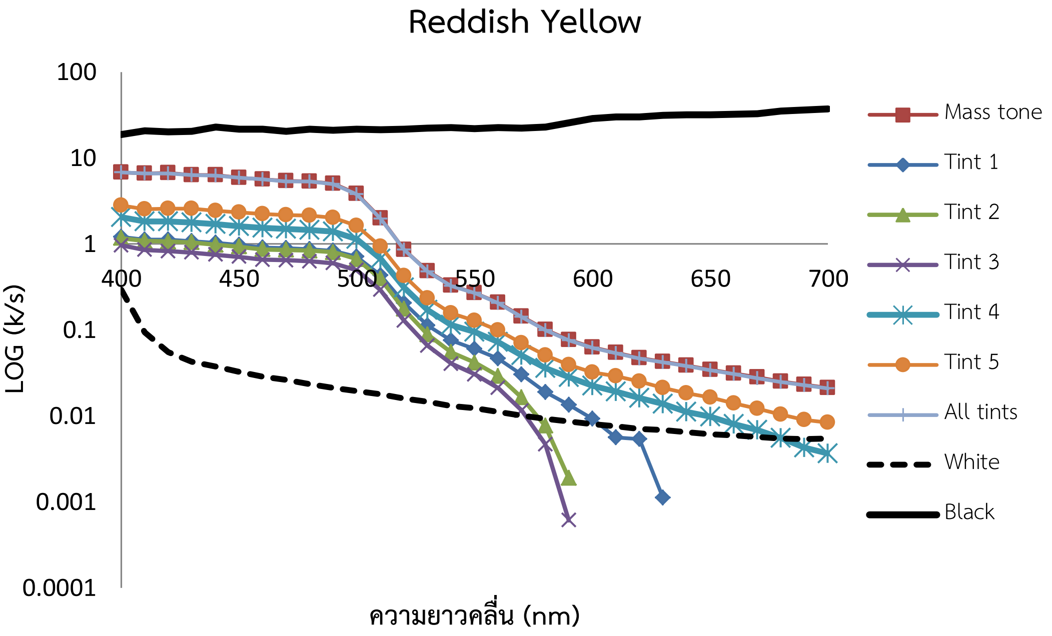
สีฐานข้อมูล	Real C	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Reddish Yellow	0.46	0.11	0.75	0.76	0.86	0.21	0.34	0.11
River Blue	0.09	0.02	0.10	0.09	0.02	0.04	0.07	0.02
Ocean Blue	0.45	0.74	-	-	-	0.75	-	0.77
Laurel Green	-	-	0.09	0.07	-	-	0.02	-
Smoke	-	-	-	-	-	-	0.57	-
White	-	0.13	-	-	-	-	-	0.09
Black	-	-	0.07	0.08	0.12	-	-	-

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสีที่ใช้ในการผสมให้ได้เหมือนกับสีทดสอบสีเขียว พบว่า มีเพียง Tint 4 เท่านั้นที่เลือกสีในฐานข้อมูลเหมือนกับที่กำหนดขึ้น จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่าความแตกต่างสีนั้นมีค่าสูงมาก ซึ่งแตกต่างจากสีเดี่ยว, Tint 5 และ All tints ที่มีค่าความแตกต่างสีที่ดีกว่า แต่เลือกใช้สีที่แตกต่างกันคือ กลุ่มฐานข้อมูลที่ทำนายสีเดี่ยว และ All tints เลือกใช้สี White เพิ่มจาก 3 สีที่กำหนดขึ้น ในทางกลับกัน Tint 5 ไม่มีสี Ocean Blue แต่เลือกใช้ Laurel Green และ Smoke ในการผสม หากพิจารณาค่า k/s ของสี Reddish Yellow, River Blue และ Ocean Blue ในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูลดังภาพที่ 4.5-4.7 พบว่ากราฟค่า k/s ของสี Reddish Yellow จากบางฐานข้อมูลจะไปตัดกับสีขาวหรือมีค่าเข้าใกล้สีขาว ยกเว้น k/s ของฐานข้อมูลสีเดี่ยวและ All tints ที่มีค่าเหมือนกัน ทำให้สีเดี่ยวและ All tints ที่ให้ค่าความแตกต่างที่ดีนั้นเลือกใช้สี White ในการผสมด้วย เมื่อเพิ่มความสว่างของสี สำหรับ Tint 1, 2 และ 3 เลือกสีดำมาผสมด้วย เนื่องจากค่า k/s ของสี River Blue ในฐานข้อมูลเหล่านี้มีค่าต่างจากสีดำมาก ทำให้ระบบเลือกสีดำมาผสมเพื่อลดความสว่างของสี สำหรับ Tint 5 นั้นได้เลือกสี Laurel Green และ Smoke มาผสมด้วย เนื่องจากสีทดสอบนี้นั้นมีลักษณะเป็นสีเขียวอ่อน จึงใช้สี Laurel Green และ Smoke มาแทน Ocean Blue ที่มีลักษณะเป็นสีฟ้าอ่อน เพื่อให้ได้สีผสมที่เหมือนกับสีทดสอบ

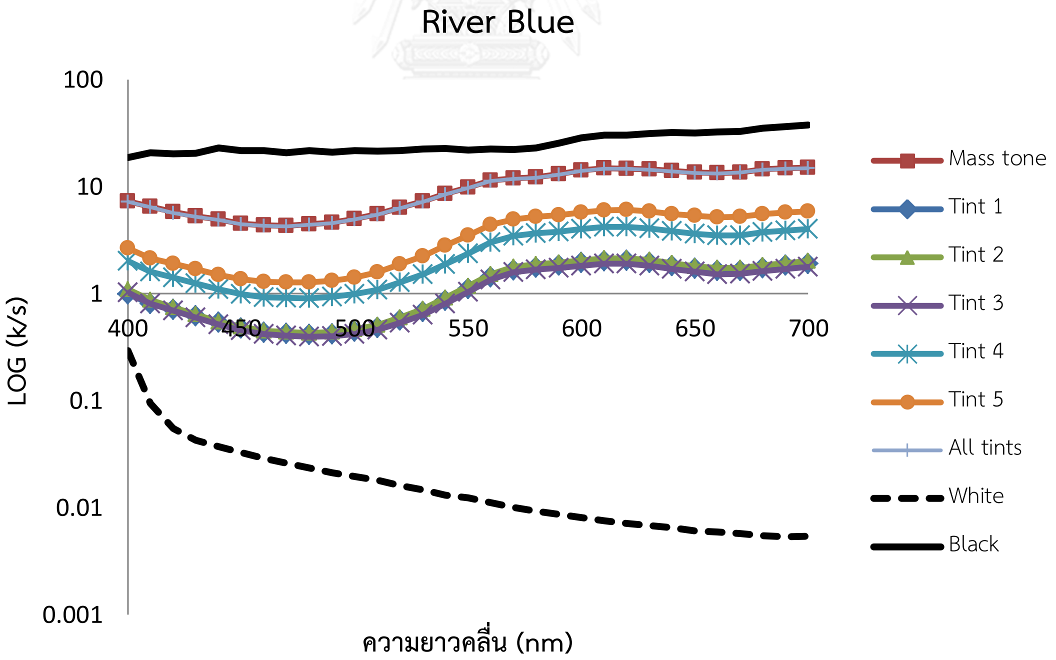
จากผลการทำนายค่าความเข้มข้นแสดงให้เห็นว่า ฐานข้อมูลที่ให้ค่าความแตกต่างสีดีที่สุดอาจเลือกสีและความเข้มข้นไม่ตรงกับการผสมสีต้นฉบับ เนื่องจากมีการเลือกใช้สีที่เป็นต้นกำเนิดของสีในฐานข้อมูลอีกต่อหนึ่ง เพราะสีที่อยู่ในฐานข้อมูลไม่ใช่แม่สีที่แท้จริง เช่น สี Ocean Blue ซึ่งเป็นสีฟ้าอ่อน สามารถเกิดจากการผสมกันของสี River Blue, Laurel Green และ Smoke ได้ ซึ่งผลการทดลองเช่นนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Berns และคณะ[5] ที่พบว่า การทำนายการเทียบสีด้วยวิธี Single-constant จะเลือกสีต่าง ๆ มาผสมด้วยกัน ถึงแม้ว่าจะมีสีที่เกิดจากการผสมสีเหล่านั้นอยู่ในฐานข้อมูลด้วยก็ตาม

ตารางที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีม่วง (ไม่ลดข้อมูล)

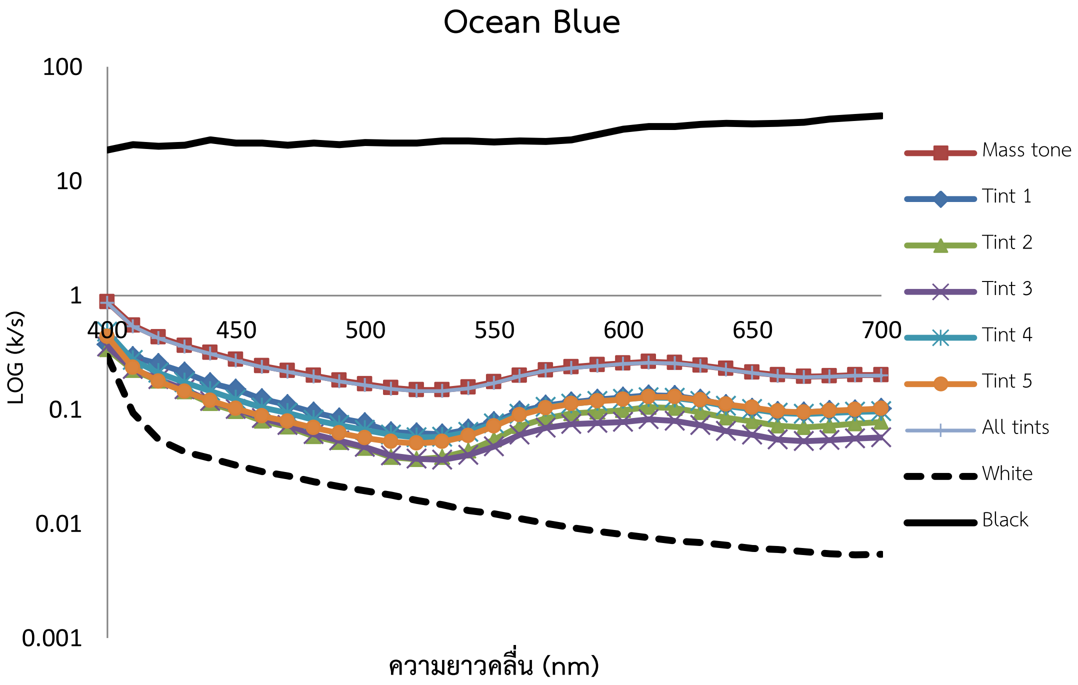
สีฐานข้อมูล	Real C	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5	AT
Tinting Red	0.45	0.25	-	-	-	-	0.10	0.25
River Blue	0.55	0.65	-	-	-	-	-	0.65
White	-	0.09	-	-	-	-	-	0.08
Black	-	0.02	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.02



ภาพที่ 4.5 ค่า k/s ของสี Reddish Yellow ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)



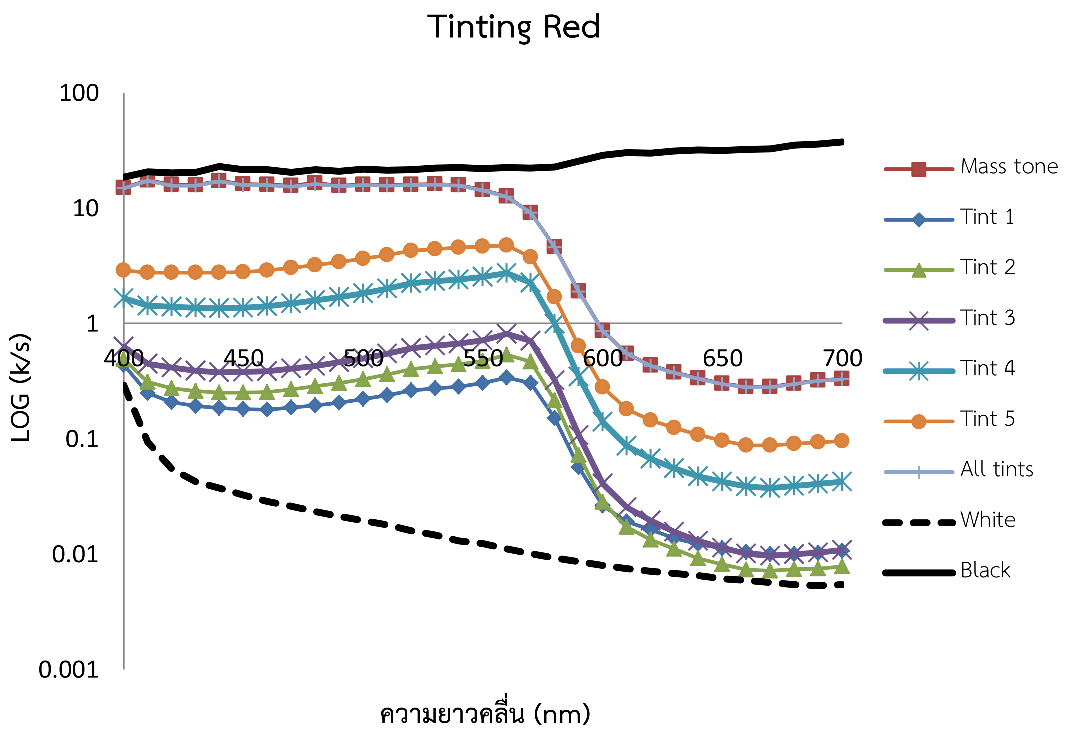
ภาพที่ 4.6 ค่า k/s ของสี River Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ 4.7 ค่า k/s ของสี Ocean Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)

ตารางที่ 4.14 แสดงผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสีที่ใช้ในการผสมให้ได้เหมือนกับสีทดสอบสีม่วง พบว่า ไม่มีฐานข้อมูลใดเลยที่เลือกใช้สีในฐานข้อมูลได้อย่างถูกต้อง เมื่อพิจารณาตามตารางที่ 4.12 ค่าความแตกต่างสีที่ดีนั้นเป็นการผสมโดยใช้ฐานข้อมูลของสีเดี่ยว, Tint 5 และ All tints ซึ่งสีเดี่ยวและ All tints นั้นเลือกใช้สีได้ใกล้เคียงกับสีที่กำหนดขึ้น แต่จะมีสี White และ Black เพิ่มเติม เพื่อใช้ในการปรับความสว่างของสี สำหรับ Tint 5 นั้นได้เลือกสีมาใช้ในการผสมที่ถูกต้องเพียงสีเดียวและมีสี Black ที่เลือกมาใช้ผสมด้วย ดังนั้นหากพิจารณาค่า k/s ของสี Tinting Red ดังภาพที่ 4.8 และ River Blue (ภาพที่ 4.6) พบว่า ค่า k/s ของฐานข้อมูลสีเดี่ยวและ All tints มีค่าเท่ากัน จึงให้ผลการทำนายใกล้เคียงกันมาก

ค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าแตกต่างไปจากค่าที่กำหนดขึ้น แต่การเลือกใช้สีในฐานข้อมูลนั้นให้ความใกล้เคียงกับสีที่ใช้ในการผสมจริง จะมีบางฐานข้อมูลที่เลือกใช้สีเพิ่มหรือเลือกใช้สีอื่นในฐานข้อมูลมาทดแทนสีที่หายไป เนื่องจากบางสีให้ค่า k/s ที่เหมือนกันในความยาวคลื่นนั้น ๆ ทำให้การเลือกใช้สีนั้นมีความสับสน และเลือกสีเหล่านั้นมาเป็นตัวแทนของค่า k/s ในความยาวคลื่นนั้น



ภาพที่ 4.8 ค่า k/s ของสี Tinting Red ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)

4.3.2 ลดข้อมูล

จากขั้นตอนการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงจาก 31 ความยาวคลื่น เหลือเพียง 9 ความยาวคลื่น ทำให้ได้ค่า k/s จำนวน 9 ค่าของแต่ละสีในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูล เมื่อนำมาทำนายค่าความแตกต่างสีทดสอบสีเขียวและสีม่วงดังตารางที่ 4.15 จะเห็นว่า ค่าความความแตกต่างสีที่ทำนายได้นั้นให้ค่าสูงกว่าแบบไม่ลดข้อมูล แต่ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน 3 หน่วย) และกลุ่มฐานข้อมูลที่ให้ค่าความแตกต่างสีที่ดีนั้นเป็นกลุ่มฐานข้อมูลชนิดเดียวกับแบบไม่ลดข้อมูล

ตารางที่ 4.15 ค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Test (ลดข้อมูล)

สีทดสอบ	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
สีเขียว	**2.89**	7.55	3.84	8.66	**1.14**	**1.68**
สีม่วง	**1.91**	3.31	9.00	7.69	**1.38**	**2.12**

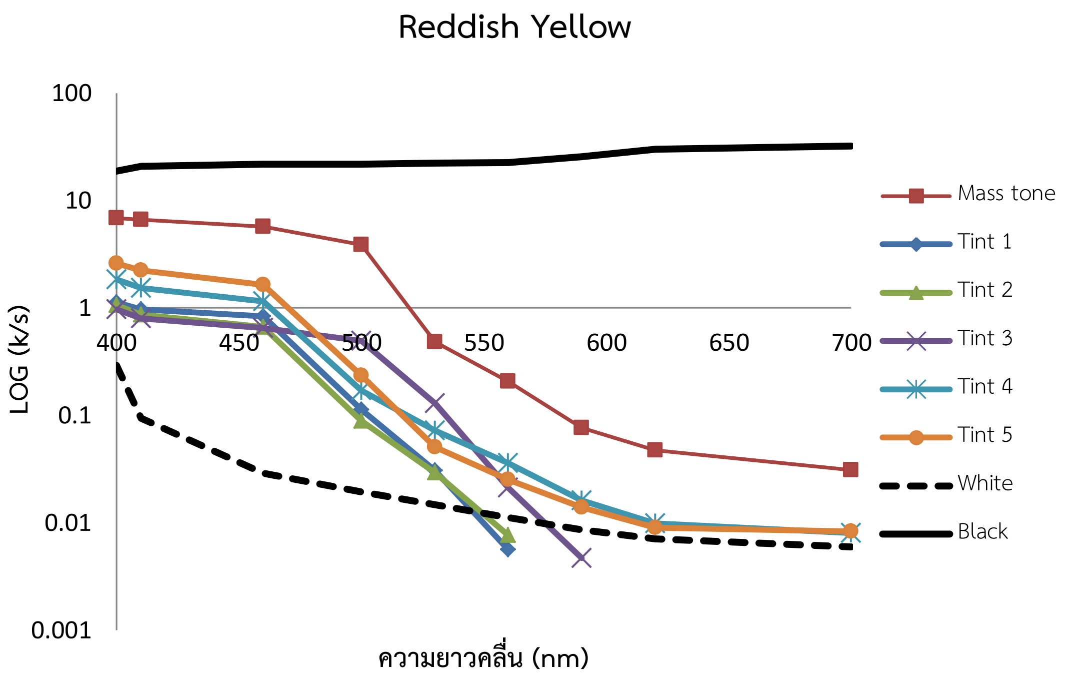
ตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีเขียว (ลดข้อมูล)

สีฐานข้อมูล	Real C	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Reddish Yellow	0.46	0.11	0.04	0.78	0.87	0.24	0.34
River Blue	0.09	0.02	0.03	0.14	-	0.04	0.07
Ocean Blue	0.45	-	-	-	-	0.72	0.23
Tinting Red		-	0.01	-	-	-	-
Laurel Green		0.01	0.01	0.03	-	-	0.01
Smoke		0.51	0.41	-	-	-	0.35
White		0.36	0.50	-	-	-	-
Black		-	-	0.06	0.13	-	-

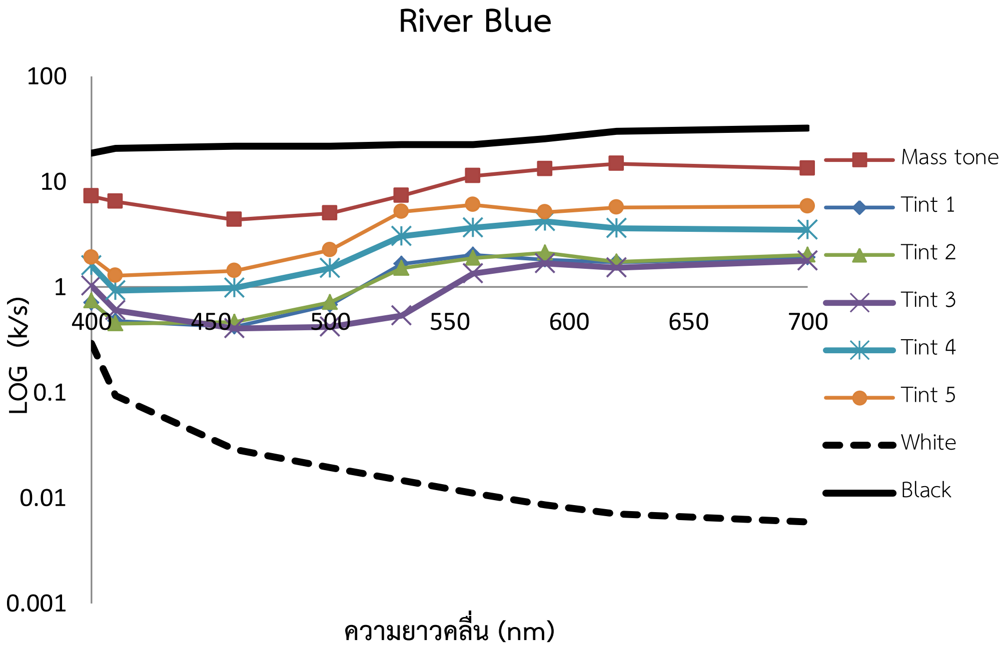
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายสีทดสอบสีเขียว พบว่า Tint 4 เลือกใช้สีในการผสมนั้นเหมือนกับแบบไม่ลดข้อมูล แต่ค่าความแตกต่างสีแบบลดข้อมูลมีค่าที่ดีกว่าแบบไม่ลดข้อมูล ค่าความเข้มข้นที่ทำนายด้วยกลุ่มฐานข้อมูลของสีเดี่ยวและ Tint 5 ที่มีค่าความแตกต่างสีไม่เกิน 3 หน่วยนั้น กลุ่มฐานข้อมูลของสีเดี่ยวจะไม่ใช้สี Ocean Blue แต่จะใช้สี Laurel Green, Smoke และ White มาผสมแทน แต่ Tint 5 เลือกใช้สี Laurel Green และ Smoke เพิ่มจากที่กำหนด หากพิจารณาดูค่า k/s ของสี Reddish Yellow, River Blue และ Ocean Blue ที่ลดความยาวคลื่น ดังภาพที่ 4.9-4.11 พบว่า ค่า k/s ของสี Reddish Yellow และ Ocean Blue ของฐานข้อมูล Tint 1-5 จะมีบางช่วงความยาวคลื่นที่ให้ค่าที่ซ้อนทับกันกับสี White ทำให้การคำนวณจึงเลือกสี White และ Smoke (มีสีที่ใกล้เคียงกับสี White) มาผสมด้วย อย่างไรก็ดีค่าความแตกต่างสีของสีเขียวเมื่อทำนายด้วยกลุ่มฐานข้อมูล Tint 4 ให้ค่าที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.17 ค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายของสีม่วง (ลดข้อมูล)

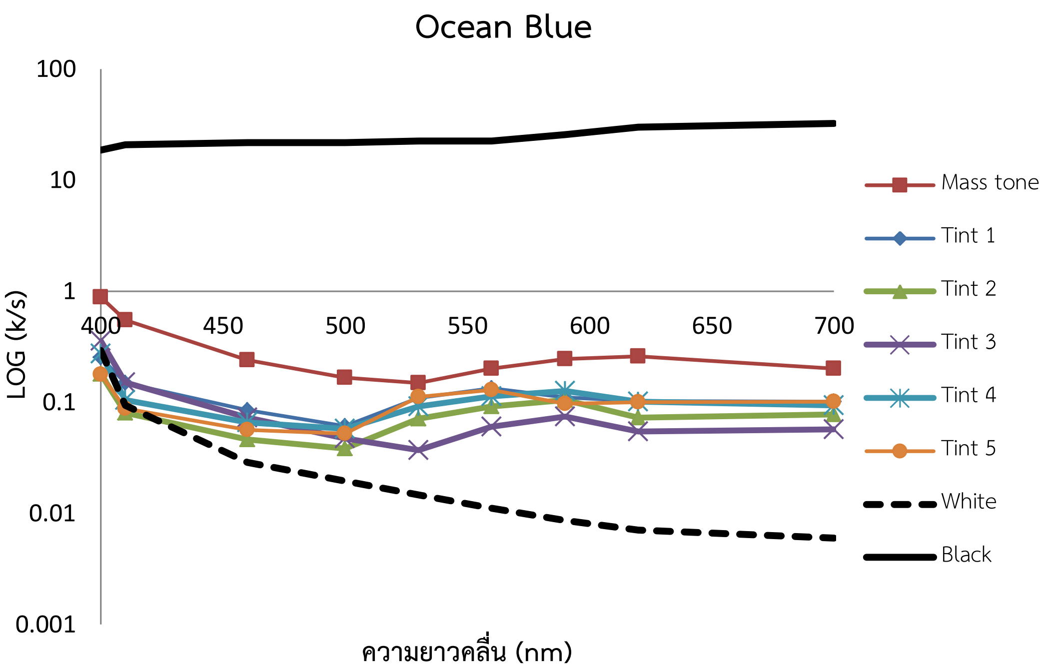
สีฐานข้อมูล	Real C	MT	Tint 1	Tint 2	Tint 3	Tint 4	Tint 5
Tinting Red	0.45	0.24	0.12	-	-	0.24	0.12
River Blue	0.55	0.61	0.18	-	-	0.01	-
White		0.12	0.44	-	-	-	-
Black		0.03	0.25	1.00	1.00	0.75	0.88



ภาพที่ 4.9 ค่า k/s ของสี Reddish Yellow ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)



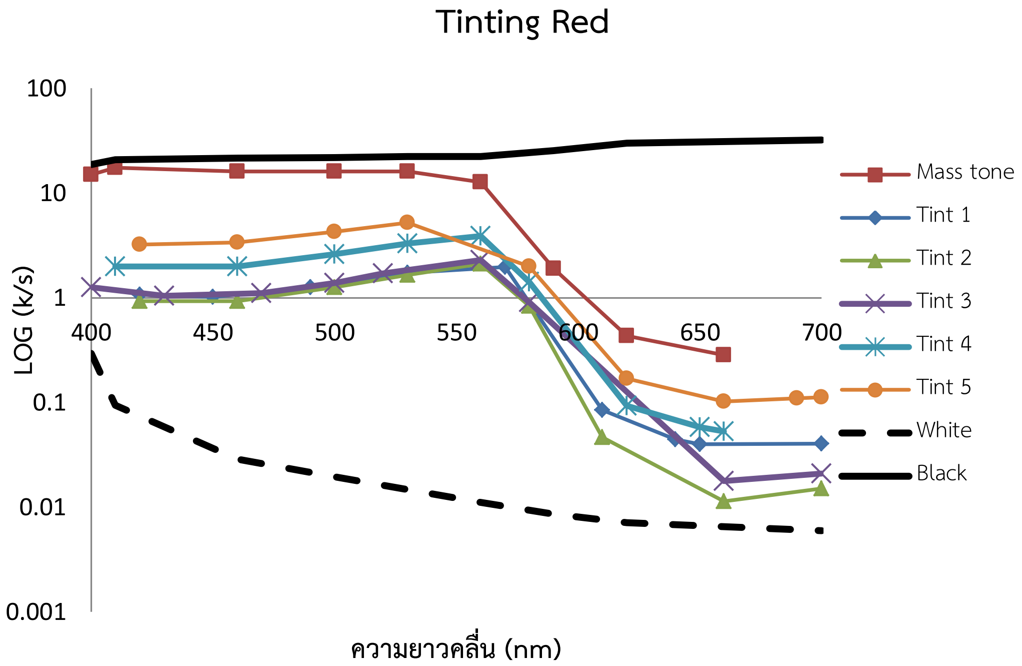
ภาพที่ 4.10 ค่า k/s ของสี River Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)



ภาพที่ 4.11 ค่า k/s ของสี Ocean Blue ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการทำนายค่าความเข้มข้นของสีที่ใช้ในการผสมให้ได้เหมือนกับสีทดสอบสีม่วง พบว่า ฐานข้อมูลสีเดี่ยวเลือกสีในการผสมเช่นเดียวกับการทำนายแบบไม่ลดข้อมูลและให้ค่าความแตกต่างสีที่ดีเช่นเดียวกัน (มีค่าไม่เกิน 3 หน่วย) แต่สำหรับ Tint 1 ซึ่งทำนายสีที่นำมาผสมเช่นเดียวกับฐานข้อมูลสีเดี่ยว แต่ให้ผลค่าความแตกต่างสีสูง เนื่องจากค่าความเข้มข้นต่างกัน นอกจากนี้จะเห็นว่า ทุกฐานข้อมูลทำนายการผสมของสีดำร่วมด้วย หากพิจารณาค่า k/s ของ Tinting Red ที่ลดความยาวคลื่นดังภาพที่ 4.12 และ River Blue (ภาพที่ 4.10) จะเห็นว่า ค่า k/s ของ Tinting Red และ River Blue นั้นมีบางช่วงความยาวคลื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสี Black จึงทำให้เลือกสี Black มาผสม เพื่อปรับความสว่างของสี

จากการทำนายค่าความเข้มข้นเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของสูตรการเทียบสีที่ไม่มีการลดข้อมูลและแบบลดข้อมูลพบว่า ผลที่ได้นั้นใกล้เคียงกัน แต่การลดข้อมูลจะให้ค่าความแตกต่างสีที่สูงกว่าแบบไม่ลดข้อมูล เนื่องมาจากการลดความยาวคลื่นที่ทับซ้อนกัน ทำให้ข้อมูลบางส่วนนั้นหายไป กล่าวคือ ความยาวคลื่นที่สีต่างกันให้ค่า k/s เหมือนกัน จะถูกลดข้อมูล แต่ในฐานข้อมูลมีสีอยู่ 9 สีที่แตกต่างกัน ดังนั้นบางส่วนของความยาวคลื่นที่ลดไปนั้นไม่ใช่ทุกสีจะมีค่า k/s เท่ากันที่ความยาวคลื่นนั้น เมื่อลดข้อมูลนั้นไป การทำนายสีจึงผิดพลาดได้ แต่ยังมีบางฐานข้อมูลที่ทำนายสีบางสีแล้วมีการเลือกใช้สีแบบเดียวกันและให้ค่าความแตกต่างสีที่น้อยกว่าการไม่ลดข้อมูล คือ สีม่วง เมื่อทำนายด้วยฐานข้อมูลของ Tint 4



ภาพที่ 4.12 ค่า k/s ของสี Tinting Red ทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่ใช้ในการทำนายการเทียบสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ ด้วยวิธี Single-constant สำหรับสีทาประเภทสีน้ำมันเคลือบเงา ใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักในการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง และวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายสูตรการเทียบสีจากฐานข้อมูลที่ลดจำนวนข้อมูลค่าการสะท้อนแสง สรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 วิธีการลดข้อมูลและเลือกข้อมูล

ในขั้นตอนการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงนั้น ได้เตรียมชุดตัวอย่างสี ซึ่งเป็นสีน้ำมันมาร์โกจำนวน 9 สี ได้แก่ Tinting red, Orange, Reddish yellow, Laurel green, Ocean blue, River blue, Smoke, White และ Black ได้แบ่งกลุ่มฐานข้อมูลออกเป็น กลุ่มที่ 1 สีเดี่ยว, กลุ่มที่ 2-6 สีเจือจาง (tint) ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ระดับ และกลุ่มที่ 7 All tints เป็นชุดตัวอย่างสีรวมของกลุ่มที่ 1-6 ซึ่งสีในแต่ละฐานข้อมูลของกลุ่มที่ 1-6 มีทั้งหมด 9 สี แต่ละสีมีข้อมูลค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ทุก 10 นาโนเมตร ทั้งหมด 31 ค่า เมื่อนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักและพิจารณาจำนวนส่วนประกอบหลักที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรได้ครบ 100% สามารถลดจำนวนข้อมูลได้เหลือ 9 ความยาวคลื่นของกลุ่มฐานข้อมูลกลุ่มที่ 1-6 ในขณะที่กลุ่มที่ 7 (All tints) มีชุดตัวอย่างสีทั้งหมด 49 สี ไม่สามารถลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงได้ เนื่องจากไม่มีความยาวคลื่นใดที่จัดกลุ่มให้อยู่ในส่วนประกอบเดียวกัน

จากการลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงเหลือเพียง 9 ความยาวคลื่น การเลือกความยาวคลื่นเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละส่วนประกอบหลักใช้การหมุนแกนปัจจัยร่วมแบบ varimax และเลือกความยาวคลื่นที่ให้ค่า loading ที่มากที่สุดของแต่ละส่วนประกอบ ซึ่งในแต่ละกลุ่มฐานข้อมูลนั้นได้ผลค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนความยาวคลื่นเริ่มต้นและความยาวคลื่นสุดท้ายเป็น 400 และ 700 นาโนเมตร เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าช่วงแบบเชิงเส้น สำหรับนำไปคำนวณค่าสี เพื่อลดขั้นตอนการผสมสีจริง สำหรับการใช้งานทั่วไปสามารถเลือกจากค่า loading จริง เพื่อทำนายความความเข้มข้นไปผสมจริงและวัดค่าสีได้

5.1.2 ชุดตัวอย่างสี (training set) ในการเตรียมฐานข้อมูล

ในขั้นตอนการทำนายสูตรการเทียบสี การเตรียมฐานข้อมูลนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง หากไม่มีฐานข้อมูลที่ดี ผลการทำนายนั้นอาจผิดพลาดได้ ชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการเตรียมฐานข้อมูลในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 7 กลุ่ม จากผลการทดลองพบว่า การทำนายด้วยกลุ่มฐานข้อมูล Tint 4-5 ที่เป็นสีเจือจางที่ความเข้มข้นสูง (ผสมสีขาวด้วยอัตราส่วน 0.30 และ 0.15 ตามลำดับ) และ All tints ที่รวมชุดตัวอย่างสีของทุกกลุ่ม สามารถทำนายได้ดีกว่ากลุ่มฐานข้อมูลอื่น ๆ ทั้งแบบลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสง กล่าวคือ การใช้สีเจือจางที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงสามารถทำนายได้ดีกว่า เพราะการเลือกสีของการคำนวณนั้นอาจเกิดความผิดพลาดถ้าสีบางสีมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละความยาวคลื่น ทั้งนี้ผลความแม่นยำของการทำนายขึ้นกับลักษณะของสีทดสอบเช่นกัน สีทดสอบที่มีความสว่างสูง เช่น สีชมพูอ่อน (Quiet Pink) การทำนายด้วยฐานข้อมูล Tint 3 ที่เตรียมจากชุดตัวอย่างสีเจือจางความเข้มข้นต่ำจะให้ค่าความแตกต่างสีที่ดีกว่าการใช้ Tint 4 หรือ 5

ดังนั้นในการใช้งานทั่วไปควรคำนึงถึงสีที่จะนำมาใช้ในการเทียบสี ควรใช้ฐานข้อมูลที่สอดคล้องกันกับสีที่ต้องการ เช่น หากสีที่ต้องการเทียบสีเป็นสีที่มีความสว่างสูง ควรใช้ฐานข้อมูลที่เตรียมจากชุดสีเจือจางที่ความเข้มข้นต่ำ (มีอัตราส่วนผสมของสีขาวมาก) แต่ต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำมากจนเกินไป เพราะจะทำให้ระบบการทำนายสับสนในการเลือกสี

5.1.3 ความแม่นยำของการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล

จากการคำนวณค่าความแตกต่างสีของสีทดสอบ Quiet Pink และ Teak ทั้งแบบลดและไม่ลดข้อมูลพบว่า ผลที่ได้นั้นใกล้เคียงกัน มีค่าความแตกต่างสีที่ดี (ไม่เกิน 3 หน่วย) และเมื่อนำค่าความเข้มข้นที่ได้จากการทำนายมาผสมจริงและวัดค่าการสะท้อนแสงเปรียบเทียบกับสีจากต้นฉบับพบว่าภายใต้สภาวะ D65/10 คู่สีนี้ให้ค่า CIEDE2000 ไม่เกิน 3 หน่วยเช่นกัน เมื่อวิเคราะห์กราฟค่าการสะท้อนแสงพบว่า จะไม่เกิดเมทาเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง นั่นคือ หากสภาวะแสงเปลี่ยนจาก D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสงอื่น คู่สีนั้นยังคงดูแตกต่างกันหรือใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่เห็นภายใต้แสง D65

จากการทำนายความเข้มข้นของสีทดสอบสีเขียวและสีม่วง ผลการทำนายพบว่า การทำนายแบบลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูลเลือกใช้สีที่ผสมใกล้เคียงกัน แต่ค่าความแตกต่างสีของการลดข้อมูลจะมีค่ามากกว่า เนื่องมาจากการลดความยาวคลื่นที่ทับซ้อนกัน ทำให้ข้อมูลบางส่วนนั้นหายไป เมื่อนำมาคำนวณค่าสีต้องมีการประมาณค่าในช่วง เพื่อเติมเต็มข้อมูลส่วนที่ขาดหายไป ซึ่งจะได้ค่าโดยประมาณไม่ตรงกับค่าจริง ทำให้ผลค่าความแตกต่างสีสูงขึ้น

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Components Analysis, PCA) และวิเคราะห์ความแม่นยำของสูตรการทำนายการผสมสีบนฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังค์ ด้วยวิธี Single-constant ให้ผลการเลือกใช้สีในการทำนายค่าความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกันระหว่างการลดข้อมูลและไม่ลดข้อมูล ทั้งนี้ค่าความแตกต่างสีของการลดข้อมูลนั้นสูงกว่า แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน 3 หน่วย) และค่าการสะท้อนแสงของสีที่ทำนายนั้นไม่เกิดเมทาเมอริซึม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ต้องใช้ฐานข้อมูลเพื่อทำนายสีที่ต้องการให้เหมาะสม ซึ่งการลดข้อมูลจะเป็นประโยชน์และเหมาะสมอย่างยิ่ง เพราะหากมีฐานข้อมูลจำนวนมาก การลดข้อมูลค่าการสะท้อนแสงลงก็จะช่วยทำให้การคำนวณนั้นประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น ประหยัดเวลา ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและลดทรัพยากรหรือพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลสี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขณะทำการทดลองควรทำอยู่ห้องปิด เพื่อไม่ให้มีฝุ่นในการทดลอง เพราะจะทำให้ตัวอย่างสีที่ปาดนั้นมีฝุ่นเกาะติดปะปนตัวอย่างสีเหล่านั้น ทำให้ตัวอย่างมีผิวที่ขรุขระ และสีไม่สม่ำเสมอ
2. สีน้ำมันในแต่ละสีจะให้เนื้อสีที่ไม่เหมือนกัน เช่น ถ้าสีเข้มความหนืดของสีจะมีมาก ทำให้เมื่อปาดสี ผิวของสีจะเรียบ ในนณะที่สีอ่อนเนื้อสีจะเหลวกว่า เมื่อปาดสีจะทำให้สีมีการแทนที่ฟองอากาศ
3. หากสภาวะแวดล้อมไม่เอื้ออำนายจากที่กล่าวมาในข้อ 1-2 ควรปาดสีตัวอย่างไว้จำนวนหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาด หากเกิดลมพัดปลิว อาจทำให้ตัวอย่างเสียหาย
4. เนื่องจากสีน้ำมันเป็นสีแห้งตัวช้าใช้เวลาในการแห้งตัวประมาณ 1 วัน ควรเตรียมสถานที่ในการทดลองไม่ให้มีสิ่งรบกวน และควรจัดเตรียม วางแผนการทดลองให้ดี สีบางสีปาดประมาณ 2-3 ครั้งก็ทึบแสงแล้ว แต่หากเป็นสีที่มีความเจือจางสูงอาจจะต้องปาดถึง 7-8 ครั้ง
5. ผลการลดข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักและการพิจารณาค่า loading ในการเลือกข้อมูล จำนวนความยาวคลื่นและความยาวคลื่นที่ได้ขึ้นอยู่กับชุดตัวอย่างสีในการสร้างฐานข้อมูล ดังนั้นหากเปลี่ยนชุดตัวอย่างสีไป ผลการลดข้อมูลอาจต่างไปจากงานวิจัยนี้

รายการอ้างอิง

1. Novabizz. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสี. 13/06/2016]; Available from: https://www.novabizz.com/CDC/Interior/Interior_Colour01.htm#ixzz2D7QOpzdT.
2. สุจิตรา สื่อประสาร, เอกสารประกอบการเรียนวิชา การวัดสี (*Colour Measurement).* 2557, ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Hébert, M. and P. Emmel, *Two-Flux and Multiflux Matrix Models for Colored Surfaces.* Handbook of Digital Imaging, 2015.
4. Berns, R.S. and M. Mohammadi, *Single-constant simplification of Kubelka-Munk turbid-media theory for paint systems—A review.* Color Research & Application, 2007. **32**(3): p. 201-207.
5. Berns, R.S. and M. Mohammadi, *Evaluating single-and two-constant Kubelka-Munk turbid media theory for instrumental-based inpainting.* Studies in Conservation, 2007. **52**(4): p. 299-314.
6. Koirala, P., M. Hauta-Kasari, B. Martinkauppi, and J. Hiltunen, *Color mixing and color separation of pigments with concentration prediction.* Color Research & Application, 2008. **33**(6): p. 461-469.
7. เจ.ซี.ที.2006. สีทาบ้าน. 14/06/2016]; Available from: http://www.misterdecorate.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=539199907.
8. Haddock, M.I., *Prototype software for colorant formulation using Gamblin conservation colors*. 2011: Rochester Institute of Technology.
9. พิชญดา เกตุเมฆ, เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Optical Properties of Colored Materials*. 2557, ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. กัลยา วานิชย์บัญชา, การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร. พิมพ์ครั้งที่ 4 ed. 2552: ธรรมสาร, กรุงเทพฯ.

11. ยศนันท์ มีมาก, เอกสารประกอบการเรียน *Linear Algebra I*. 2559, ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

12. ยศนันท์ มีมาก, เอกสารประกอบการเรียน *Linear Algebra II*. 2559, ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

13. Scribd HQ. การประมาณค่าในช่วง. 2/05/1016]; Available from: https://www.scribd.com/document/การประมาณค่าในช่วง-Interpolations.

14. Luo, M.R., G. Cui, and B. Rigg, *The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000.* Color Research & Application, 2001. **26**(5): p. 340-350.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ค่า loading ของตัวแปรในแต่ละส่วนประกอบหลัก

ตารางที่ ก.1 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูลสีเดี่ยว

λ (nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400									-0.949
410				0.594				0.103	
420				0.574					
430				0.447				-0.107	
440				0.247				-0.303	
450								-0.485	
460								-0.525	
470								-0.456	
480	-0.242							-0.33	
490	-0.453							-0.149	
500	-0.608								
510	-0.521					0.148		0.11	
520	-0.162	0.126				0.492			
530						0.626			
540		-0.109	-0.18			0.49			
550		-0.108	-0.385			0.25			
560			-0.53				-0.116		
570			-0.474		-0.243				
580			-0.201		-0.534		0.125		
590					-0.557		0.131		
600					-0.296		-0.16		
610							-0.464		0.111
620							-0.551		
630							-0.489		
640		-0.227					-0.298		
650		-0.431							
660		-0.546							
670		-0.521							
680		-0.331	0.153		-0.16				
690		-0.135	0.281		-0.277		-0.106		
700			0.383	-0.108	-0.367	0.117	-0.125		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.2 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 1

λ(nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400		0.301			-0.169		-0.311		-0.304
410					-0.102	-0.425			
420						-0.576	0.111		
430						-0.452	0.149		-0.198
440	-0.111					-0.244	0.132		-0.467
450							0.436	-0.127	
460		0.166					0.394	-0.124	0.118
470		0.241					0.254		
480		0.402					0.135		
490		0.506							
500		0.488							
510		0.318		-0.196					
520				-0.495	0.1		0.176	0.109	
530				-0.573					
540				-0.513			-0.182		-0.132
550		0.145	-0.101	-0.29	-0.273		-0.282	-0.236	0.217
560			-0.435		-0.204		-0.183	-0.137	
570			-0.706				0.133		
580			-0.522		0.286			0.141	-0.13
590			-0.111		0.31	-0.285	-0.233		0.293
600	-0.104				0.304	-0.278	-0.353	-0.154	
610	-0.134						0.1	-0.592	
620								-0.517	
630	0.106							-0.406	-0.101
640	0.128							-0.146	-0.567
650	0.509								
660	0.484								-0.219
670	0.508								
680	0.353				0.212				0.204
690					0.413				
700					0.546				

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.3 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 2

λ(nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400	-0.17		0.28	0.131	-0.39	0.135	-0.314	0.137	0.202
410			0.124		-0.108			0.528	
420				-0.111				0.616	-0.105
430	0.168		-0.241	0.109	0.109		0.181	0.468	
440			-0.348					0.181	
450	-0.135		-0.414				-0.197		
460			-0.443						
470			-0.411		-0.146		0.123		0.106
480			-0.174	-0.104	-0.384				
490					-0.475				
500	0.102				-0.484		0.13		
510	0.159	-0.167			-0.338		0.139		
520		-0.504		-0.144					-0.109
530		-0.569							
540		-0.497	0.103	0.139					
550	-0.142	-0.307	0.163	0.352					
560				0.597					
570				0.445					-0.493
580									-0.705
590				0.141			0.473	0.113	-0.105
600	-0.376		0.121			-0.116	0.182	0.122	
610	-0.544					-0.106			
620	-0.4		-0.148	0.141	0.104		0.124		0.124
630	-0.421					0.136	-0.105		
640	-0.107			0.162		0.355			0.139
650				0.103		0.483			
660						0.518			
670						0.449			
680	-0.184		0.119	-0.301	-0.108	0.237			-0.239
690						0.141	0.435		
700				-0.116			0.512		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.4 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 3

λ(nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400			-0.127		-0.14	-0.151	-0.121	0.599	
410			0.226					0.553	
420			0.393		0.213	0.102		0.267	
430			0.473					0.101	
440			0.466		-0.129				
450			0.391					-0.202	-0.151
460			0.179					-0.15	-0.417
470									-0.473
480					-0.287				-0.293
490		-0.104	-0.16		-0.224			0.16	-0.485
500		-0.114			-0.564				
510		0.158			-0.411				
520		0.547							
530		0.6							
540	0.287	0.437							
550	0.535	0.16							
560	0.553			0.181					
570	0.257	-0.106	0.109	0.569	-0.126	-0.101	-0.134	-0.194	0.105
580				0.672					
590				0.345	0.106	0.124	0.313	0.241	
600	0.11		0.156		-0.13		0.441		0.261
610	0.193				0.251		0.354		-0.143
620	0.242	-0.123	0.151	-0.133			0.298	-0.115	
630	0.216				0.274	-0.156	0.152		-0.241
640	0.145				0.172	-0.333			-0.15
650			0.105			-0.475			
660						-0.507			
670						-0.446			
680					-0.104	-0.278	0.215		
690	-0.114		-0.15			-0.102	0.349		-0.132
700	-0.133				-0.189		0.486	-0.104	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.5 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 4

λ(nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400		-0.125	-0.128	-0.177		-0.166		0.256	-0.512
410		-0.1						0.58	
420	-0.159							0.561	-0.141
430		0.178						0.432	0.133
440		0.374						0.182	
450	0.157	0.458							0.158
460		0.494							
470		0.423		-0.127					
480	0.108	0.255		-0.311					0.211
490		0.116		-0.484					-0.109
500				-0.585					0.105
510				-0.446			0.16		
520			0.133				0.489		
530							0.61		
540			-0.193				0.492		
550		-0.121	-0.383			0.133	0.277		
560	0.136		-0.501	-0.111	-0.236	0.128			0.148
570	-0.146		-0.201		-0.56			-0.119	-0.274
580	0.107				-0.633	-0.168			0.128
590			0.152		-0.392	0.1			
600					-0.103	0.391			
610						0.504			
620						0.505			
630	0.152					0.38			
640	0.352					0.171			
650		0.128				0.128		-0.126	-0.602
660	0.562								
670	0.358		0.112						-0.28
680	0.435		0.165						0.138
690	0.181		0.35		-0.121				
700		-0.109	0.494	-0.107	-0.174	0.112			

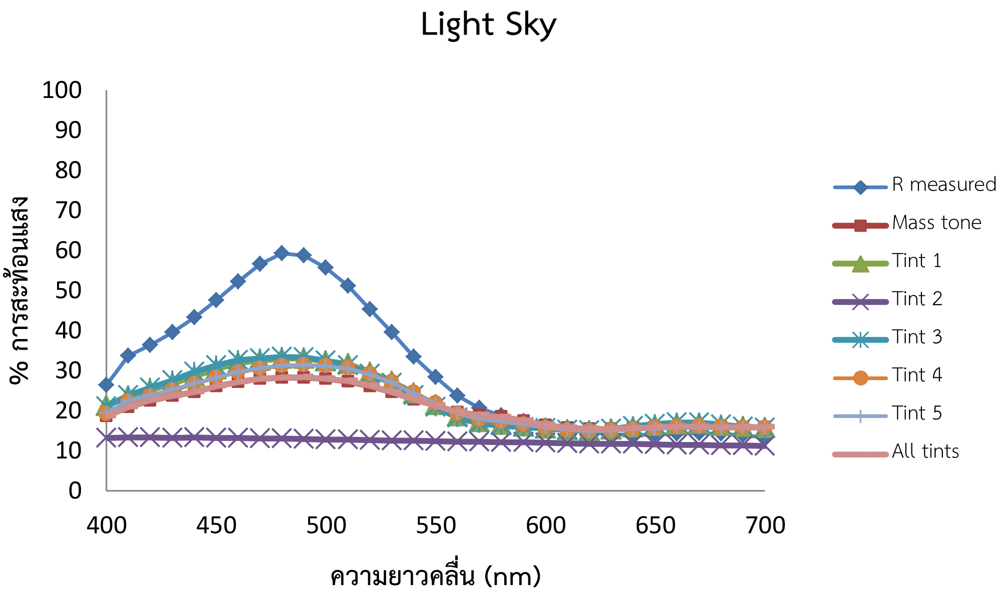
ตารางที่ ก.6 ค่า loading จากการหมุนแกนของฐานข้อมูล Tint 5

λ(nm)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
400	-0.214	-0.44			0.161	0.13	0.228	0.209	-0.203
410	-0.483				-0.17				-0.373
420	-0.63								
430	-0.495				0.148	-0.134			0.235
440	-0.18					-0.344			-0.238
450						-0.47			
460						-0.501			
470						-0.447			
480						-0.305		0.27	
490						-0.133		0.463	
500		0.112			-0.174			0.577	-0.279
510			-0.117					0.516	0.191
520			-0.431					0.133	0.185
530			-0.582		-0.205				
540			-0.523						
550			-0.373	0.145	0.162	0.103			-0.154
560			-0.178	0.332	0.297		-0.143		
570				0.553	0.113				
580				0.602	-0.11		0.12		
590				0.399	-0.217				
600				0.118			-0.304		0.222
610							-0.508		
620							-0.545		
630							-0.397		
640		-0.171			-0.186		-0.253		-0.333
650		-0.371					-0.15		
660		-0.543							
670		-0.449			-0.148				
680		-0.209			-0.369				
690					-0.562				
700					-0.332				0.562

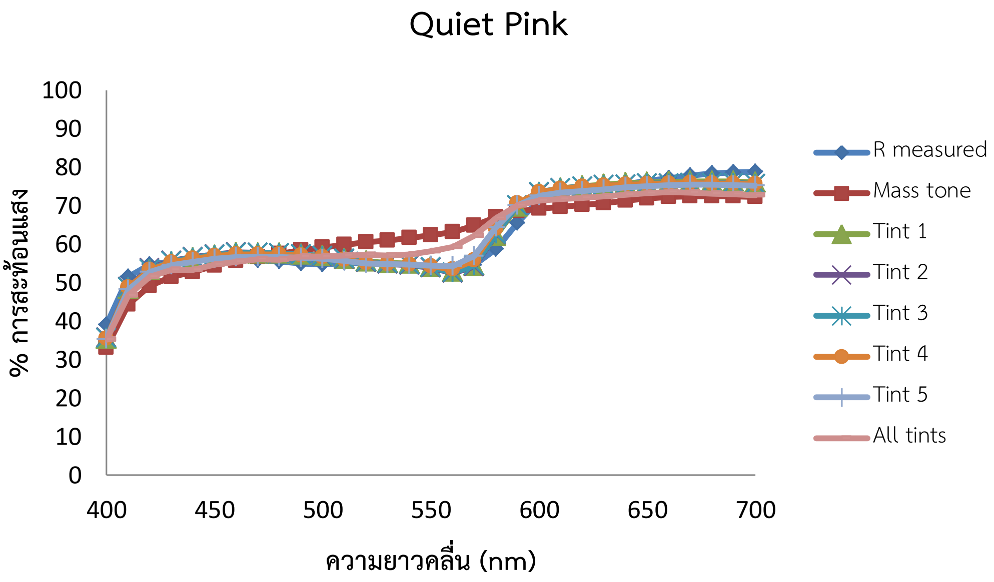
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

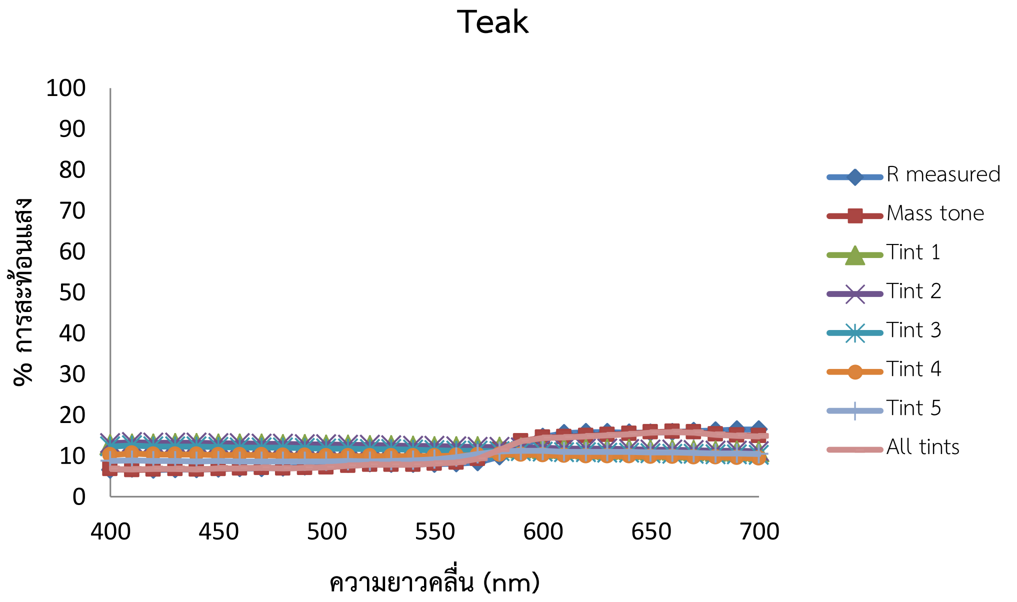
ผลการทำนายค่าการสะท้อนแสงของสีทดสอบ Unknown



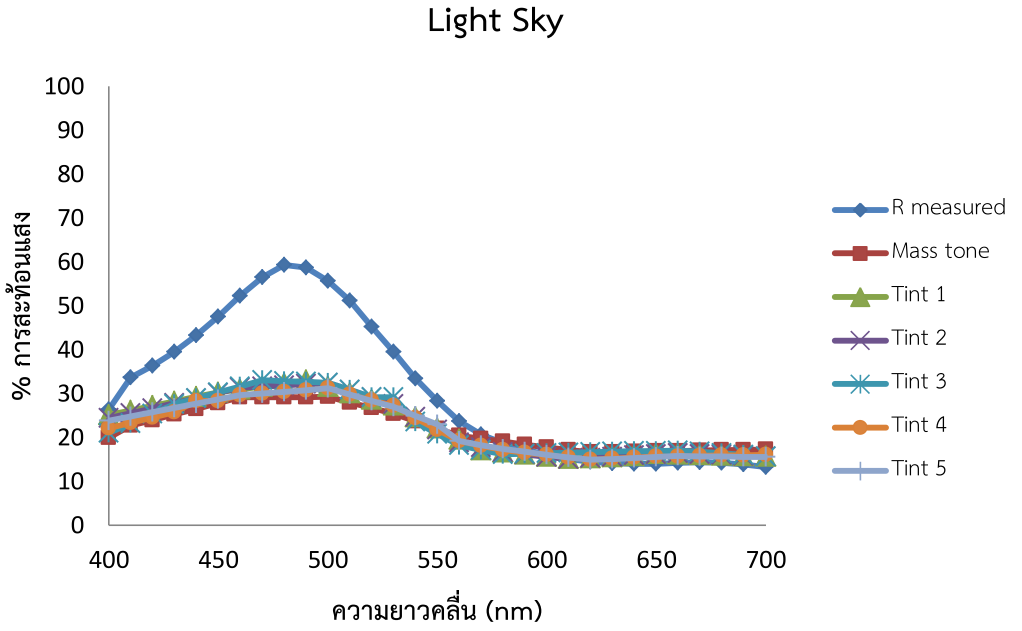
ภาพที่ ข.1 ค่าการสะท้อนแสงของสี Light Sky (ไม่ลดข้อมูล)



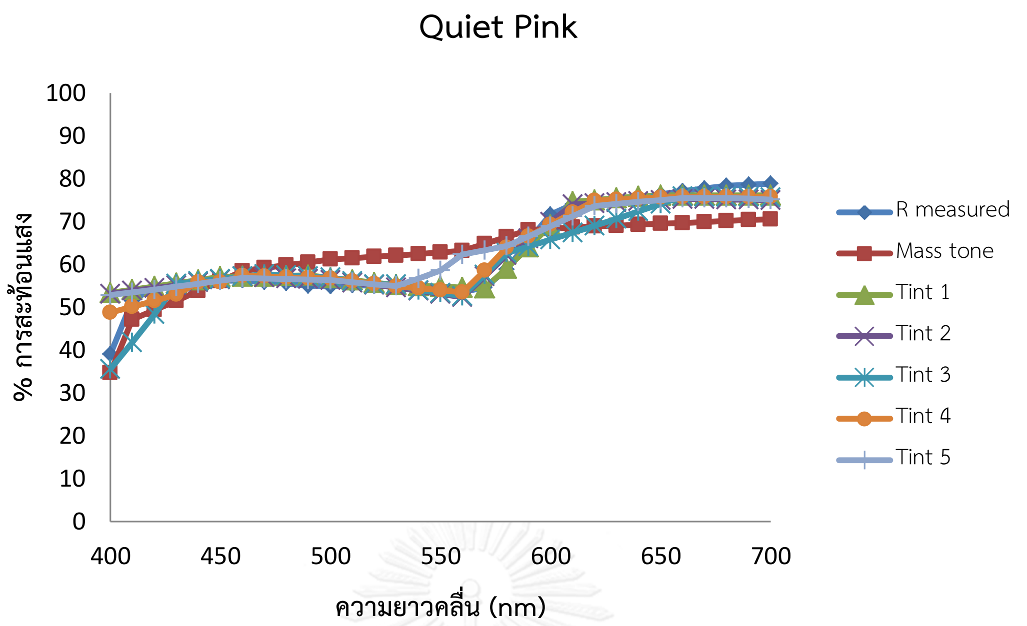
ภาพที่ ข.2 ค่าการสะท้อนแสงของสี Quiet Pink (ไม่ลดข้อมูล)



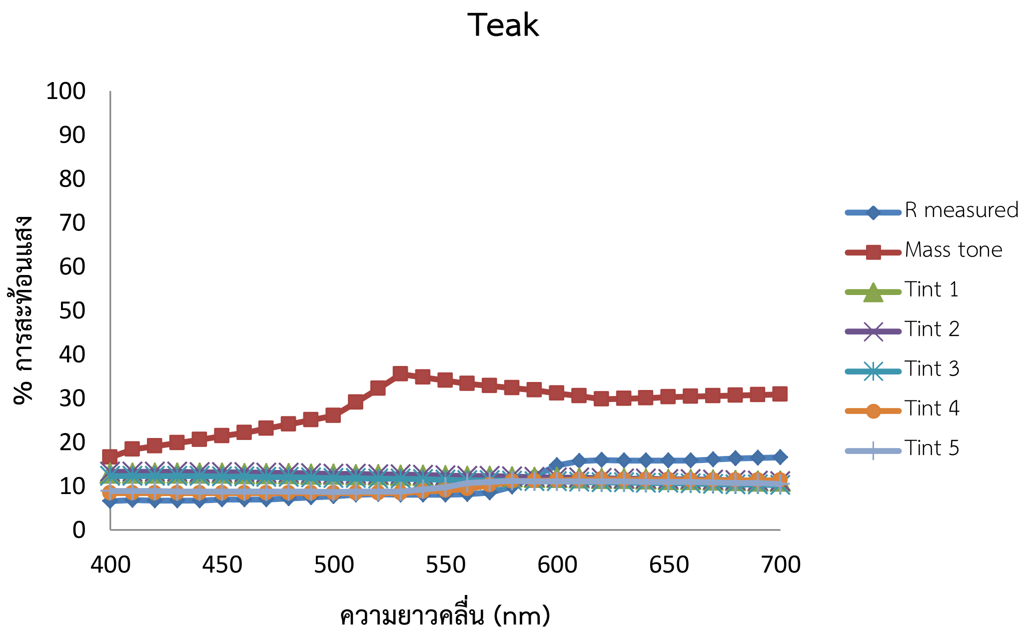
ภาพที่ ข.3 ค่าการสะท้อนแสงของสี Teak (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ ข.4 ค่าการสะท้อนแสงของสี Light Sky (ลดข้อมูล)



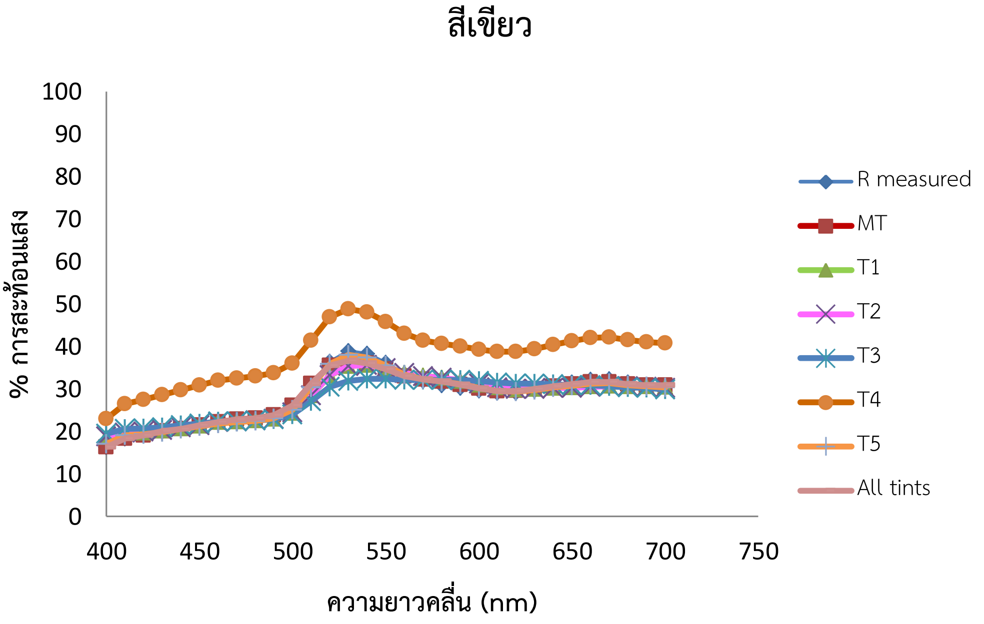
ภาพที่ ข.5 ค่าการสะท้อนแสงของสี Quiet Pink (ลดข้อมูล)



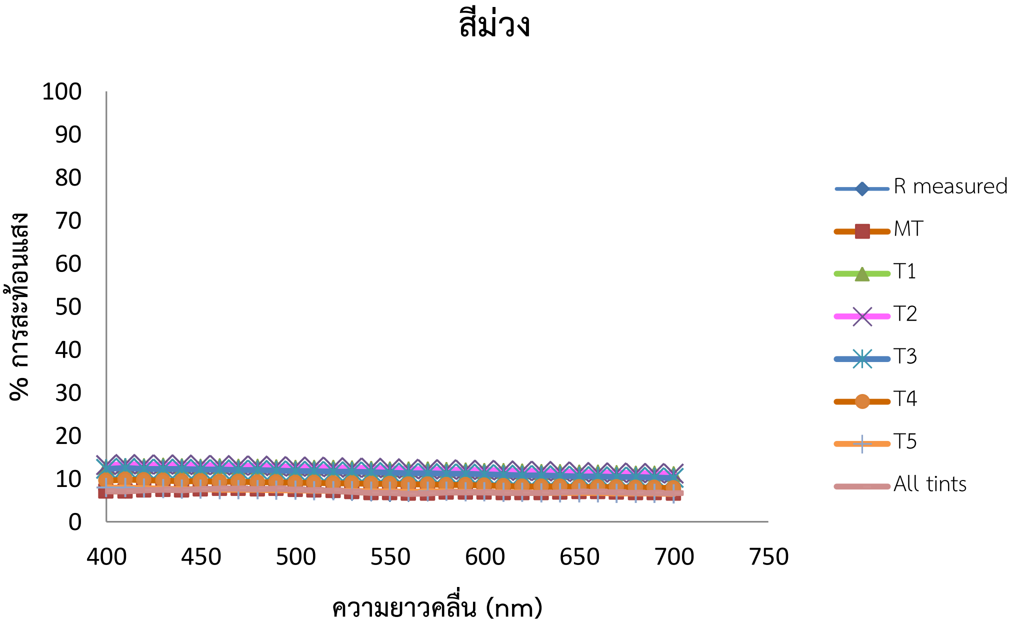
ภาพที่ ข.6 ค่าการสะท้อนแสงของสี Teak (ลดข้อมูล)

ภาคผนวก ค

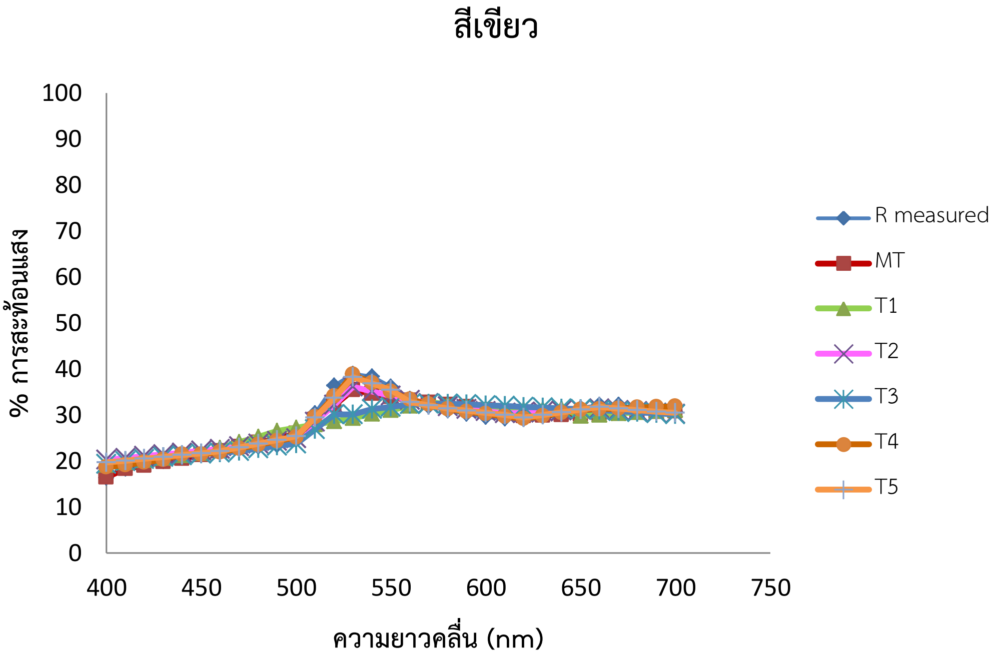
ผลการทำนายค่าการสะท้อนแสงของสีทดสอบ Test



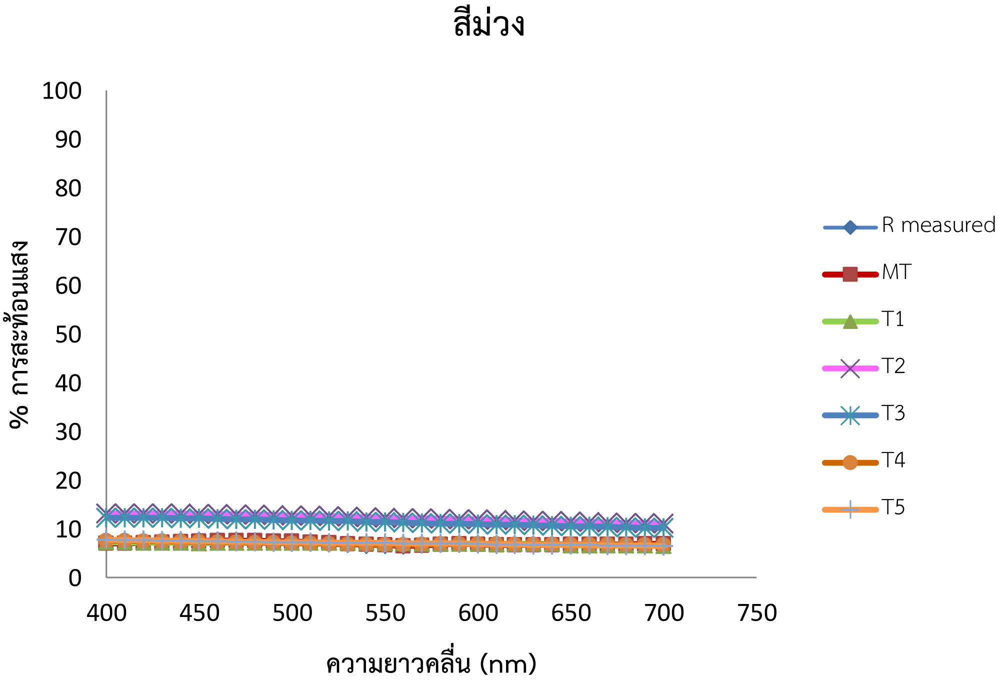
ภาพที่ ค.1 ค่าการสะท้อนแสงของสีเขียว (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ ค.2 ค่าการสะท้อนแสงของสีม่วง (ไม่ลดข้อมูล)



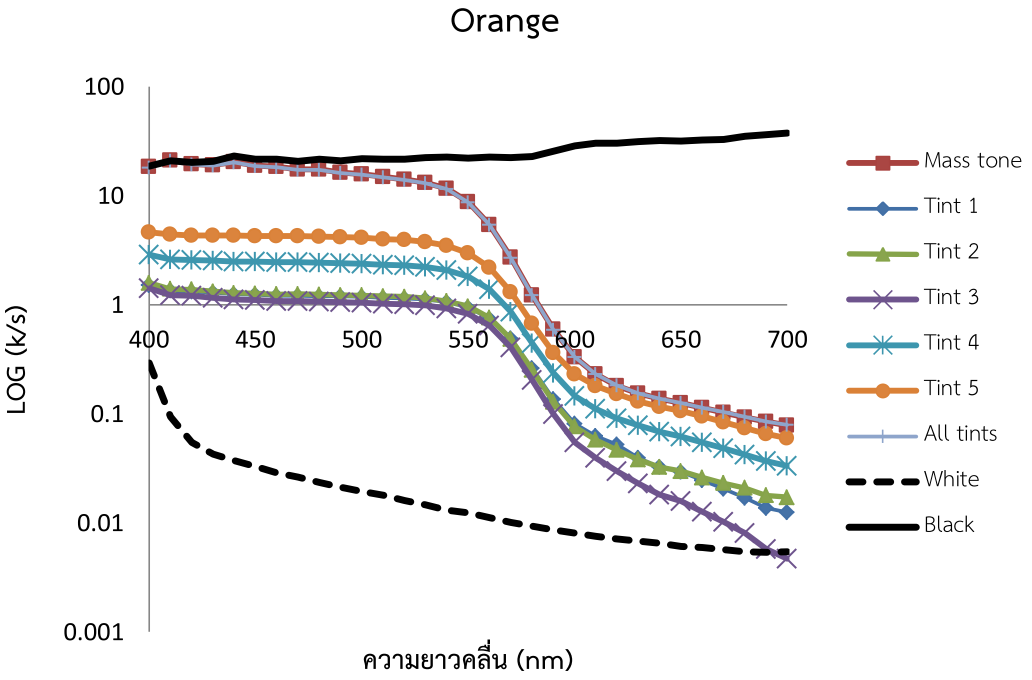
ภาพที่ ค.3 การสะท้อนแสงของสีเขียว (ลดข้อมูล)



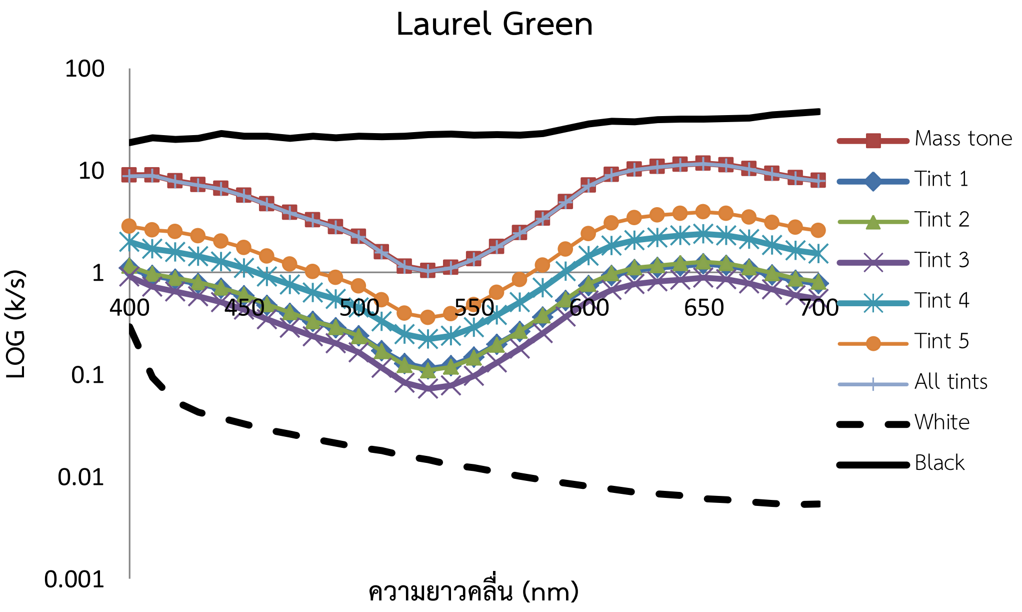
ภาพที่ ค.4 การสะท้อนแสงของสีม่วง (ลดข้อมูล)

ภาคผนวก ง

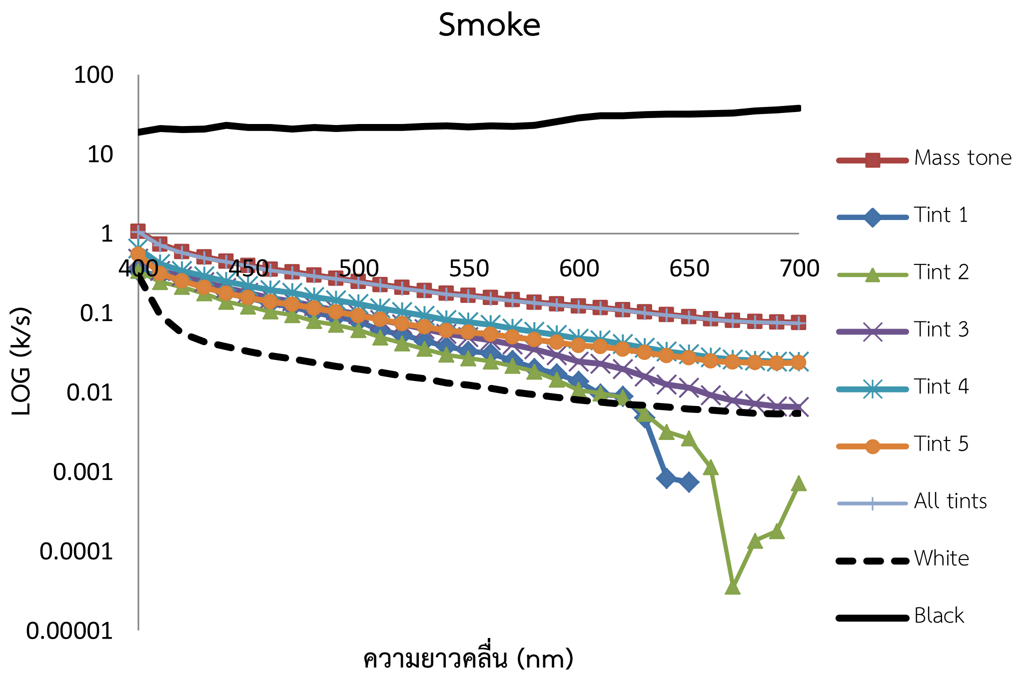
ค่า k/s ของแต่ละสีในทุกกลุ่มฐานข้อมูล



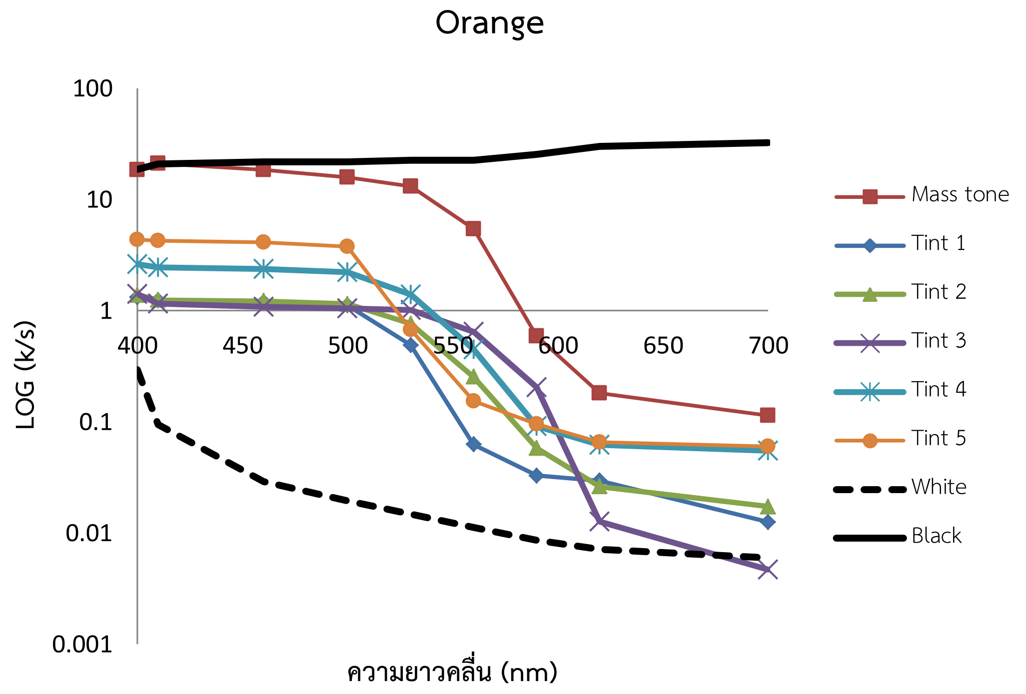
ภาพที่ ง.1 ค่า k/s ของสี Orange ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)



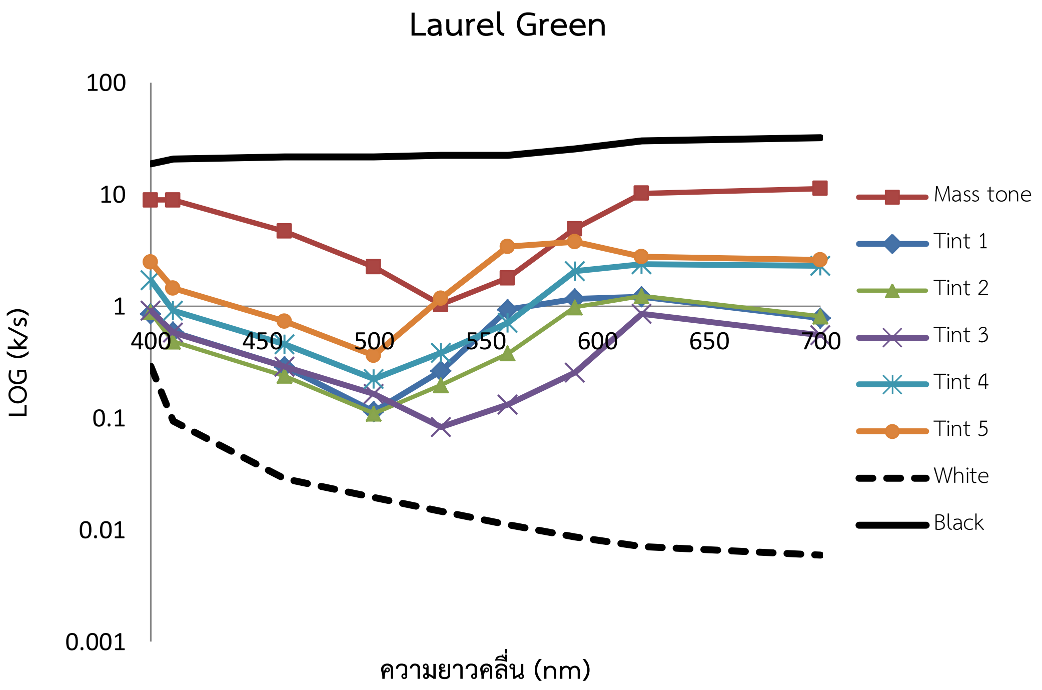
ภาพที่ ง.2 ค่า k/s ของสี Laurel Green ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)



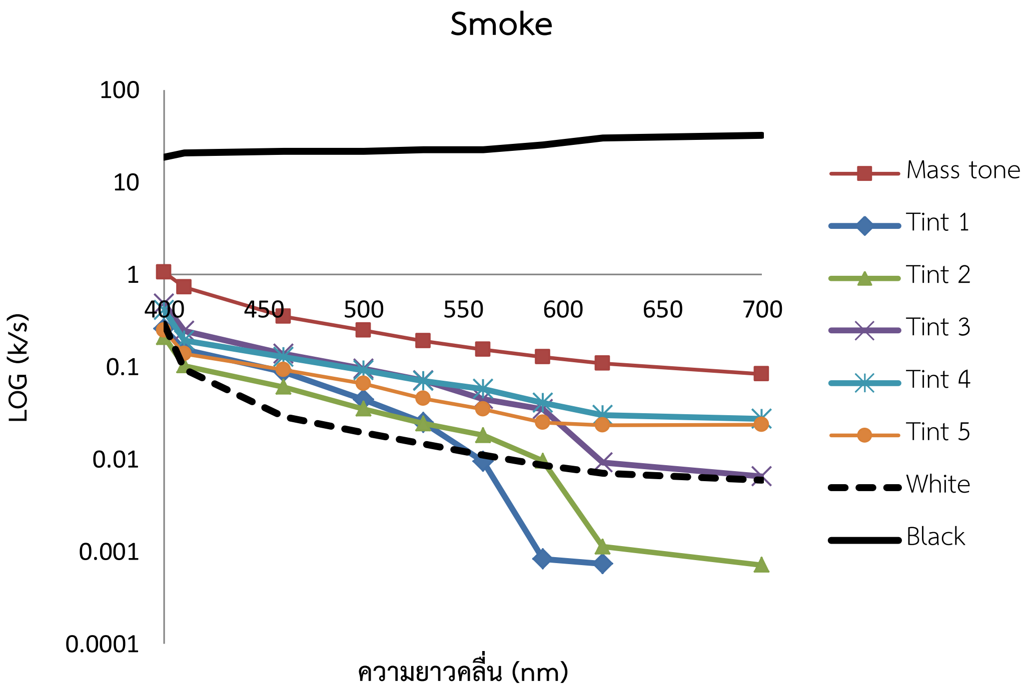
ภาพที่ ง.3 ค่า k/s ของสี Smoke ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ไม่ลดข้อมูล)



ภาพที่ ง.4 ค่า k/s ของสี Orange ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)



ภาพที่ ง.5 ค่า k/s ของสี Laurel Green ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)



ภาพที่ ง.6 ค่า k/s ของสี Smoke ในทุกกลุ่มฐานข้อมูล (ลดข้อมูล)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปัญญ์ชนก สานุสัน เกิดวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2534

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2549: สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ ภูเก็ต

พ.ศ.2552: สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชประชานุเคราะห์ ๓๖ จังหวัดภูเก็ต

พ.ศ.2556: สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2557: เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2554 ถึงปัจจุบัน รับงานสอนพิเศษนอกเวลาวิชาคณิตศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University