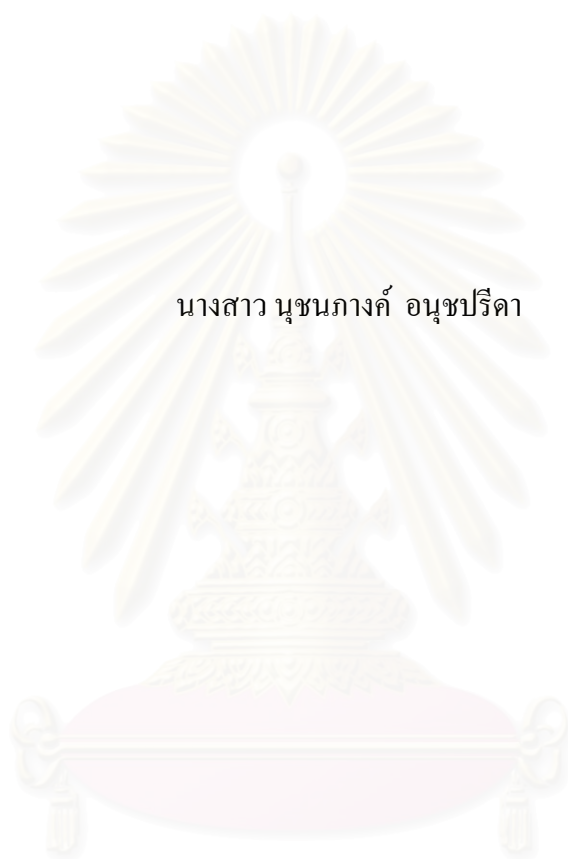


การวิเคราะห์สปีพอร์ซเลนด้วยระบบดิจิทัล



นางสาว นุชนางค์ อนุชปรีดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

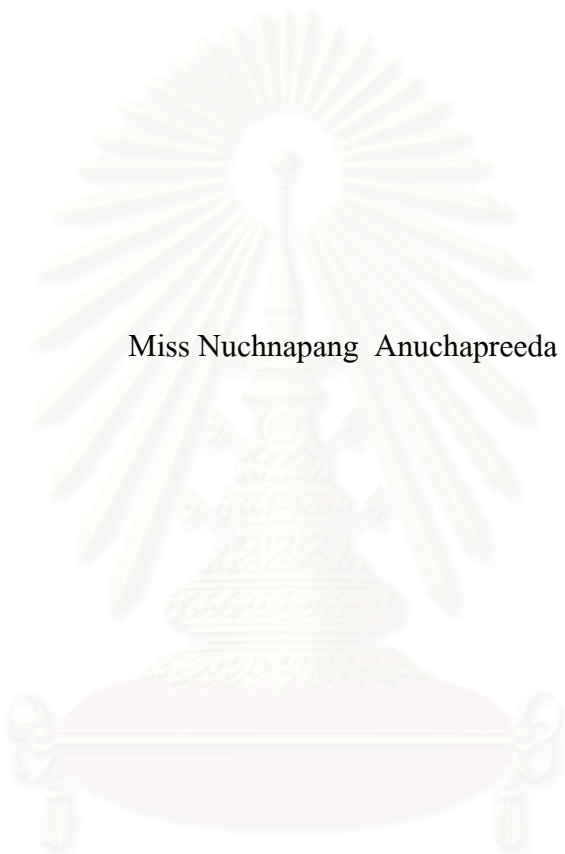
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2605-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PORCELAIN COLOR ANALYSIS BY DIGITAL SYSTEM



Miss Nuchnapang Anuchapreeda

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

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2605-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สี่พอร์ชเลนด้วยระบบคิจิคอล

โดย

นางสาวนุชนางค์ อนุชปรีดา

สาขาวิชา

ทันตกรรมประดิษฐ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

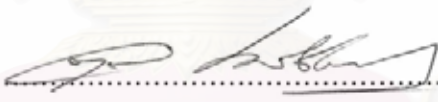
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตระกูล เมฆนุรักษ์ชานนท์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ชุตินา ภูศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตระกูล เมฆนุรักษ์ชานนท์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดอกเตอร์ สุนทรา พันธุ์มีเกียรติ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดอกเตอร์ วีระ เลิศจิราการ)

นุชนางค์ อนุชปรีดา : การวิเคราะห์สีสีฟอรัชเลนด้วยระบบดิจิทัล (PORCELAIN COLOR ANALYSIS BY DIGITAL SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ทพ. ตระกมล เมฆญาวิชชานานนท์, 108 หน้า. ISBN 974-53-2605-4.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษามลของโหมดสีระหว่าง RGB และ L*a*b* รวมถึงผลของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่าง ต่อความถูกต้องของการกำหนดสีฟอรัชเลน โดยขึ้นรูปชิ้นฟอรัชเลนเนื้อฟันด้วยเฟลสปาดิกฟอรัชเลน Vita VMK 95[®] สี A1, A2, A3, A3.5, A4, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D2, D3, D4 เป็นแผ่นกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. ทหนา 1 ± 0.05 มม. ถ่ายภาพภายใต้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Vita-Lite[®] ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ด้วยกล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Nikon Coolpix 4500 ที่ระยะห่างระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่าง 10 และ 20 ซม. มุม 90, 60, และ 45 องศา ตามลำดับ สีละ 5 ภาพ จัดเก็บภาพในรูปแบบไฟล์ JPEG นำภาพถ่ายมาอ่านค่าสีในโหมด RGB และ L*a*b* ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 ข้อมูลที่ได้ นำเสนอด้วยสถิติเชิงพรรณนาแบบแจกแจงความถี่ และเปรียบเทียบจำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีฟอรัชเลนด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ L*a*b* ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วน McNemar ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha < 0.05$) รวมทั้งเปรียบเทียบจำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีฟอรัชเลน ณ ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วน Chi-Square ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha < 0.05$) ผลการทดสอบพบว่า จำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเจดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด RGB เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ ที่ระยะ 10 ซม. 90 องศา (75 ภาพ: ร้อยละ 93.75), 20 ซม. 45 องศา (73 ภาพ : ร้อยละ 91.25), 10 ซม. 60 องศา (71 ภาพ : ร้อยละ 88.75), 20 ซม. 90 องศา (70 ภาพ : ร้อยละ 87.5), 10 ซม. 45 องศา (68 ภาพ : ร้อยละ 85), 20 ซม. 60 องศา (66 ภาพ : ร้อยละ 82.5) โดยพบว่าค่า B เป็นค่าที่ทำให้มีการกำหนดเจดสีถูกต้องมากที่สุด สำหรับจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเจดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด L*a*b* เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ ระยะ 10 ซม. 90 องศา (61 ภาพ : ร้อยละ 76.25), 20 ซม. 90 องศา (57 ภาพ : ร้อยละ 71.25), 20 ซม. 45 องศา (53 ภาพ : ร้อยละ 66.25), 10 ซม. 45 องศา (44 ภาพ : ร้อยละ 55), 20 ซม. 60 องศา (38 ภาพ : ร้อยละ 47.5) และ 10 ซม. 60 องศา (34 ภาพ : ร้อยละ 42.5)

สรุป จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีฟอรัชเลน ด้วยค่าสีในโหมด RGB มากกว่าโหมด L*a*b* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ความแตกต่างของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องกับชิ้นตัวอย่างไม่มีผลต่อการกำหนดสีฟอรัชเลนเมื่อใช้โหมด RGB อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับโหมด L*a*b* ระยะห่างระหว่างกล้องกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการกำหนดเจดสีเช่นกัน แต่มุมที่ใช้ถ่ายมีผลต่อการกำหนดสีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุมกล้อง 90 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องมากกว่ามุม 45 และ 60 องศา (ทั้งนี้ที่มุม 45 และ 60 องศา ไม่มีความแตกต่างกัน) สำหรับระยะห่าง 20 ซม. ที่มุม 90 องศา และ 45 องศา ให้จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน และดีกว่ามุม 60 องศา อย่างมีนัยสำคัญ ที่ $p < 0.05$

ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่อนิสิต.....นางนุชนางค์ อนุชปรีดา.....

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2548.....

4676109032 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: COLOR / DIGITAL / ANALYSIS

NUCHNAPANG ANUCHAPREEDA : PORCELAIN COLOR ANALYSIS BY DIGITAL SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TRAKOL MEKAYARAJJANANONTH, D.D.S., 108 pp. ISBN: 974-53-2605-4.

The purpose of this study is to compare the number of the perfect porcelain shade matching when applying RGB and L*a*b*, as well as the changes in the distance and the size of angle of the digital camera and the disk samples. Dentin porcelain disks were fabricated from Feldspathic porcelain [Vita VMK95[®]] in shades A1, A2, A3, A3.5, A4, B1,B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D2, D3, D4 with the diameter of 15 mm and 1 ± 0.05 mm. in thickness. All porcelain disks were shoot in four 20 watt-fluorescent light bulb. [Vita-lite, Duro-Test[®]] using a digital camera [Nikon Coolpix 4500]. Establishing the distance between the disks and the digital camera at 10 cm and 20 cm at 90, 60 and 45 degree consecutively, each disk was being taken five shot in each condition and save in JPEG files format. Color analysis of each photograph was performed using the Adobe Photoshop CS2 graphic program. Luminosity, a, b and red, green, blue [L*a*b* and RGB] values of each shade disk were measured. The data were presented through the Frequencies Descriptive Analysis and the accuracy of the porcelain color determination using RGB and L*a*b* color model were analyzed by statistical analysis using McNemar test with Confidence Level at 95% ($\alpha < 0.05$). The accuracy of the porcelain color determination at the distance and the angle between the digital camera and the disk samples at different size, using Chi-Square test with Confidence Level at 95% ($\alpha < 0.05$). The result reveals that the number of the right shade matching when considered the value of RGB, accordingly i.e. 10 cm 90 degree [75 pics ; 93.75%], 20 cm 45 degree [73 pics ; 91.25%], 10 cm 60 degree [71 pics ; 88.75%], 20 cm 90 degree [70 pics ; 87.5 %], 10 cm. 45 degree [68 pics ; 85 %], 20 cm 60 degree [66 pics ; 82.5%]. Moreover, the value of B reflects the most shade matching value. For the number of the right shade matching when considered the value of L*a*b*, accordingly i.e. 10 cm 90 degree [61 pics ; 76.25%], 20cm 90 degree [57 pics ; 71.25%], 20 cm 45 degree [53 pics ; 66.25%], 10 cm 45 degree [44 pics ; 55%], 20 cm 60 degree [38 pics ; 47.5%], 10 cm 60 degree [34 pics ; 42.5%]. The conclusion is that the number of the perfect porcelain shade matching when applying RGB is more than that applying L*a*b* at the significant level ($p < 0.05$). It is not significantly reflect the different of distance and the size of angle between the camera and the disks to the porcelain color determination when applying RGB, however when applying L*a*b*, the distance between the camera and the disks reveals no effect, while the different in the angle applied has the significant level ($p < 0.05$). At the distance of 10 cm and 90 degree reveals more significant value when compared to those applied 45 and 60 degree (none significant result was shown between them). Therefore, the result of the photos taken at 20 cm 90 degree and 20 cm 45 degree revealed no different in the number of right shade matching, which is more than that applying a 60 degree at the significant level at $p < 0.05$.

Department of Prosthodontics.....Student's signature *นุชนพางค์ อุษงประณีต*
 Field of study Prosthodontics.....Advisor's signature *T. Mekay...*
 Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ ถ้าปราศจากความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตระกล เมฆญารัชชานานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ทำให้การดำเนินการในขั้นตอนต่าง ๆ มีความสะดวกราบรื่น จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าให้ความรู้และคำปรึกษาทางด้านสถิติในการวิจัย มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัทบุญชู-อารียา ที่ได้ผลิตชิ้นตัวอย่างพอร์ชเลน และคุณฉันทสิทธิ์ จำเนียร ที่ช่วยประสานงานกับ บริษัท Duro-Test[®] Lighting, Inc., Philadelphia, USA ในการจัดส่งหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Vita-Lite[®] เพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ กมล อนุชปรีดา ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องวัดความส่องสว่างของแสง (Digital Lux Meter) Model LX-50 รวมถึงให้คำแนะนำทำให้การทดลองดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลใกล้ชิดทุกท่านที่ได้เสียสละกำลังกาย กำลังใจ ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา รวมถึงคณะกรรมการทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
สมมุติฐานการวิจัย.....	5
สมมุติฐานทางสถิติ.....	5
ตัวแปร.....	6
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
รูปแบบการวิจัย.....	6
ข้อจำกัดการศึกษา.....	6
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
สี.....	7
การมองเห็นสีของมนุษย์.....	7
แสงและแหล่งกำเนิดแสง.....	8
แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ.....	8
แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์.....	9
วัตถุ.....	12
ระบบการวัดสี.....	16
ระบบมันเชลล์.....	17
ระบบ CIE.....	18
วิธีประเมินสีพื้น.....	21
การกำหนดสีด้วยตา.....	21

	หน้า
การวิเคราะห์สีด้วยเครื่องมือ.....	22
กล้องดิจิทัล.....	24
การทำงานของกล้อง.....	25
แสงกับการถ่ายภาพ.....	29
โมเดลสี.....	30
RGB.....	31
CMYK.....	31
CIE L*a*b*.....	32
HSB.....	32
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	36
วัตถุประสงค์.....	36
การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน.....	37
ส่วนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น.....	40
การเลือกโปรแกรมเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดสี.....	40
การหาเกณฑ์ในการกำหนดสีพอร์ชเลน.....	41
ส่วนที่ 2 การทดลองกำหนดเฉดสีจากภาพถ่ายพอร์ชเลน.....	44
การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4. ผลการศึกษา.....	47
ผลการเลือกโปรแกรมเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดสี.....	47
ผลการหาเกณฑ์ในการกำหนดสีพอร์ชเลน.....	49
ผลการทดลองกำหนดเฉดสีจากภาพถ่ายพอร์ชเลน.....	72
5. อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย.....	91
สรุปผลการวิจัย.....	97
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1	12
ตารางที่ 2	40
ตารางที่ 3	44
ตารางที่ 4	47
ตารางที่ 5	48
ตารางที่ 6	48
ตารางที่ 7	48
ตารางที่ 8	49
ตารางที่ 9	49
ตารางที่ 10	50
ตารางที่ 11	53
ตารางที่ 12	64
ตารางที่ 13	68
ตารางที่ 14	72
ตารางที่ 15	73
ตารางที่ 16	74
ตารางที่ 17	75

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 18	
แสดงสถิติทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสี พอร์ชเลนเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี RGB ที่ระยะห่างและมุมระหว่างกล้อง ดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างต่าง ๆ กัน.....	76
ตารางที่ 19	
แสดงสถิติทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสี พอร์ชเลนเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี L*a*b* ที่ระยะห่างและมุมระหว่างกล้อง ดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างต่าง ๆ กัน.....	77
ตารางที่ 20	
แสดงการจับคู่ทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องใน การกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมดสี L*a*b* ในแต่ละสภาวะ.....	78
ตารางที่ 21	
เปรียบเทียบความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมดL*a*b*.....	80



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1 แสดงการสะท้อนของแสง.....	15
รูปที่ 2 แสดงการจัดเรียงตัวของสีในระบบมันเซลล์.....	19
รูปที่ 3 แสดงการจัดเรียงตัวของสีในระบบซีไออี.....	19
รูปที่ 4 แสดงการผสมสีแบบบวก.....	31
รูปที่ 5 แสดงการผสมสีแบบลบ.....	32
รูปที่ 6 แสดงชิ้นตัวอย่าง.....	37
รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งวัดความหนาของชิ้นตัวอย่างทั้งสี่ตำแหน่ง.....	37
รูปที่ 8 แสดงแบบโลหะสำหรับเตรียมชิ้นงาน.....	38
รูปที่ 9 แสดงแบบช่วยยึดชิ้นตัวอย่างขณะขัด.....	38
รูปที่ 10 แสดงเครื่องวัดขนาดแบบละเอียดด้วยระบบดิจิทัล.....	38
รูปที่ 11 แสดงเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่เหนือเสียง.....	39
รูปที่ 12 แสดงเครื่องวัดความส่องสว่างของแสง.....	39
รูปที่ 13 แสดงวงกลมสี.....	40
รูปที่ 14 แสดงการจัดตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ.....	41
รูปที่ 15 แสดงขอบเขตพื้นที่และตำแหน่งอ่านค่าสีในโปรแกรม Adobe Photoshop	42
รูปที่ 16 ภาพแสดงขอบเขตพื้นที่และตำแหน่งอ่านค่าสี.....	42
รูปที่ 17 แสดงกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Nikon Coolpix 4500.....	46
รูปที่ 18 แสดงขาตั้งกล้อง.....	46
รูปที่ 19 19.1 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 10 ซม. 90 องศา.....	57
19.2 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 10 ซม. 60 องศา.....	57
19.3 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 10 ซม. 45 องศา.....	58
19.4 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 20 ซม. 90 องศา.....	58
19.5 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 20 ซม. 60 องศา.....	59

ภาพประกอบ	หน้า
19.6 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า R G และ B แบบช่วง ที่ 20 ซม. 60 องศา.....	59
รูปที่ 20 20.1 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 90 องศา.....	60
20.2 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 60 องศา.....	60
20.3 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 45 องศา.....	61
20.4 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 90 องศา.....	61
20.5 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 60 องศา.....	62
20.6 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่า L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 45 องศา.....	62
รูปที่ 21 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด RGB ที่ระยะห่าง 10 และ 20 ซม. มุม 90, 60 และ 45 องศา.....	72
รูปที่ 22 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด L*a*b* ที่ระยะห่าง 10 และ 20 ซม. มุม 90, 60 และ 45 องศา.....	73
รูปที่ 23 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 90 องศา.....	81
รูปที่ 24 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา.....	81
รูปที่ 25 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา.....	82
รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม. 45 องศา.....	82

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม.90 องศา.....	83
รูปที่ 28 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม.60 องศา.....	83
รูปที่ 29 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.90 องศา.....	84
รูปที่ 30 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.45 องศา.....	85
รูปที่ 31 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.60 องศา.....	85
รูปที่ 32 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม.90 องศา.....	86
รูปที่ 33 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม.45 องศา.....	86
รูปที่ 34 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้องจำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม.60 องศา.....	87
รูปที่ 35 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากค่า RGB แยกออกตามเฉดสี.....	88
รูปที่ 36 แผนภูมิแท่งแสดงจำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วกลายเป็นเฉดสีอื่นเมื่อพิจารณาโดยค่า RGB จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด.....	89
รูปที่ 37 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากค่า $L^*a^*b^*$ แยกออกตามเฉดสี.....	89
รูปที่ 38 แผนภูมิแท่งแสดงจำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วกลายเป็นเฉดสีอื่นเมื่อพิจารณาโดยค่า $L^*a^*b^*$ จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด.....	90

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป้าหมายสำคัญในการบูรณะฟันในทางทันตกรรม คือ เพื่อทดแทนส่วนโครงสร้างฟันที่ขาดหายไป ให้มีรูปร่าง ลักษณะสวยงาม และสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ[1] ในแง่ความสวยงามนั้นวัสดุบูรณะฟันที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ พอร์ซเลน เนื่องจากมีความโปร่งแสง สามารถเลียนแบบสีและลักษณะฟันผิวได้ใกล้เคียงฟันธรรมชาติ[2]นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรง ทนต่อการสึกกร่อน บิดเบี้ยว และเข้ากับเนื้อเยื่อในช่องปากได้ดี ในทางทันตกรรมใช้ประโยชน์จากพอร์ซเลนหลายอย่างในการทำครอบและสะพานฟัน อินเลย์ ออนเลย์ อาจนำมาเคลือบบนโลหะ (porcelain fused to metal) หรือทำในลักษณะเซรามิกล้วน (All ceramic) ไม่ว่าจะทำการบูรณะแบบใดพบว่าสีเป็นตัวแปรที่มีความผิดพลาดและพบได้บ่อยที่สุด ส่งผลต่อความสวยงามและความพึงพอใจของผู้ป่วยที่มีต่อสิ่งบูรณะได้[1] ดังนั้นการเลือกสีของสิ่งบูรณะให้เข้ากับฟันที่เหลืออยู่ในช่องปากนั้นมีความสำคัญ โดยวิธีการเลือกสีฟันที่น่าเชื่อถือมีส่วนช่วยให้ทันตแพทย์ได้สีที่ใกล้เคียงสีฟันมากยิ่งขึ้น ซึ่งวิธีในการประเมินสีฟันนั้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกำหนดสีด้วยตา (visual color determination) และการวิเคราะห์สีด้วยเครื่องมือ (instrumental color analysis)

การกำหนดสีด้วยตา เป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางทันตกรรม โดยการเปรียบเทียบสีฟันกับสีมาตรฐานซึ่งก็คือชุดเทียบสีฟันปลอม (shade guide) ที่ถูกผลิตขึ้นมาในแต่ละบริษัทโดยเทียบสีให้ตรงกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ขาดความน่าเชื่อถือ และความแน่นอน[3] เนื่องจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้[3,4 ,5] เช่น อายุ อารมณ์ของผู้สังเกต ความอ่อนล้าของสายตา สภาพแสงขณะนั้น สภาพแสงที่ตาสัมผัสก่อนหน้านี้ (previous eye exposure) ตำแหน่งวัตถุ ตำแหน่งแสง (object and illuminant position) และภาวะเมตาเมอริซึม (metamerism)

เมตาเมอริซึม[6] เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุที่มีสีเหมือนกันในสภาวะหนึ่ง แต่มีสีต่างกันเมื่ออยู่อีกสภาวะหนึ่ง ในทางปฏิบัติกล่าวคือแถบสีที่เราเลือกในห้องทันตกรรมแม้ว่าดูด้วยสายตาว่าสีตรงกับฟันในช่องปากแล้ว แต่เมื่อนำมาเทียบกับแสงแดด (day light) พบว่า สีที่เลือกนั้นไม่เหมือนกัน มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการศึกษถึงความสัมพันธ์ระหว่างสีกับแสง Saleski[7] ได้กล่าวถึงขบวนการรับรู้สีนั้นต้องประกอบไปด้วย 3 ตัวแปรคือ ผู้สังเกต วัตถุ และแหล่งกำเนิดแสง แหล่งกำเนิดแสงนับว่ามีความสำคัญอย่างมาก สังเกตได้ว่าในหลายศตวรรษที่

ผ่านมาพวกศิลปินใช้แสงแดดทางทิศเหนือ (northern daylight) แยกความแตกต่างของสี จนมาในปัจจุบันพบว่าแสงแดดตามธรรมชาติเป็นแหล่งกำเนิดแสงในอุดมคติ (ideal light source) ที่ช่วยให้การอ่านสีถูกต้องตรงตามความเป็นจริงมากที่สุด แต่เราไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแสงแดดในการอ่านสีได้ทุกเวลา เนื่องจากแสงแดดที่เราเห็นอยู่นี้เกิดจากแสงอาทิตย์ที่กระจายตัวออกขณะผ่านชั้นบรรยากาศ ทำให้ในช่วงเช้าและเย็นเห็นเป็นแสงสีแดง มีเพียงช่วงสายและบ่ายเท่านั้นที่แสงกระจายออกลดความเป็นสีฟ้าของท้องฟ้าลง จึงเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเลือกสี แสงแดดในแต่ละช่วงเวลามีสีแตกต่างกันนั้น หากนำเครื่องมือวัดอุณหภูมิสี (color temperature) มาวัด จะได้ค่าออกมาเป็นตัวเลขซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลานั้นมีอุณหภูมิสีที่ต่างกัน โดยพบว่าอุณหภูมิสีของแสงจากดวงอาทิตย์ที่ 5500 K จะทำให้อ่านค่าสีถูกต้องแม่นยำที่สุด[8]

นอกจากนี้การประเมินสีในแต่ละบุคคลยังมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากแต่ละตำแหน่งบนตัวพื้นมีความหลากหลายของสี มีความโปร่งแสง โครงสร้าง และความมัน (gloss) แตกต่างกัน จึงเกิดความลำบากต่อสายตาที่ต้องมองในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนตัวพื้นขณะเทียบสี[9] ในขณะที่ชุดเทียบสีพื้นปลอมซึ่งแต่ละบริษัทผลิตออกมาเพื่อเป็นสีมาตรฐานนั้นก็ไม่มีครอบคลุมสีพื้น แม้แต่ชุดเทียบสีพื้นซึ่งผลิตจากบริษัทเดียวกันก็มีความหลากหลายของสีได้[3]

ต่อมาได้มีการคิดค้นเครื่องมือขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการเทียบสีด้วยตา เรียกวินิจฉัยการวิเคราะห์สีด้วยเครื่องมือ นับว่าเป็นวิธีที่ประเมินสีได้ค่อนข้างแม่นยำ รวดเร็ว สามารถอ่านค่าซ้ำได้ ที่รู้จักกันโดยทั่วไป คือ คัลเลอร์มิเตอร์ (Colorimeter) และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) โดยวัดค่าออกมาในรูปของ CIELAB UNITS ($L^*a^*b^*$) ค่าที่ได้นำมาคำนวณหาความแตกต่างของสี (ΔE)

ระบบ CIELAB นั้นเป็นระบบการวัดสีที่สำคัญระบบหนึ่ง ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้การประเมินสีมีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากระบบจะทำการวัดสีออกมาเป็นตัวเลขจึงไม่ต้องอาศัยสายตาและความคิดมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้อง ช่วยลดปัญหาความเห็นที่ไม่ตรงกันในแต่ละบุคคลลงได้

สำหรับคัลเลอร์มิเตอร์และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์นั้น ได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยอย่างมากมาย Russell และคณะ[6] ได้ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Monolight spectrophotometer) ศึกษาการเปลี่ยนสีพื้นธรรมชาติในสภาวะก่อน-หลัง ใสแผ่นยางกั้นน้ำลายและก่อน-หลัง พิมพ์ปากด้วยวัสดุพิมพ์ปากโพลีไวนิลซิลอกเซน (polyvinylsiloxane) Seghi, Johnson และ O' Brien[1] พบว่า คัลเลอร์มิเตอร์สามารถวัดสีได้อย่างแม่นยำ แต่ระดับของความแม่นยำในการวัดสีขึ้นอยู่กับเครื่องที่ใช้ ชนิดของผิววัสดุที่ใช้วัดและขึ้นกับความโปร่งแสง

ของพอร์ซเลน Okubo และคณะ[3] เปรียบเทียบความสามารถในการจับคูสีระหว่างคัลเลอร์มิเตอร์กับสายตามนุษย์ พบว่า คัลเลอร์มิเตอร์มีความสามารถในการจับคูสีได้ถูกต้อง 50 % ขณะที่การจับคูสีด้วยตา มีความถูกต้อง 48 % นั่นคือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง 2 วิธี เขาจึงคิดว่าคัลเลอร์มิเตอร์ไม่น่ามีความเหมาะสมในการวัดสีวัตถุที่มีความซับซ้อนและโปร่งแสง Van der Burgt และคณะ[10] พบว่า ผลที่ได้จากคัลเลอร์มิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (illuminating light) ที่ปล่อยออกมาเมื่อกระทบวัตถุจะเกิดการกระเจิง (scatter) และดูดกลืน (absorbed) บางส่วนอาจทะลุผ่าน (transmitted) ออกไป บางส่วนแสงกระเจิงอยู่ในวัตถุและสะท้อน (reflect) ออกไปยังทิศทางข้าง ๆ เนื่องจากความโปร่งแสงของฟันและพอร์ซเลน เครื่องมือวัดแสงมักมีช่องขนาดเล็กสำหรับเป็นทางผ่านของแสงที่ออกมาและแสงที่สะท้อนกลับเข้าไป การที่แสงสะท้อนออกไปยังด้านข้างทำให้เกิดภาวะสูญเสียขอบ (edge loss) ได้ เนื่องจากปริมาณแสงที่สะท้อนกลับเข้าสู่ช่องรับแสงจริง ๆ มีน้อยลง ค่าที่อ่านได้จึงมีความผิดพลาด[9] Haywood และคณะ[11] เชื่อว่าคัลเลอร์มิเตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับวัตถุที่มีผิวราบ มากกว่าวัตถุที่มีผิวโค้งและโปร่งแสงที่พบในฟันทั่วไป Seghi[12] พบว่าคัลเลอร์มิเตอร์สามารถอ่านสีซ้ำในวัตถุที่มีความทึบแสง (opaque surface) ดีกว่าวัตถุที่โปร่งแสง (translucent surface)

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่ายังมีข้อจำกัดในการอ่านสีของเครื่องมือประกอบกับเครื่องมือมีราคาสูงจึงทำให้ไม่ได้รับความแพร่หลายในคลินิกทันตกรรมเท่าไรนัก[13]

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีต่าง ๆ ได้พัฒนาไปมาก คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันทุกสาขา อาชีพ โปรแกรมซอฟต์แวร์ได้ถูกคิดค้นพัฒนาออกมามากมาย กล้องดิจิทัลกลายเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้งานง่าย ถ่ายภาพได้ในปริมาณมาก ๆ เมื่อเทียบกับกล้องฟิล์ม สามารถเปิดดูภาพที่ถ่ายได้ทันที สะดวกในการจัดเก็บภาพเป็นไฟล์และสามารถโอนข้อมูลจากตัวกล้องไปสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ได้ทันที หรือจะอัดออกมาเป็นภาพ ก็ได้ความสวยงามไม่แพ้กล้องฟิล์ม ในทางทันตกรรมได้นำกล้องดิจิทัลมาใช้ถ่ายภาพในช่องปากเพื่อประโยชน์ในการวางแผนการรักษา แสดงภาพออกสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์ เพื่ออธิบายแก่คนไข้ จัดเก็บภาพขั้นตอนการรักษาเป็นไฟล์ภาพ ซึ่งสามารถนำกลับมาดูใหม่และประเมินผลย้อนหลังได้ เนื่องจากกล้องดิจิทัลเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาใช้วัดสีโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุ[14] (non-contact color measuring devices) ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการเทียบสีวัตถุต่าง ๆ

การทำงานของกล้องดิจิทัลนั้นคล้ายคลึงกับหลักการมองเห็นของตา คือ แสงตกกระทบที่วัตถุแล้วสะท้อนเข้ามายังเลนส์ของกล้องดิจิทัล ผ่านขบวนการแปลงสัญญาณแสง

ประมวลผลออกมาเป็นข้อมูลภาพ เนื่องจากกล้องดิจิทัลเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งช่วยกำจัดปัจจัยรบกวนต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการอ่านสี อย่างไรก็ตามตำแหน่งกล้อง ตำแหน่งวัตถุ และสภาวะแสง มีผลทำให้สีของวัตถุบิดเบือนได้ จากการศึกษาของ Culpepper[15] พบว่าขณะถ่ายภาพไม่ควรวางกล้องตั้งฉาก แต่ควรทำมุมกับชุดเทียบสีพื้นปลอมเพื่อลดแสงสะท้อนจากไฟแฟลช และเพื่อลดปริมาณแสงสะท้อนให้น้อยที่สุด หน้ากล้องควรเอียงทำมุมกับระนาบตั้งฉากกับวัตถุในแนวขึ้นบนหรือลงล่างมากกว่า 30 องศา และใช้กระดาษสีเทากลางซึ่งให้ค่าการสะท้อนแสง 18 % เป็นพื้นหลัง Fondriest[16] กล่าวว่า ภาพถ่ายที่ดีที่สุด คือภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องชนิดสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (single-lens reflex-SLR) ขนาด 35 มม. โดยใช้ฟิล์มสไลด์ หรือ กล้องดิจิทัลชนิดสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวโดยใช้เลนส์ถ่ายภาพชนิดใกล้ซึ่งมีทางยาวโฟกัสขนาด 90-115 มม. สำหรับชนิดของไฟแฟลชนั้น อาจใช้ dual-point flash หรือแฟลชแบบวงแหวน (ring flash) ก็ได้

Dancy และคณะ[17] เปรียบเทียบวิธีการเลือกสีพื้น 2 วิธีระหว่างวิธีการถ่ายภาพพื้นกับวิธีวัดสีด้วยตา แล้วนำข้อมูลที่ได้ส่งให้แล็บ เพื่อทำครอบพื้นโลหะเคลือบพอร์ซเลน พบว่าจากการเลือกสีทั้งสองวิธีนั้น ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การเลือกสีด้วยการถ่ายภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าเชื่อถือสำหรับผู้ที่ไม่ชำนาญหรือไม่มั่นใจในการเลือกสี

Call และคณะ[4] ประเมินสีระหว่างชุดเทียบสีพื้นปลอมที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันว่ามีความน่าเชื่อถือหรือไม่โดยนำไปโปรแกรม Adobe Photoshop version 4.0 วิเคราะห์สีจากภาพถ่ายโดยดูจากค่า L และ RGB พบว่า สามารถใช้โปรแกรม Photoshop ในการวิเคราะห์สีได้ แต่ขาดความแม่นยำ (accuracy) ของสีระหว่างชุดเทียบสีพื้นปลอม แม้ว่าจะผลิตออกมาจากบริษัทเดียวกันก็ตาม

Bentley และคณะ[13] ประเมินการเปลี่ยนสีพื้น ภายหลังจากการฟอกสี จากการทดลองพบว่าโปรแกรม Photoshop สามารถใช้ศึกษาการเปลี่ยนของสีได้โดยการเชื่อมโยงภาพเข้าสู่หน้าจอคอมพิวเตอร์

สำหรับโปรแกรม Photoshop นั้น นอกจากจะใช้ประเมินการเปลี่ยนสีในพื้นธรรมชาติและพอร์ซเลนแล้ว ยังสามารถใช้ประเมินสีของวัสดุประเภทอื่นได้อีกด้วย โดย Villar และคณะ[18] ใช้โปรแกรมดังกล่าว เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุพื้นฐานพื้นปลอมแบบอ่อนนุ่ม (soft liner) จากภาพที่ถูกรับที่ด้วยกล้องถ่ายภาพแบบวิดีโอ (model MTI-3)

ในขณะที่กล้องดิจิทัลกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย การนำกล้องมาใช้ถ่ายภาพพื้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการเทียบสีมีมากขึ้น เทคนิคในการถ่ายภาพที่ดีจะช่วยให้การเลือกสีพื้นมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและประเมิน

เทคนิคการนำกล้องดิจิทัลออกมาใช้ประโยชน์ในการถ่ายภาพเพื่อเลือกสีพอร์ชเลนบริเวณพื้นหน้า โดยการถ่ายภาพขึ้นตัวอย่างซึ่งทำมาจากเฟลสปาติคพอร์ชเลน (Vtia VMK 95[®]) ส่วนพอร์ชเลน เนื้อพื้น ที่มีความหนาประมาณ 1 ± 0.05 มม. ในสภาวะที่ต่างกันได้แก่ ระยะห่างระหว่างกล้องกับ ขึ้นตัวอย่าง , มุมที่ใช้ในการถ่ายภาพ นำภาพที่ได้มาอ่านค่าสีในโหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ ด้วย โปรแกรมซอฟต์แวร์ และเปรียบเทียบสีของขึ้นตัวอย่าง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$
2. เพื่อศึกษาผลของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับขึ้นตัวอย่างต่อความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน

สมมุติฐานการวิจัย

1. ความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ ไม่แตกต่างกัน
2. ผลของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับขึ้นตัวอย่างต่อความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน ไม่แตกต่างกัน

สมมุติฐานทางสถิติ

1. ผลของโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$

H_0 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ผลของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับขึ้นตัวอย่าง

ก. เมื่อใช้สีในโหมด RGB

H_0 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน ณ ระยะห่างและมุมระหว่าง กล้องดิจิทัลกับขึ้นตัวอย่างที่ต่างกัน เมื่อใช้สีในโหมด RGB ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน ณ ระยะห่างและมุมระหว่าง กล้องดิจิทัลกับขึ้นตัวอย่างที่ต่างกัน เมื่อใช้สีในโหมด RGB แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ข. เมื่อใช้สีในโหมด L*a*b*

H_0 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน ณ ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน เมื่อใช้สีในโหมด L*a*b* ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1 : จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน ณ ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน เมื่อใช้สีในโหมด L*a*b* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05

ตัวแปร

ตัวแปรอิสระ คือ ระยะห่างระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่าง, มุมในการถ่ายภาพ

ตัวแปรตาม คือ ค่า RGB และ L*a*b*

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นพื้นฐานในงานวิจัยเพื่อเทียบสีสิ่งบูรณะให้เข้ากับสีฟันในช่องปากของผู้ป่วยโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยดิจิทัลขั้นต่อไป

รูปแบบการวิจัย

เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research)

ข้อจำกัดการศึกษา

กล้องดิจิทัลแต่ละยี่ห้อ แต่ละรุ่น ที่บริษัทผลิตออกมาจะมีคุณสมบัติ การใช้งาน ส่วนประกอบ และอุปกรณ์เสริมที่เพิ่มขึ้นมาเฉพาะ แตกต่างกันไป แต่โดยพื้นฐานการทำงานแล้ว มีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงให้กล้องดิจิทัล Nikon Coolpix 4500 ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นตัวแทนกล้องดิจิทัลอื่น ๆ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาสำคัญที่พบได้บ่อยในการบูรณะฟันแบบติดแน่น คือ สีของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งพอร์ซเลนไม่เข้ากับสีฟันที่มีอยู่ในช่องปากผู้ป่วย[19] การที่สีของบูรณะจะมีความสวยงามได้นั้น นอกจาก รูปทรง รูปแบบพื้นผิว และความโปร่งแสงแล้ว[1] สีจัดได้ว่าเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้ป่วยที่มีต่อชิ้นงานได้ ดังนั้น การเลือกสีของสิ่งบูรณะให้เข้ากับฟันที่เหลืออยู่ในช่องปากจึงมีความสำคัญ โดยวิธีการเลือกสีฟันที่น่าเชื่อถือมีส่วนช่วยให้ทันตแพทย์ได้สีที่ใกล้เคียงสีฟันมากยิ่งขึ้น

สี (Color) [20]

สีที่เราเห็นจากวัตถุโดยทั่วไปเกิดจากแสงสะท้อนจากวัตถุเข้าสู่ดวงตา กระตุ้นเซลล์ประสาทภายในเรตินาให้ส่งสัญญาณไปยังเนื้อสมองส่วนที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น (visual cortex) ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกประมวลผล เกิดการรับรู้เป็นสีต่าง ๆ

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงปกติที่เราเห็นเป็นสีขาว เมื่อผ่านปริซึมออกมาพบว่า แสงขาวที่เห็นนั้น ความจริงแล้วประกอบไปด้วยแถบแสงที่แตกต่างกันมีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 380-780 นาโนเมตร สีของวัตถุจะเป็นเช่นไรขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ และความสามารถของวัตถุในการดูดกลืน และสะท้อนแสงในบางแถบสีออกมา ทำให้เราเห็นวัตถุเป็นสีนั้น หากปราศจากแสง เช่น ในห้องมืด เราจะไม่มีวันทราบได้เลยว่าวัตถุนั้นมีสีใด จะเห็นว่าสีกับแสงมีความสัมพันธ์กัน จนมีคำกล่าวที่ว่า “สี คือ แสง”

การมองเห็นสีของมนุษย์[21]

การรับรู้สีของมนุษย์ เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ แหล่งกำเนิดแสงวัตถุ มีสี (color object) และผู้สังเกตการณ์ (observer) เมื่อแสงตกกระทบวัตถุเข้าสู่ดวงตาจะผ่านกระจกตา (cornea) และเลนส์ ซึ่งทำหน้าที่โฟกัสแสงให้ตกลงบนเรตินา ปริมาณแสงที่ผ่านเข้ามาในดวงตาจะถูกควบคุมโดยม่านตา (iris) ซึ่งจะทำหน้าที่หดหรือขยาย ขึ้นกับปริมาณแสง

เรตินาประกอบไปด้วยเซลล์รับแสง 2 ชนิด คือ เซลล์รับแสงรูปแท่ง (rods) และ เซลล์รับแสงรูปโคน (cones) เซลล์รับแสงรูปแท่งมีปริมาณมากกว่าเซลล์รับแสงรูปโคนประมาณ 19 เท่า

อยู่กระจายทั่วๆ ไปบนเรตินา มีความไวต่อแสง โดยตอบสนองต่อแสงสีเดียว (monochromatic) ที่ความเข้มต่ำ ขณะที่เซลล์รับแสงรูปโคนซึ่งตอบสนองต่อการมองเห็นในระดับแสงมากถึงปานกลาง พบรวมตัวกันอย่างหนาแน่นในบริเวณเล็กๆ ตรงกลางเรตินา ที่เรียกว่าโฟเวีย (fovea) เซลล์รับแสงรูปโคนนั้น ประกอบไปด้วยตัวรับความรู้สึก 3 ชนิด ซึ่งมีความไวแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันโดย “S” จะไวต่อแสงสีน้ำเงิน (ช่วงความยาวคลื่น ประมาณ 440 นาโนเมตร) “M” ไวต่อแสงสีเขียว (ความยาวคลื่นประมาณ 545 นาโนเมตร) “L” ไวต่อแสงสีแดง (ความยาวคลื่นประมาณ 585 นาโนเมตร) ซึ่งเซลล์รับแสงเหล่านี้จะแปลงแสงเป็นสัญญาณประสาทส่งเข้าสู่สมอง ประมวลผลออกมาทำให้เกิดการรับรู้ต่อแสงสีแดง เขียว น้ำเงิน และสีที่เกิดจากการผสมกันของแสง ความแม่นยำในการรับรู้สีขึ้นกับตำแหน่งที่แสงตกบนเรตินา หากแสงมาก รูม่านตาจะแคบ ทิศทางของแสงจะตรงมายังโฟเวียที่มีเซลล์รับแสงรูปกรวยอยู่ โฟเวียเป็นตำแหน่งเดียวบนเรตินาที่ไม่มีเซลล์รับแสงรูปแท่งอยู่เลย เราจะพบเซลล์รับแสงทั้งสองชนิดได้บริเวณรอบๆ โฟเวีย ดังนั้นโฟเวียจึงเป็นตำแหน่งที่มีความไวต่อแสงสีและเป็นจุดโฟกัสของภาพ หากแสงน้อย รูม่านตาจะกว้าง แสงจะตกบนเรตินาเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ความแม่นยำในการรับสีน้อยลง การควบคุมขนาดของรูม่านตาและความเข้มแสงเป็นปัจจัยสำคัญส่งผลต่อการรับรู้สี

แสงและแหล่งกำเนิดแสง[21,22]

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งช่วงความยาวคลื่นที่สามารถกระตุ้นระบบการมองเห็นของมนุษย์ได้ มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 380-780 นาโนเมตร โดยในปี 1665 ไอแซค นิวตัน (Isaac Newton) พบว่า แสงอาทิตย์ (sunlight) ซึ่งมีลักษณะเป็นแสงขาวเมื่อเดินทางผ่านปริซึมจะกระจายออกเป็นแสงสีต่าง ๆ 6 สี คือ ม่วง (violet) น้ำเงิน (blue) เขียว (green) เหลือง (yellow) ส้ม (orange) แดง (red) ซึ่งเขาเรียกแสงสีต่าง ๆ นี้ว่า สเปกตรัม (spectrum) เมื่อให้แถบแสงเหล่านี้ผ่านปริซึมอีกครั้งจะได้เป็นแสงขาวเช่นเดิม เขาจึงสรุปว่า แสงที่เรามองเห็นเป็น สีขาวนี้แท้จริงแล้วประกอบไปด้วยแถบแสงดังกล่าวข้างต้น

เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดแสงได้เป็น 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ (natural light source) และแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ (artificial light sources)

1. แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ (natural light source) ดวงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติที่มนุษย์คุ้นเคยกันมากที่สุด โดยก่อนที่จะส่องผ่านมายังพื้นโลกจะเกิดการกระเจิงของแสง บางส่วนจะถูกดูดกลืนไปโดยชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เช่น ไอน้ำ และโอโซน

กลายเป็นแสงแดดส่องมายังพื้นโลก ซึ่งการกระจายของแถบพลังงาน (spectral energy distribution.SED) จะแตกต่างกันไปตามภูมิภาค ภูมิอากาศ ฤดูและช่วงเวลา การเปลี่ยนแปลงของแสงแดดจึงขึ้นอยู่กับการโคจรขึ้นลงของดวงอาทิตย์ ในองค์ประกอบย่อยของแสงแดดยังมีความแตกต่างกันในปริมาณแสงแต่ละความยาวคลื่นซึ่งการกระจายพลังงานเป็นแสงหลายสี (polychromatic light) มีตั้งแต่สีฟ้าอ่อนจนถึงสีเหลือง

2. แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ (artificial light sources) [23]

2.1 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence lamp) เป็นหลอดแก้วบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อยพวกอาร์กอน (argon) และไอปรอท เมื่อเปิดสวิตช์ไอปรอทจะแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงพลังงานแสงที่มองเห็นได้ (visible region) และรังสีอุลตราไวโอเล็ต (nonvisible ultraviolet ray) เมื่อมากระทบผนังฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบอยู่ผนังด้านในหลอด รังสีอุลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะถูกผนังฟลูออเรสเซนต์ดูดไว้และปล่อยพลังงานออกมาในช่วงพลังงานแสงที่มองเห็นได้เป็นแถบสเปกตรัมต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเรืองแสง หลอดฟลูออเรสเซนต์มีหลายประเภท เช่น cool white (มีอุณหภูมิสี 3000-4000 K) warm white deluxe (อุณหภูมิสี 3000 K) และ daylight (อุณหภูมิสี 6000 K)

2.2 หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ (Incandescence) เกิดจากการให้ความร้อนแก่ได้หลอดซึ่งเป็นโลหะทองเหลือง เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โลหะทองเหลืองจะคุ้แดง กลายเป็นสีแดง สีเหลือง และสีฟ้า สีของแสงที่เปล่งออกมาขึ้นกับอุณหภูมิของโลหะ กล่าวคือความยาวคลื่นของแสงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะเพิ่มขึ้น ดังนั้น การกระจายพลังงานของแสงจากหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ จะขึ้นกับอุณหภูมิของโลหะที่เพิ่มขึ้น หลอดไฟชนิดนี้มีอุณหภูมิสีอยู่ระหว่าง 2,700 – 3,200 K

2.3 หลอดไฟทังสเตน (Tungsten Filament Lamp) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซเฉื่อย ก่อให้เกิดความร้อนแก่ลวดทังสเตนขึ้น การให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตนนี้ทำให้เกิดพลังงานแสงออกมาตลอดความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร ซึ่งมีการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอ แสงจากหลอดไฟทังสเตนจะมีสีเหลืองกว่าแสงแดดตอนกลางวัน ทำให้มองเห็นสีของวัตถุแตกต่างกันได้ หลอดไฟชนิดนี้เมื่อใช้งานไปนาน ๆ พบว่าหลอดจะดำขึ้นและมีความสว่างลดลง เนื่องจากไอระเหยของทังสเตนไปเกาะติดที่ผนังด้านในหลอดแก้ว เพื่อแก้ไขภาวะหลอดดำจึงมีการใส่ก๊าซฮาโลเจนเข้าไปในหลอด

2.4 หลอดไฟทังสเตน-ฮาโลเจน (Tungsten-Halogen Lamp) รู้จักกันโดยทั่วไปว่า Quartz-Iodine หรือ Tungsten Iodine Lamp แหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้มีการใส่ก๊าซฮาโลเจน

เช่น ไอโอดีน หรือโบรมีน เข้าไปในหลอดปริมาณเล็กน้อย ทำให้ไอระเหยของทั้งสแตนไปรวมกับฮาโลเจนแทนที่จะไปเกาะที่ผนังของหลอดแก้ว เกิดเป็นทั้งสแตนเฮไลด์ จากนั้นเกิดแตกตัวโดยทั้งสแตนจะไปเกาะติดที่ไส้หลอด ส่วนฮาโลเจนกลายเป็นก๊าซไหลเวียนอยู่ในหลอดแก้ว ทำให้หลอดแก้วไม่ดำและอายุการใช้งานของหลอดไฟชนิดนี้ก็เพิ่มขึ้นด้วย แสงจากหลอดไฟทั้งสแตน-ฮาโลเจนเป็นแสงที่มีการกระจายพลังงานอย่างต่อเนื่อง

2.5 หลอดไฟซีนอนอาร์ค (Xenon Arc Lamp) ให้แสงโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซทำให้เกิดแสงที่มีการกระจายพลังงานอยู่ระหว่างช่วงรังสีอุลตราไวโอเล็ตและรังสีอินฟราเรด เมื่อเราใช้ที่กรองแสงลดรังสีอุลตราไวโอเล็ตอย่างสม่ำเสมอ และใช้ที่กรองความร้อนลดความเข้มของรังสีอินฟราเรดให้ต่ำลงแล้ว จะทำให้หลอดไฟซีนอนอาร์คเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานของ CIE D65 หรือ แสงแดดตอนกลางวัน[22]

แหล่งกำเนิดแสงมีความสำคัญอย่างมากต่อการรับรู้สี ในหลายศตวรรษที่ผ่านมาพวกศิลปินใช้แสงแดดทางทิศเหนือ[24] (northern daylight) แยกความแตกต่างของสี Saleski [7] ได้อธิบายถึงคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงในอุดมคติ (ideal light source) ที่เหมาะสมในการเทียบสีคือแสงที่ปล่อยออกมาควรมีองค์ประกอบของสีที่สมบูรณ์ มีความเข้มแสงพอเพียง ให้ความสบายแก่สายตาและมีมาตรฐาน คือไม่ว่าเวลา ฤดูกาล สถานที่ จะเปลี่ยนไปอย่างไร คุณภาพและปริมาณของแสงต้องเหมือนเดิมเพื่อประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูล

คุณภาพของแสงนั้นจะพิจารณาจากอุณหภูมิสี (color temperature) และการกระจายของแถบพลังงาน พบว่า พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงใด ๆ ในแต่ละความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับสีของแถบแสงที่มองเห็นได้ ส่วนอุณหภูมิสีของแสง ใด ๆ หาได้จากการเปรียบเทียบสีของแสงนั้นกับสีของแสงที่เปล่งออกมาจากการเผาโลหะดำสนิท (black body) ที่อุณหภูมิเคลวินต่าง ๆ กัน ถ้าสีของแสงใด ๆ เหมือนกับสีที่เปล่งออกมาจากโลหะดำสนิท อุณหภูมิใดจะเรียกว่า สีของแสงมีอุณหภูมิสีเท่านั้น โดยมีหน่วยเป็น เคลวิน (K)[7]

แม้ว่าสีของแสงที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติโดยเฉพาะอย่างยิ่งแสงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า แต่พื้นฐานทางคุณภาพไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบของสีที่ครบถ้วน ความเข้มแสงที่เพียงพอ และความเข้ากันกับดวงตา[6,7] แสงแดดตามธรรมชาติจึงเป็นแหล่งกำเนิดแสงในอุดมคติ ที่ก่อให้เกิดปัญหาน้อยสุดในการเทียบสี [8]

อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถใช้แสงแดดในการเลือกสีได้ทุกเวลาเนื่องจากการโคจรขึ้นลงของดวงอาทิตย์ ซึ่งเปลี่ยนไปตามฤดูกาลขึ้นกับตำแหน่งของโลกที่โคจรรอบดวงอาทิตย์และทิศทางของแสงอาทิตย์ที่กระเจิงออกขณะผ่านชั้นบรรยากาศ ทำให้การกระจายของแถบพลังงานในช่วงเช้าและเย็น เป็นแสงสีแดง วันใดแดดดีมีเมฆเล็กน้อยจะออกสีฟ้าเข้ม มีเพียงช่วงสายและช่วงบ่ายเท่านั้นที่แสงเกิดการกระเจิงออกช่วยลดความเป็นสีฟ้าของท้องฟ้าลง จึงเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเลือกสี แสงแดดในแต่ละช่วงเวลาที่สีแตกต่างกันนั้น หากนำเครื่องมือวัดอุณหภูมิสีมาวัด จะได้ออกมาเป็นตัวเลขซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิสีของแสงแดดมีค่าตั้งแต่ 1,000 K ในช่วงพระอาทิตย์ตกดิน จนถึง 20,000 K ในวันท้องฟ้าแจ่มใส[6,7] โดยพบว่าอุณหภูมิสีของแสงจากดวงอาทิตย์ที่ 5,500 K จะทำให้อ่านค่าสีถูกต้องแม่นยำที่สุดซึ่งพบได้ในช่วงสาย และช่วงบ่าย นั่นเอง[8]

Dagg และคณะ[25] กล่าวว่า แหล่งกำเนิดแสงในอุดมคติ คือแสงแดดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน และเวลา 15.00 น. ซึ่งเป็นแสงที่เหมาะสมในการเทียบสีพื้นมากที่สุด นอกจากนี้เขาได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแม่นยำในการจับคู่สี ได้แก่ ชนิดของฟอร์ชเลน คุณภาพแสง ความหนาของฟอร์ชเลนและประสิทธิภาพของผู้สังเกต ผลการทดลองสรุปว่าคุณภาพแสงมีผลต่อความแม่นยำในการจับคู่สีมากที่สุด นอกจากนี้ Dagg และคณะ[25] ยังกล่าวอีกว่าแสงแดดทางทิศเหนือเป็นลักษณะของแสงแดดมาตรฐานที่มีอุณหภูมิสี 5,500 K[26] ซึ่งคงที่ที่สุดตลอดวันเวลา ปี และเป็นการเลี่ยงแสงจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมาโดนวัตถุโดยตรง[27]

Preston และคณะ[26] กล่าวว่า คุณภาพแสงที่เหมาะสมในการจับคู่สีนอกจากอุณหภูมิสีการกระจายของแถบพลังงานแล้ว ดัชนีเทียบสี (color rendering index หรือ CRI) เป็นอีกหนึ่งคุณภาพที่ควรพิจารณา กล่าวคือ ค่า CRI 100 เป็นดัชนีอุดมคติ ค่า CRI มากกว่าหรือเท่ากับ 90 ให้ระดับค่าเทียบสีที่พอเพียง หากต่ำกว่า 90 จะไม่เหมาะสมในการเทียบสี

ปิยานันท์ ประสารราชกิจ[28] กล่าวว่า การวางมาตรฐานสีหรือการเทียบสีใด ๆ จะกระทำภายใต้สภาพแสงตอนเที่ยงวัน เนื่องจากสภาพแสงมีลักษณะเป็นแสงขาวจึงเห็นสีได้อย่างชัดเจนและให้ใช้แสงทางทิศเหนือเนื่องจากแสงสว่างไม่ได้ส่องโดนวัตถุโดยตรง จึงเป็นแสงที่รวมคลื่นแสงทุกสีไว้ ทำให้สามารถเห็นสีได้ถูกต้องชัดเจน

ตารางที่ 1 อุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสงประเภทต่าง ๆ

แสงธรรมชาติ		แสงไฟประดิษฐ์	
สภาพแสง	อุณหภูมิสี (K)	สภาพแสง	อุณหภูมิสี (K)
แสงแดดตอนรุ่งอรุณ	2,000	เปลวเทียน	2,600
แสงแดดช่วงสาย	5,500	หลอดไฟบ้าน 100 วัตต์	2,800
แสงแดดตอนเที่ยงวัน	สูงถึง 10,000	หลอดไฟในสตูดิโอ 500 วัตต์	3,200
แสงแดดช่วงบ่าย	5,500	หลอดไฟได้ฟลัด	3,200-3,400
แสงแดดช่วงเย็น	2,000	หลอดฟลูออเรสเซนต์	4,000-6,000
		แฟลชอิเล็กทรอนิกส์	5,000-6,000

ดัดแปลงจาก: พื้นฐานการถ่ายภาพ [29]

วัตถุ[30]

ในฟันธรรมชาตินั้น เนื้อฟันจะเป็นแหล่งกำเนิดของสี ดังนั้น สีฟันที่เห็นจึงมาจากเนื้อฟัน สะท้อนแสงที่ผ่านจากเคลือบฟันเข้ามา ทั้งนี้ขึ้นกับความหนาและระดับความโปร่งแสงของเคลือบฟัน เคลือบฟันมีแร่ธาตุเป็นส่วนประกอบถึง 97 % โดยน้ำหนัก และส่วนมากเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) เนื่องจากมีความโปร่งแสงมากจึงยอมให้แสงผ่านได้ถึง 70 % ต่อความหนา 1 มิลลิเมตร ขณะที่เนื้อฟันมีไฮดรอกซีอะพาไทต์ ประมาณ 70 % โดยน้ำหนัก ที่เหลือคือคอลลาเจน จึงยอมให้แสงผ่านได้ไม่เกิน 30 % ต่อความหนา 1 มิลลิเมตร

เราสามารถแบ่งฟันออกได้เป็น 3 ส่วน

1. ส่วนปลายฟัน (Incisal third)

เป็นบริเวณที่มีความบาง ประกอบไปด้วยเคลือบฟันเป็นส่วนใหญ่ จึงโปร่งแสงทำให้ฟันดูเป็นธรรมชาติ ไม่แข็งกระด้างเหมือนเซรามิก

2. ส่วนกลางฟัน (Middle third)

ประกอบไปด้วยเนื้อฟันเป็นส่วนใหญ่ ความโปร่งแสงจึงน้อยกว่าส่วนปลายฟัน สีที่เห็นเกิดจากเนื้อฟันที่อยู่ข้างใต้

3. ส่วนคอพิน (Cervical third)

บริเวณนี้เคลือบฟันจะมีความบางมากทำให้เห็นสีจากเนื้อฟันชัด ซึ่งมีสีหลากหลาย ตั้งแต่สีส้มเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นกับอายุ และ ระดับการสะสมแคลเซียม (degree of calcification) ของเนื้อฟัน นอกจากนี้อาจได้รับอิทธิพลจากสีของเหงือกได้

พอร์ซเลนที่นิยมใช้ในงานครอบฟันโลหะเคลือบพอร์ซเลน คือ เฟลสปาทิกพอร์ซเลน (feldspathic porcelain) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือ โครงร่างตาข่ายของซิลิกา (SiO_2) และผลึกของ โปแตสเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (Potassium Aluminium Silicate: $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) ในขั้นตอนการผลิตที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ส่วนประกอบเหล่านี้จะรวมกันและเปลี่ยนรูปไป ทำให้ พอร์ซเลน ประกอบไปด้วย 2 สถานะ คือ สถานะแก้ว (glassy phase) จะมีความโปร่งแสงและสถานะที่เป็นผลึก (crystalline phase) ได้แก่ ลูไซต์ (leucite : KAlSi_2O_6 หรือ $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นสถานะ ที่ให้ความแข็งแรงกับพอร์ซเลน ส่วนผสมประเภทอื่นที่พบเป็นส่วนประกอบ ได้แก่

1. เม็ดสี (Color pigment)

เนื่องจากเฟลสปาที่ใช้ในทางทันตกรรมเป็นผลึกที่ทึบแสง มีสีไม่แน่นอนระหว่างสีเทาและสีชมพู การใส่เม็ดสี (color pigment) ลงไปทำให้ได้สีใกล้เคียงฟันธรรมชาติที่มีอยู่ในช่องปากผู้ป่วย ตัวอย่างเม็ดสีเช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (titanium oxide) จะให้สีเหลือง-น้ำตาล แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide) ให้สีลาเวนเดอร์ โคบอลท์ออกไซด์ (cobalt oxide) ให้สีฟ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสีที่ใส่ลงไปพอร์ซเลนนั้นไม่เพียงพอให้ได้ลักษณะเหมือนฟันธรรมชาติ เนื่องจากพอร์ซเลนมีความโปร่งแสงมาก ในขณะที่ส่วนเนื้อฟันเป็นบริเวณที่ต้องการความทึบแสง การใส่โอพาคิฟายอิงเอเจนต์ (opacifying agent) จึงมีส่วนช่วยให้พอร์ซเลนมีความทึบแสงขึ้น ตัวอย่างเช่น ซีเรียมออกไซด์ (cerium oxide) ไทเทเนียมออกไซด์ (titanium oxide) และ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) เป็นต้น

2. กลาสมอดิฟายเออร์ (Glass modifiers) เป็นพวกออกไซด์ของโลหะ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความหนืด (viscosity) ลดจุดหลอมเหลวและเพิ่มช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว

3. Stain and color modifiers

ใช้ในการแต่งเติมสีบนผิวพอร์ซเลนให้มีลักษณะต่าง ๆ

เนื่องจากการทำครอบหรือสะพานฟันให้มีลักษณะลอกเลียนฟันธรรมชาติได้นั้นต้องคำนึงถึงปรากฏการณ์ของแสงหลังจากส่องลงมากระทบชิ้นงานด้วย เนื่องจากภายในเนื้อ

พอร์ซเลนมีส่วนประกอบที่เป็นอนุภาคขนาดเล็กจำนวนมากดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีดัชนีหักเหของแสงแตกต่างกันออกไป ขณะที่แสงส่องผ่านจะเกิดการกระเจิง นอกจากนั้นความเข้มแสงก็จะลดลง ปริมาณของแสงที่เกิดการกระเจิงมากหรือน้อยขึ้นกับความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างอนุภาคพวกโอพาซีไฟายเออร์กับเนื้อพอร์ซเลน หากดัชนีหักเหมีความแตกต่างกันมาก การกระเจิงของแสงก็จะมีมาก นอกจากนี้การกระเจิงของแสงยังขึ้นกับขนาดของอนุภาคอีกด้วย โดยแสงจะเกิดการกระเจิงมากที่สุดเมื่ออนุภาคที่แสงตกกระทบนั้นมีขนาดเท่าความยาวคลื่น

การหักเหของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนทิศทางของแสงทำให้ความเร็วของแสงเปลี่ยน ซึ่งทิศทางของแสงจะเปลี่ยนไปมากหรือน้อยขึ้นกับความยาวคลื่น หากความยาวคลื่นสั้นการเบี่ยงเบนของแสงจะมีมาก พบว่า ของปริมาณแสง 4% เกิดการสะท้อนกลับเมื่อตกกระทบบนผิวพอร์ซเลน

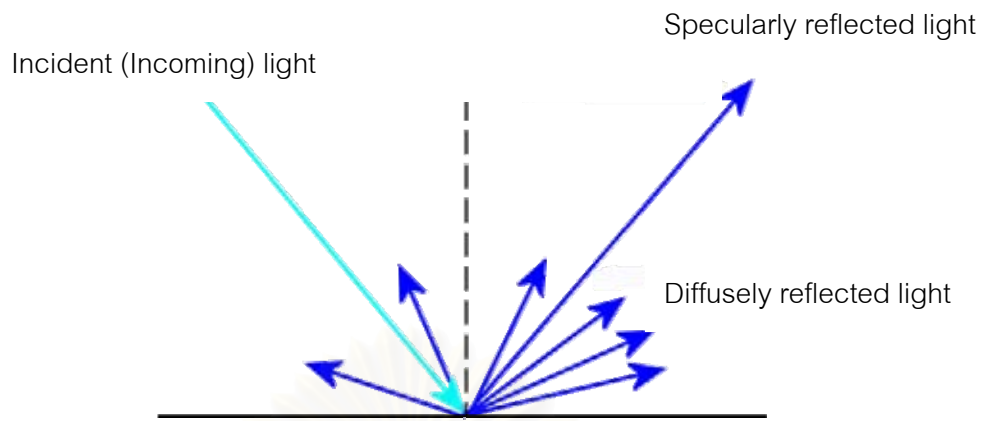
เมื่อแสงตกลงมากระทบบนวัตถุจะเกิดการกระเจิง ส่องผ่าน ดูดกลืน สะท้อน และหักเหได้ขึ้นกับลักษณะของวัตถุ[31] หากแสงส่องผ่านวัตถุได้โดยที่แนวการเคลื่อนที่ของแสงไม่เปลี่ยนแปลงวัตถุนั้นจะมีลักษณะโปร่งใส (transparent) ปรางูการณที่แสงส่องผ่านวัตถุที่มีความโปร่งแสง ผิวไม่เรียบ และเกิดการกระเจิงของแสงเรียกการส่องผ่านแบบกระจัดกระจาย (Diffuse transmission) สำหรับในกรณีที่ไม่มีการส่องผ่านทะลุเลย วัตถุนั้นจะมีลักษณะทึบแสง (opaque)

รังสีของแสงที่สะท้อนกลับจากผิววัตถุ แทนที่จะส่องผ่าน หรือ ดูดกลืน เรียกว่า “แสงสะท้อน” เราสามารถแบ่งแสงสะท้อนออกเป็น 2 ชนิด คือ แสงสะท้อนแบบกลับหมด (Specular reflection) และแสงสะท้อนแบบกระจัดกระจาย (Diffused reflection)[33] ดังภาพที่ 1

แสงสะท้อนแบบกลับหมดเป็นปรากฏการณ์เมื่อแสงตกกระทบลงบนวัตถุผิวเรียบจะสะท้อนกลับจากจุดที่กระทบด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ พบได้ในวัตถุที่มีความเงามัน เช่น กระจก

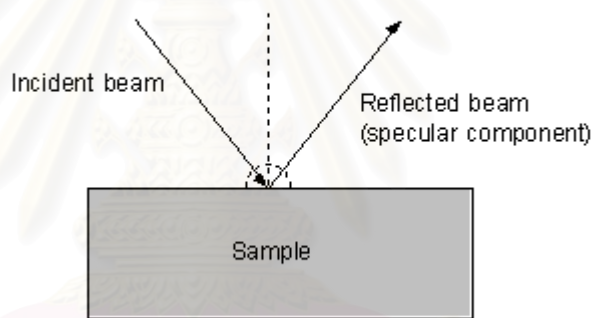
แสงสะท้อนแบบกระจัดกระจาย เป็นปรากฏการณ์เมื่อแสงตกลงบนวัตถุที่มีพื้นผิวที่ไม่เรียบจะไม่สามารถสะท้อนให้มุมที่เท่ากันได้ ดังนั้น รังสีตกกระทบจะมีการสะท้อนในขนาดของมุมที่ต่างกันออกไป ทำให้แสงเกิดการกระจายขึ้นอีกด้วย

ในภาวะแสงสะท้อนแบบกลับหมดนั้น แสงจะไม่มีกระเจิงแต่จะสะท้อนกลับด้วยมุมที่เท่ากันกับผิววัตถุ แสงจึงสะท้อนเข้าตาโดยตรงเช่นเดียวกับกระจก ทำให้ลักษณะความมีชีวิตของชิ้นงานลดลง ดังนั้น ลักษณะแสงที่เราต้องการคือ แสงสะท้อนแบบกระจัดกระจายนั่นเอง

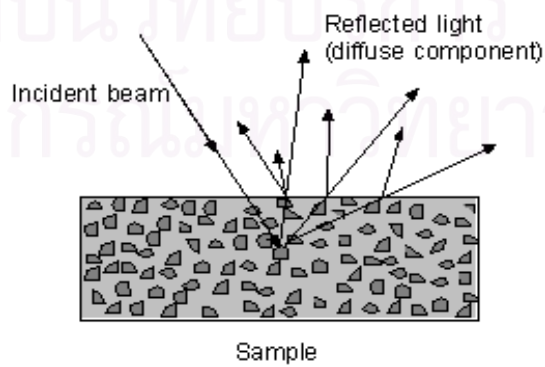


Specular Reflection from a Solid Sample

(angle of incidence = angle of reflection)



Diffuse Reflection from a Solid Sample



รูปที่ 1 แสดงการสะท้อนของแสง

สำหรับพอร์ซเลนที่เคลือบบนโครงโลหะนั้นประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ ดังนี้ [32]

1. ชั้นทึบแสง (Opaque Layer) ประกอบด้วยโอพาซิฟายอิงออกไซด์ (opacifying oxide) จำนวนมาก มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ เพื่อปิดบังสีโลหะที่อยู่ข้างใน และเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับสีที่ต้องการ ทั้งนี้การใส่ชั้นทึบแสงลงไปในแต่ละชั้นก็มีวัตถุประสงค์ในการเกิดแสงสะท้อนแบบกระจัดกระจายด้วย

2. ชั้นพอร์ซเลนเนื้อฟัน (Body หรือ Dentin Porcelain Layer) ชั้นนี้ก่อให้เกิดแสงสะท้อนแบบกระจัดกระจายมากกว่าชั้นทึบแสง เพราะมีความหนามากกว่าถึง 2 เท่า จึงยอมให้แสงผ่านมากกว่า พบว่า ออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบในชั้นนี้ทำให้เกิดการสะท้อนของแสงแบบกลับหมด ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการเนื่องจากดูไม่เป็นธรรมชาติ วิธีแก้ปัญหาคือ ต้องกระจายอนุภาคสีออกและเติมเต็มบริเวณช่องว่างด้วยวัสดุที่ยอมให้แสงผ่านและกระเจิงได้มากกว่า วัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุโปร่งแสงไม่มีสี ซึ่งชุดพอร์ซเลนส่วนมากจะมีพอร์ซเลนที่ไม่มีสี (neutral porcelain) ซึ่งให้ความโปร่งแสงเหมาะกับวัตถุประสงค์ นอกจากนี้พอร์ซเลนที่ไม่มีสียังมีประโยชน์คือลดความอึดตัวของสีให้ได้ความเข้มสีที่ต้องการและเพิ่มการกระจายแสงทำให้ชิ้นงานดูมีชีวิตอีกด้วย

3. ชั้นพอร์ซเลนปลายฟัน (Incisal หรือ Enamel Porcelain Layer) มีความโปร่งแสง จึงยอมให้แสงผ่านลงไปยังชั้นที่อยู่ข้างใต้และสะท้อนสีออกมาในหลาย ๆ ทิศทาง

เม็ดสีที่พบในส่วนพอร์ซเลนทึบแสงและในมอดิฟายเออร์จะทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและจะสะท้อนสีที่ต้องการออกมาสู่ตาเรา ดังนั้นคุณสมบัติการดูดกลืน ส่องผ่านและสะท้อนแสงจึงมีความสำคัญต่อพอร์ซเลนเพื่อให้สีที่ได้ตรงตามความต้องการและเป็นธรรมชาติ

สีที่ได้จากการเติมสีลงบนผิวจะมีคุณสมบัติเหมือนพอร์ซเลนทึบแสง คือ มีการสะท้อนแสงสูง (highly reflection) ดังนั้นควรเติมสีให้ถูกตำแหน่งเพื่อเลียนแบบตำหนิที่เกิดกับพื้นธรรมชาติ [30]

ระบบการวัดสี [22,33]

เนื่องจากความสามารถในการสื่อความหมายของสีจากวัตถุชิ้นเดียวกันของมนุษย์มีความหลากหลายแตกต่างกันไปตามตัวแปรต่าง ๆ ส่งผลต่อการสื่อความหมายของสีออกมาไม่ตรงกัน ระบบการวัดสีที่เป็นสากลจะช่วยให้สามารถสื่อความหมายของสีได้เข้าใจตรงกันมากขึ้น ระบบการวัดสีที่นิยมใช้ได้แก่

1. ระบบมันเชลล์ (Munsell System)

เป็นระบบที่ถูกคิดค้นโดย Albert H. Munsell ในปี ค.ศ. 1905 และถูกปรับปรุงเพิ่มเติมโดย Nickerson ในปี 1976 จะบอกลักษณะของสีโดยอาศัยความสัมพันธ์ของมันเชลล์ (Munsell Hue) มันเชลล์แวลู (Munsell Value) และมันเชลล์โครมา (Munsell Chroma) ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ประการนี้จะใช้ในการบรรยายสี ในรูปของ ฮยู (Hue) แวลู (Value) และโครมา (Chroma) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2

Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น เช่น สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน ใช้บอกสีของพื้นหรือ restoration ได้

Value หมายถึง ความมืด (darkness) หรือความสว่าง (lightness, brightness) ของสี (hue) เช่น สภาพโปร่งแสงเป็นลักษณะหนึ่งของ value เนื่องจากสภาพโปร่งแสง (translucency) เป็นสภาพที่ยากต่อการวัด หรืออธิบาย จึงเหมาะอย่างยิ่งในการอ่านค่าในรูปของ value เนื่องจากพื้นที่ที่มีความโปร่งแสงมากจะมี value ต่ำ เนื่องจากแสงสามารถส่องทะลุผ่านพื้น (greater light absorption) และดูดกลืนเอาเงามืดดำของช่องปากและอวัยวะรอบ ๆ ใต้ พื้นที่มีความขุ่น (more opaque) จะอนุญาตให้แสงส่องผ่านน้อยกว่า จะดูเป็นธรรมชาติมากกว่าและดูสว่างกว่า

Chroma หมายถึง ความเข้ม (intensity) หรือความบริสุทธิ์ (saturation) ของสี (hue) เช่น สีฟ้าอ่อน สีฟ้าเข้ม เป็นต้น

HUE

ระบบมันเชลล์จัดลำดับสีในรูปของทรงกระบอก 3 มิติ (three-dimensional cylindrical form) โดยแผ่นกระดาษสีแต่ละสีตามลักษณะของ hue ในแถบสเปกตรัม ถูกจัดเรียงไปตามเส้นรอบวงของทรงกระบอก มี hue หลักอยู่ 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว ฟ้า ม่วง แสดงสัญลักษณ์เป็น 5R, 5Y, 5G, 5B, 5P ตามลำดับ ช่องว่างระหว่าง hue จะเป็นสีที่มีลักษณะระหว่าง hue ทั้งสอง แสดงสัญลักษณ์ 5YR, 5GY, 5GB, 5PB และ 5RP จากการแบ่งย่อยออกมาเช่นนี้ทำให้เรามี hue หลักทั้งหมด 10 hues และในแต่ละ hues ถูกแบ่งย่อยออกอีก 10 hues step ดังนั้นในระบบมันเชลล์ จะมีทั้งหมด 100 hues

VALUE

หรือมาตราความสว่างสี (lightness scale) ถูกจัดเรียงในแนวตั้ง ตามลักษณะของสีที่มี value แตกต่างกันจากสีที่มีความสว่างต่ำสุดจนถึงสูงสุด โดยค่า 10 แสดงถึงความขาว (white) และ 0 คือดำ (black) ค่าเทาที่ลำดับ 5 ถือเป็นสีเทากลาง (Neutral gray)

CHROMA

แผ่นกระดาษสีที่มี hue และ value เดียวกันจะถูกจัดลำดับในแนวนอนจาก chroma น้อยสุดถึงมากที่สุด โดยค่า 0 แสดงถึงสีอ่อน (weak color) ค่า 10 แสดงถึงสีเข้ม (strong color) พบว่าระบบมันเชลล์ นี้ยังคงมีข้อบกพร่องเนื่องจากการบอกลักษณะของสีนั้นยังขึ้นอยู่กับมุมมองเห็นของแต่ละบุคคล จึงทำให้การบอกลักษณะของสีมีความแตกต่างกันได้

2. ระบบ CIE (CIE System)

เป็นระบบสำคัญระบบหนึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี 1931 โดย คณะกรรมการระหว่างชาติว่าด้วยแสงสว่าง (Commission International de l'Eclairage, the French title of the international committee หรือ International Commission on Illumination)

หลักการพื้นฐานของระบบนี้ พัฒนามาจากขบวนการรับรู้สีของมนุษย์ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ต้องมีแหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสี และผู้สังเกต ซึ่งต่างจากระบบมันเชลล์ที่ระบบมันเชลล์จะวัดสีโดยอาศัยการมองเห็นของแต่ละคน ค่าที่ได้ออกมาเป็นมาตราทางจิตวิทยา (psychological scale) ขณะที่ CIE system จะวัดสีออกมาเป็นตัวเลข[34] ซึ่งยอมมีข้อดีคือถึงแม้วัตถุสีจะซีดลงเนื่องจากกาลเวลาผ่านไปนานเพียงใดก็ตาม เรายังทราบได้ว่าสีเดิมเป็นอย่างไร และเนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล จึงสามารถลดปัญหาความเห็นที่ไม่ตรงกันได้

ระบบนี้จะแยกสีออกเป็น 3 องค์ประกอบโดยแสดงค่าที่วัดออกมาเป็นตัวเลขในรูปของแกน 3 มิติ ของ CIE color space [3] ดังรูปที่ 3 โดย

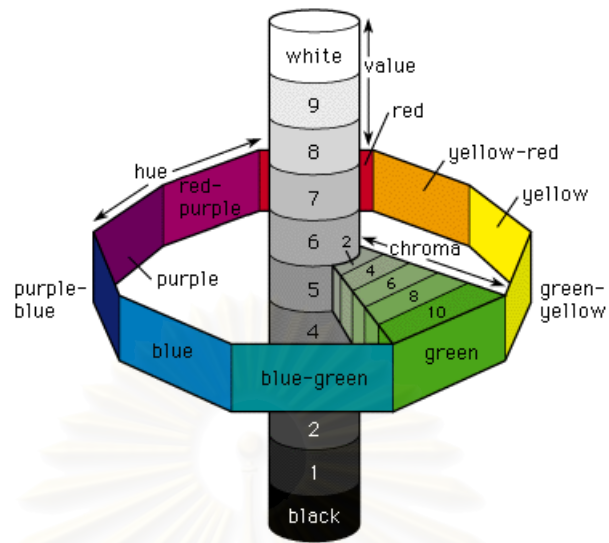
L^* เป็นแกนในแนวตั้ง แทนค่าความสว่างของสี (lightness of color) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (มืด) กับ 100 (สว่าง)

a^* , b^* เป็นแกนในแนวราบตั้งฉากกัน โดย

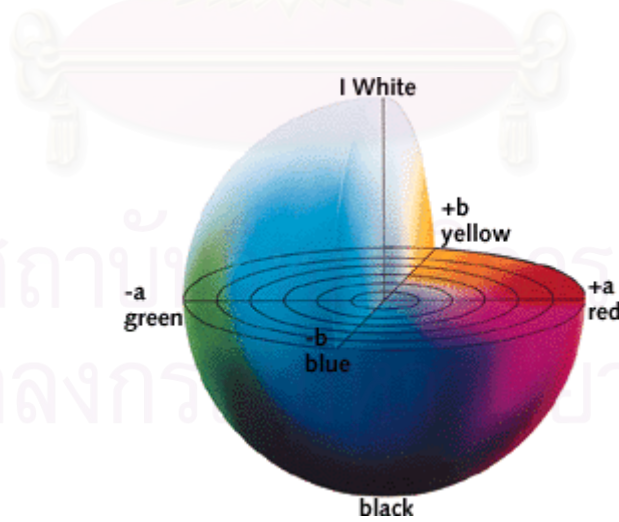
a^* แทนตัวแปรสีในแนวแกน แดง-เขียว หากค่า a เป็นบวก (+) สีจะค่อนข้างแดง หาก a เป็นลบ (-) สีจะค่อนข้างเขียว

b^* แทนตัวแปรสีในแนวแกน เหลือง-น้ำเงิน หากค่า b เป็นบวก (+) สีจะค่อนข้างเหลือง หาก b เป็นลบ (-) สีจะค่อนข้างน้ำเงิน

พบว่า ตัวแปร L^* ในระบบสี CIE จะเทียบได้กับน้ำหนักของสี (Value) ในระบบสีมันเชลล์ สำหรับค่า a^* , b^* จะมีความสัมพันธ์กับ hue และ chroma[1]



รูปที่ 2 แสดงการจัดเรียงตัวของสีในระบบมันเซลล์



รูปที่ 3 แสดงการจัดเรียงตัวของสีในระบบซีไออี

ค่าที่ได้จากระบบสี CIE สามารถนำมาคำนวณหาความแตกต่างของสี (ΔE) ระหว่างชั้นตัวอย่างเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน ได้ตามสูตร

$$\Delta E = [(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2]^{1/2}$$

L^*_2, a^*_2, b^*_2 แทนค่า $L^* a^* b^*$ ที่วัดได้จากตัวอย่างมาตรฐาน

L^*_1, a^*_1, b^*_1 แทนค่า $L^* a^* b^*$ ที่วัดได้จากตัวอย่างที่ทำการทดลอง

จากการศึกษาของ Kuehni และ Marcus[35] ในปี 1979 พบว่า ถ้า ΔE มีค่าเท่ากับ 1 จะมีผู้สังเกตเห็นหนึ่งจากจำนวนผู้สังเกตทั้งหมดที่สามารถเห็นความแตกต่างของสีได้ ค่า $\Delta E \leq 2$ เป็นค่าที่ยอมรับได้ในทางคลินิก[36]และค่า $\Delta E \geq 3.7$ จะพบความแตกต่างของสีอย่างเห็นได้ชัด [37]

Seghi และคณะ[5] กล่าวว่า หาก $\Delta E > 2$ ผู้สังเกตสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีได้ทุกครั้ง นอกจากนี้ ค่า $\Delta E = 1$ หน่วย น่าจะเป็นค่าประมาณระดับความสามารถในการแยกแยะสีสูงสุดของผู้สังเกตภายใต้สภาพแวดล้อมในอุดมคติ

ระบบ CIE ได้แนะนำมาตรฐานของผู้สังเกต และวิธีวัดค่าสีที่เห็นโดยผู้สังเกตมาตรฐาน (standard observer) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (standard source of illumination) ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่สามารถทำการปรับเทียบมาตรฐานได้และมีคุณภาพของแสงคงที่ โดยนิยมใช้แหล่งกำเนิดแสง D 65 ซึ่งมีอุณหภูมิสี 6,500 K แทนแสงแดดตอนกลางวัน

สำหรับผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน (CIE standard observers) [22] นั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ในปี 1931 CIE stand observers และปี 1964 CIE supplementary standard observers โดย Guild และ Wright ได้ทำการทดลองดูการตอบสนองของตามมนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง-สีเขียว-สีน้ำเงิน โดยการเทียบสี (Color-Matching Experiment) แล้วหาค่าเฉลี่ย ค่าที่ได้เรียก CIE color matching function หรือเรียกว่า 2° 1931 CIE standard observer ซึ่งได้จากการให้ผู้สังเกตการณ์มองวัตถุสีด้วยมุม 2° ซึ่งเป็นการมองที่ใช้มุมแคบกว่าปกติ พบว่าการมองวัตถุด้วยมุม 2° นั้น ภาพจะตกลงบนโฟเวียเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้ว เซลรับแสงรูปโคนซึ่งเป็นเซลล์ที่ไวต่อแสงสีไม่ได้อยู่เฉพาะบนโฟเวียเท่านั้น แต่อยู่บริเวณรอบ ๆ โฟเวียด้วย ดังนั้น ในปี 1964 จึงทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยให้ผู้สังเกตการณ์มองวัตถุด้วยมุมที่ใหญ่ขึ้นคือ 10° พบว่า ผู้สังเกตทำการเทียบสี (Color matching) ได้แม่นยำมากกว่า ค่าที่ได้เรียกว่า 10° 1964 standard observer

วิธีประเมินสีฟัน

วิธีประเมินสีฟันแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การกำหนดสีด้วยตา และ การวิเคราะห์สีด้วยเครื่องมือ

1. **การกำหนดสีด้วยตา** เป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางทันตกรรม โดยการเปรียบเทียบสีฟันกับชุดเทียบสีมาตรฐานซึ่งก็คือ shade guide ที่ถูกผลิตขึ้นมาในแต่ละบริษัท โดยเทียบสีให้ตรงกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ขาดความน่าเชื่อถือ และความแน่นอน[3] เนื่องจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น อายุ อารมณ์ของผู้สังเกต ความอ่อนล้าของสายตา สภาพแสงขณะนั้น สภาพแสงที่ดวงตาสัมผัสก่อนหน้านี้นี้ ตำแหน่งวัตถุ ตำแหน่งแสง และภาวะเมตาเมอริซึม[3,4,5] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุ 2 ชนิด ที่มีเส้นโค้งการสะท้อนแสง (reflectance curve) ต่างกัน จะมีสีเหมือนกันภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งแต่มีสีต่างกันเมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง นอกจากนี้การบอกความแตกต่างของสีโดยใช้สายตาตามมนุษย์ ยังมีจุดอ่อนคือ ตามมนุษย์แต่ละคนมีความสามารถในการมองเห็นและบอกความแตกต่างของสีได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับประสบการณ์การฝึกฝนของแต่ละคน แสง และมุมที่เรามอง อีกทั้งตาของมนุษย์ยังปรับตัวเข้ากับสีที่ใกล้เคียงกันง่ายมากและไม่สามารถบันทึกค่าหรือจดจำสีที่มองเห็นไปแล้วได้แน่นอน

Brewer และคณะ[20] กล่าวว่า คุณภาพและความเข้มแสงมีอิทธิพลต่อสีฟัน ดังนั้นแหล่งกำเนิดแสงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนั้นยังพบว่า แสงธรรมชาติเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ทำให้เห็นสีถูกต้องที่สุด อย่างไรก็ตาม ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการทำงานที่แนะนำให้ใช้ในห้องทันตกรรม คือ 200-300 แรงเทียน และในห้องแล็บที่ 300 แรงเทียนนั้น ไม่เพียงพอต่อการเทียบ สี[26,38] ความจริงแล้วความเข้มแสงที่ใช้ควรให้ความสบายแก่สายตาขณะทำงานและมากพอที่ทำให้เห็นความแตกต่างของสีได้ ความเข้มแสงที่แนะนำให้ใช้ในการเทียบสีฟันในทางทันตกรรม คือ 1,200-1,500 ลักซ์ (Lux) [39]

Preston[26] และ Bergen[40] แนะนำว่า แหล่งกำเนิดแสงในห้องทันตกรรมและห้องปฏิบัติการควรมีความสมดุลของแถบสีและให้แถบสีในช่วงความยาวคลื่น 380-780 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ และมี อุณหภูมิสี 5,500 K นอกจากนั้นการประเมินสีในแต่ละบุคคลยังมีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากผิวฟันมีลักษณะที่ไม่เรียบ (nonhomogeneous) และในแต่ละตำแหน่งบนตัวฟันมีความหลากหลายของสี ความโปร่งแสง โครงสร้าง และความมันแตกต่างกัน จึงเกิดความลำบากต่อสายตาที่ต้องมองในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนตัวฟันขณะเทียบสี [9]

Barrett และคณะ [9] เปรียบเทียบความสามารถของตามนุษย์ในการจับคู่สีระหว่าง shade disk ซึ่งเป็นแผ่นพอร์ซเลนผิวเรียบสีเดียว กับ shade tab ซึ่งเป็นแผงเทียบสีมีลักษณะเป็นรูปฟันหลากสี ภายในห้องสีเทากลางได้แสงมาตรฐาน D 65 พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ลำดับในการทดลองคือการจับคู่สีใน shade tab ก่อน shade disk ส่งผลให้ความสามารถในการจับคู่สีใน shade disk มากขึ้น เขาสรุปว่าการจับคู่สีด้วยตาเป็นทักษะที่สามารถเรียนรู้และพัฒนาได้

ในขณะที่ชุดเทียบสีฟันซึ่งแต่ละบริษัทผลิตออกมาเพื่อเป็นสีมาตรฐานนั้น พบว่าสีที่ปรากฏบนแผงก็ยังไม่ครอบคลุมสีฟันได้ทั้งหมด และชุดเทียบสีฟันในแต่ละแผงที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันก็มีความแตกต่างของสีได้ [3] เนื่องจากปัจจุบัน มีการพัฒนาของชุดเทียบสีฟัน โดยบริษัท Vita Zahnfabrik™ (Bad Sackingen, Germany) ได้ผลิตแผงเทียบสีฟันยี่ห้อ Vitapan 3D-Master® ออกมาโดยแนะนำว่าเป็นชุดเทียบสีฟันที่ครอบคลุมสีฟันธรรมชาติที่มีอยู่มากที่สุด แต่จากการศึกษาของ Paravina และคณะ [39] พบว่า vitapan 3D® ยังไม่ครอบคลุมสีฟันทั้งหมด หากแต่พบการพัฒนาของชุดเทียบสีคือ มีสีครอบคลุมสีเหลือง-แดงและมีความอิมิตัวของสีมากขึ้น เมื่อเทียบกับ vitapan classical®

2. การวิเคราะห์สีด้วยเครื่องมือ ซึ่งในเวลาต่อมาได้มีการคิดค้นเครื่องมือขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการเทียบสีด้วยสายตา โดยเรียกวิธีนี้ว่า Instrumental Color Analysis โดยเป็นวิธีที่ประเมินสีได้ค่อนข้างแม่นยำ รวดเร็ว สามารถอ่านค่าซ้ำได้ที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ คัลเลอร์มิเตอร์ และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดค่าออกมาในรูปของ CIELAB UNITS ($L^*a^*b^*$)

คัลเลอร์มิเตอร์ [20,21] เป็นเครื่องวัดสีชนิดแรกที่ยพยายามเลียนแบบขอบเขตการมองเห็นของมนุษย์ โดยหลักการที่ว่าแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านตัวกรองแสงเพื่อจำกัดแถบแสงที่จะมาตกกระทบวัตถุ แสงที่สะท้อนกลับผ่านตัวกรองแสงอีก 3-4 อัน จะถูกอ่านค่าโดยโฟโตไดโอด ถึงแม้เครื่องจะมีความไวในการวัดสีแต่ขาดความแม่นยำในการเทียบสี จึงมีการพัฒนาเครื่องมือเพื่อสามารถวัดสีได้แม่นยำยิ่งขึ้น

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำในการเทียบสีมากที่สุด ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ตัวทำแสงสีเดียว (monochromator) และ โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้มีหลายแบบ เช่น หลอดทังสเตน-ฮาโลเจน หรือจะเป็นหลอดซินอน โดยอาจมีตัวกรองแสงหรือไม่ก็ได้ ซึ่งความยาวคลื่นที่ปรากฏพบอยู่ในช่วง 380-760 นาโนเมตรนั้น มีลักษณะค่อนข้างกระจาย จึงมีการจำกัดให้ความยาวคลื่นของแสงทั้งก่อนและหลังตกกระทบวัตถุ

อยู่ในช่วงแคบ ๆ โดยใช้ตัวทำแสงสีเดียวช่วย แสงจะถูกอ่านค่าโดยโฟโตไดโอด การทำงานของเครื่องช้ากว่าคัลเลอริมิเตอร์แต่แม่นยำกว่า

มีการนำคัลเลอริมิเตอร์ และ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ไปใช้ในงานวิจัยอย่างมากมาย Russel และคณะ[6] ได้ใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Monolight spectrophotometer) ศึกษาสีฟันธรรมชาติในสภาวะก่อน-หลังใส่แผ่นยางกั้นน้ำลาย และก่อน-หลังพิมพ์ปากด้วยวัสดุพิมพ์ปากโพลีไวนิลไซลอสเซน

Seghi , Johnson , O' Brien[1] พบว่า คัลเลอริมิเตอร์สามารถวัดสีได้อย่างแม่นยำ แต่ระดับของความแม่นยำในการวัดสีจะขึ้นอยู่กับเครื่องที่ใช้ ชนิดของผิววัสดุที่ใช้วัด และความโปร่งแสงของพอร์ซเลนด้วย

Okubo และคณะ[3] เปรียบเทียบความสามารถระหว่างคัลเลอริมิเตอร์กับสายตามนุษย์ ในการจับคู่สีในชุดเทียบสีฟันเซรามิกโดยให้ผู้สังเกตที่มีสายตปกติ จับคู่สีระหว่างชุดเทียบสีฟันยี่ห้อ Vita Lumin[®] (Vita Zahnfabrik H. Rayter GmbH&Co.KG ,Bad Sackingen ,West Germany) จำนวน 2 แผง ภายใต้แสงแดดจากทิศเหนือในวันที่มีเมฆบางส่วน ช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายโมง เป็นระยะเวลาสองสัปดาห์ และทำการทดลองซ้ำใหม่อีกสองเดือนภายใต้สภาวะเดิม ส่วนยี่ห้อเครื่องคัลเลอริมิเตอร์ที่ใช้คือ Colortron II ทำการวัดค่า CIELAB บริเวณส่วนกลางฟัน 1/3 ในแต่ละแถบเทียบสีฟันปลอมเทียบกันระหว่างสองแผง โดยชุดเทียบสีที่ค่า ΔE น้อยที่สุดจะมีสีใกล้เคียงกันมากที่สุด ผลการทดลองพบว่า Colortron II มีความสามารถในการจับคู่สีถูกต้อง 50% ขณะที่ใช้ตาจับคู่มีความถูกต้อง 48% นั่นคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เขาจึงคิดว่า คัลเลอริมิเตอร์ไม่น่าเหมาะสมในการวัดสีวัสดุที่มีลักษณะซับซ้อน หลายชั้นและโปร่งแสง

Van der Burgt และคณะ[10] พบว่า ผลที่ได้จากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ปล่อยออกมา เมื่อกระทบวัตถุจะเกิดการกระเจิง และดูดกลืน ทั้งนี้แสงบางส่วนจะเกิดการทะลุผ่านออกไป บางส่วนเกิดการกระเจิงภายในวัตถุและสะท้อนกลับออกมา (scattered backward) ซึ่งการสะท้อนกลับออกมาของแสงมักมีทิศทางออกไปทางด้านข้าง พบได้ในวัตถุที่มีความโปร่งแสง เช่น ฟันและพอร์ซเลน เครื่องมือวัดแสงมักมีช่องขนาดเล็กสำหรับเป็นทางผ่านของแสงที่ออกมาและแสงที่สะท้อนกลับเข้าไป การที่แสงสะท้อนออกไปยังด้านข้างทำให้เกิดภาวะสูญเสียขอบได้ เนื่องจากปริมาณแสงที่สะท้อนกลับเข้าช่องรับแสง จริง ๆ มีน้อยลง ค่าสีที่อ่านได้จึงมีความผิดพลาด[9]

Haywood และคณะ[11] เชื่อว่าคัลเลอร์มิเตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับวัตถุที่มีผิวราบมากกว่าวัตถุที่มีผิวโค้งและโปร่งแสงที่พบเห็นในพื้นทั่วไป

Barrett และคณะ[9] กล่าวว่า คัลเลอร์มิเตอร์ และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้วัดสีวัตถุผิวเรียบ โดยการประมวลผลรวมจากพื้นที่สีสามมิติ (3-dimensional color space) ที่ถูกคิดขึ้นมาโดยคณะกรรมการระหว่างชาติว่าด้วยแสงสว่าง หากวัตถุนั้นผิวไม่เรียบ สีไม่สม่ำเสมอ หรือมีหลาย ๆ สี ผลที่ได้จะถูกประมวลผลโดยอยู่เฉพาะในบริเวณที่ช่องวัดแสงสัมผัส ซึ่งทำให้ค่าสีที่ได้มีความผิดพลาดและเนื่องจากพันธุกรรมชาติมีความโค้ง โปร่งแสง และมีสีที่หลากหลาย การใช้เครื่องวัดสีจึงมีความผิดพลาด[12] Seghi[12] พบว่าคัลเลอร์มิเตอร์สามารถอ่านสีซ้ำในวัตถุที่มีความทึบแสงดีกว่าวัตถุที่โปร่งแสง

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่ายังมีข้อจำกัดในการอ่านสีของเครื่องมือประกอบกับเครื่องมือมีราคาที่สูงจึงทำให้ไม่ได้รับความแพร่หลายในคลินิกทันตกรรมเท่าไรนัก [13] กล้องดิจิทัลจึงเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่กำลังเข้ามามีบทบาท ซึ่งต่างจากเครื่องมือชนิดอื่นตรงที่สามารถวัดสีวัตถุโดยไม่มีสัมผัส[14]

กล้องดิจิทัล

กล้องดิจิทัล[24] เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการบันทึกภาพ เนื่องจากการบันทึกภาพในยุคแรก ๆ ใช้การวาดภาพซึ่งกว่าจะได้ภาพที่มีรายละเอียดใกล้เคียงของจริงมากที่สุดต้องใช้เวลาอย่างมาก มนุษย์จึงพยายามคิดวิธีที่จะทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียด ใช้เวลาน้อย และผลิตภาพซ้ำเป็นจำนวนมาก ๆ ได้ การถ่ายภาพด้วยกล้องจึงเริ่มขึ้น กล้องตัวแรกประดิษฐ์ขึ้นโดย จอร์จ อีสแมน เป็นกล้องขนาด $2 \frac{3}{4}$ นิ้ว ถ่ายภาพได้หนึ่งร้อยภาพ เมื่อถ่ายรูปจนหมดม้วนฟิล์มต้องส่งกลับไปที่โรงงานเพื่อทำการถอดฟิล์ม ล้างและอัดขยายภาพหลายปีต่อมาโทมัส เอดิสัน ได้นำม้วนฟิล์มของ Eastman Kodak ขนาดกว้าง $1 \frac{3}{8}$ นิ้ว (35 มม.) มาตัดทางฟิล์มออกทั้งสองข้าง เพื่อให้ม้วนฟิล์มเคลื่อนที่ได้ในกล้อง จนกระทั่งปี 1924 ได้มีการประดิษฐ์กล้องขนาดเล็กสำหรับฟิล์ม 35 มม. เพื่อใช้ในการบันทึกภาพนิ่งซึ่งเป็นกล้องขนาด 35 มม. ที่นิยมใช้กันเรื่อยมา การถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์มนั้น ภาพที่ออกมาในช่วงแรก ๆ จะเป็นภาพขาวดำ ซึ่งพัฒนาเรื่อยมาจนกลายเป็นภาพสี การล้างและอัดภาพนั้นต้องอาศัยร้านล้างอัดภาพ แม้ว่าการถ่ายภาพด้วยกล้องฟิล์มนั้นจะสามารถบันทึกภาพได้ปริมาณมากกว่าในอดีต แต่ยังคงมี

ข้อจำกัด เนื่องจากฟิล์มม้วนหนึ่งสามารถถ่ายภาพได้มากที่สุดไม่เกิน 38 ภาพต่อม้วน และไม่สามารถถ่ายได้ในทุกสภาพแสง เพราะถูกจำกัดด้วยชนิดของฟิล์ม กว่าที่จะได้เห็นภาพที่ถ่ายเป็นอย่างไร ใช้ได้หรือไม่ ต้องไปผ่านขบวนการล้างอัดภาพตามร้านเสียก่อน เนื่องจากเหตุการณ์บางอย่างเป็นเหตุการณ์สำคัญ อาจเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว กว่าที่จะพบว่าภาพที่ถ่ายออกมาเสีย ก็ไม่สามารถจะย้อนกลับไปถ่ายใหม่ได้แล้ว

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีต่าง ๆ ได้พัฒนาไปมาก คอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันทุกสาขาอาชีพ โปรแกรมซอฟต์แวร์ได้ถูกคิดค้นพัฒนาออกมามากมาย เทคโนโลยีการถ่ายภาพได้ถูกพัฒนาเข้าสู่ระบบดิจิทัล โดยการแปลงภาพที่ผ่านเลนส์เข้ามาเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยไม่ต้องใช้ฟิล์ม สามารถชมภาพที่บันทึกได้ทันทีจากหน้าจอกล้อง ทำให้เห็นภาพที่ถ่ายในทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลาไปผ่านขบวนการล้างอัดแบบกล้องฟิล์ม สามารถลบภาพที่ไม่ต้องการและถ่ายใหม่ได้ ที่สำคัญคือ ถ่ายภาพได้จำนวนหลายร้อยรูป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดหน่วยความจำและถ่ายภาพได้ทุกสภาพแสงโดยสามารถเลือกปรับฟังก์ชันตามต้องการในโปรแกรมของกล้อง สามารถโอนข้อมูลลงเก็บเป็นไฟล์ภาพในคอมพิวเตอร์ และนำมาแก้ไขตกแต่งภาพได้ในภายหลัง ทั้งนี้เนื่องจากกล้องดิจิทัลได้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า ตัวรับภาพ (Image sensor) ช่วยในการบันทึกภาพลงหน่วยความจำแทนการบันทึกภาพลงบนฟิล์ม

การทำงานของกล้อง[24,41]

หากเปรียบเทียบกล้องถ่ายภาพกับดวงตาพบว่ามีส่วนคล้ายคลึงกันหลายประการ โดยการมองภาพนั้นอาศัยเลนส์ที่อยู่ทางด้านหน้าเมื่อแสงตกกระทบวัตถุสะท้อนกลับมายังเลนส์ เลนส์จะทำหน้าที่รับแสงและปรับความคมชัดของภาพ โดยมีไดอะแฟรมทำหน้าที่ปรับขนาดรูรับแสงเพื่อควบคุมปริมาณแสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกล้อง เมื่อทำการถ่ายภาพโดยกดชัตเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการเปิด-ปิดหน้ากล้อง เพื่อกำหนดระยะเวลาในการรับแสง นั่นคือเมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุจะสะท้อนเข้าสู่กล้อง ผ่านเลนส์ซึ่งทำหน้าที่รวมแสงเหล่านั้นให้ตกบนตัวรับภาพ ปริมาณของแสงที่ผ่าน ฟิลเตอร์สี (color filter) แล้วตกบนแต่ละตัวรับภาพ ก็จะแตกต่างกันออกไป ตัวรับภาพนี้ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอด (photodiodes) จำนวนมากทำหน้าที่เปลี่ยนแสงสีเหล่านี้ไปเป็นประจุอิเล็กตรอน (electrical pulses) เพื่อบ่งบอกค่าของแสงสีนั้น ๆ ยิ่งปริมาณแสงมากประจุกิ่งมาก ซึ่งจะประมวลผลและถูกเปลี่ยนไปเป็นข้อมูลดิจิทัล (digital information) ด้วยการทำงานของหน่วยประมวลผล (ADC chip : Analog to Digital Converter) ข้อมูลดิจิทัลเหล่านี้ถูกนำไป

เก็บไว้ในหน่วยความจำภายในกล้องในรูปแบบของไฟล์รูปภาพ (picture files) ซึ่งสามารถเปิดดูภาพได้ทางจอ LCD (Liquid Crystal Display)

ตัวรับภาพ หรือ Image sensor[42] เป็นอุปกรณ์สำคัญชิ้นหนึ่งในกล้องดิจิทัล ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณภาพดิจิทัล ตัวรับภาพที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ CCD (Charge Coupled Device) ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดจำนวนมากมาเป็นล้านวงเรียงกันอย่างเป็นระเบียบบนชิพ CCD เหมือนตารางหมากรุก ทำหน้าที่รับแสงซึ่งโฟโตไดโอดแต่ละตัวก็คือแต่ละพิกเซล ยิ่งจำนวนพิกเซลมากเท่าไรก็จะยิ่งถ่ายทอดรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากโฟโตไดโอดบน CCD นั้นมีคุณสมบัติในการรับรู้ระดับความสว่าง ความเข้มของแสงเท่านั้น จึงเก็บบันทึกรายละเอียดของแสงในลักษณะโทนขาว-ดำ การที่จะได้รายละเอียดของแสงออกมาเป็นสีได้นั้น จึงต้องมีการนำฟิลเตอร์สีมาวางบนตัวรับภาพ เพื่อให้ได้แสงสีตามที่ต้องการ ลักษณะของฟิลเตอร์สีที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ ฟิลเตอร์ RGB ประกอบไปด้วยสีหลัก 3 สี คือ แดง เขียว น้ำเงิน เรียงตัวสลับกันเป็นตาราง โดยเซลล์รับแสง 1 เซลล์ จะมีฟิลเตอร์บังได้เพียงหนึ่งสีเท่านั้น ดังนั้น ข้อมูลสีจะแสดงผลออกมาเป็นเช่นใดนั้น ขึ้นอยู่กับสีหลัก (RGB) บนฟิลเตอร์ และภาพที่ได้เกิดจากการนำข้อมูลสีในแต่ละสีมาผสมกันโดยการทำงานของซอฟต์แวร์ในกล้องก่อให้เกิดภาพสีบนหน้าจอ

ปัจจุบันมีการพัฒนารูปแบบของ CCD เพื่อให้ภาพถ่ายที่ออกมามีคุณภาพ[43] เช่น 4-color CCD เป็น CCD รูปแบบใหม่ของบริษัท Sony โดยการเพิ่มสีที่เรียกว่า Emerald (E) ซึ่งเป็นสีที่ใกล้เคียงธรรมชาติลงไป ทำให้สีของภาพที่ออกมาสมจริงมากขึ้น ลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์รับแสง (4-color CCD) จะเหมือนกับการเรียงตัวของ CCD ในกล้องดิจิทัลโดยทั่วไป คือ CCD ของกล้องส่วนใหญ่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมและจัดเรียงเป็นแบบตารางหมากรุก คือ ต่อกันในแนวนอน 0 องศา และ 90 องศาในแนวตั้ง จะมีแต่กล้องยี่ห้อ FujiFilms ที่สร้าง CCD เป็นรูปแปดเหลี่ยม และจัดเรียงตัวในแนว 45 องศาคล้ายรังผึ้ง เรียก CCD ลักษณะนี้ว่า Super CCD[27] ซึ่งบริษัท FujiFilms อ้างว่า เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง เนื่องจากการจัดวางในลักษณะรังผึ้งนี้ทำให้โฟโตไดโอดมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงดูดกลืนแสงที่สะท้อนจากวัตถุได้มากขึ้น ประกอบกับระยะห่างระหว่างเซลล์ในแนวตั้งและแนวนอนลดลง จึงทำให้เก็บรายละเอียดของภาพและแสงสีได้ดี ภาพจึงมีความละเอียดมากขึ้น (resolution) กว่าเดิมถึง 60% หรือเป็น 1.6 เท่าของ CCD ทั่วไป[41] แต่จากการใช้งานของผู้ใช้ทั่วไป ประกอบกับการทดสอบเปรียบเทียบกับกล้องต่าง ๆ ตามเว็บไซต์ [41] พบว่า คุณภาพของภาพไม่ได้ดีตามนั้นจริง เนื่องจากภาพที่บันทึกจาก super CCD จะต้องถูกจัดเรียงใหม่เป็นแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งต้องประมวลผลรวมอีกครั้ง ทำให้คุณภาพของภาพที่ได้ลดลงไปมากพอควร อีกทั้งเทคโนโลยีของ FujiFilms ที่พัฒนามาจาก super CCD คือ super

CCD SR โดยการเพิ่มโฟโตไดโอดเป็นสองตัวเพื่อเพิ่มการทำงานของ CCD ให้สามารถจับรายละเอียดของแสงได้มากขึ้น ทำให้ภาพที่ออกมามีระดับแสงสมจริงมากที่สุด

นอกจาก CCD แล้ว CMOS (Complementary Metal –Oxide Semiconductor) เป็นตัวรับภาพ อีกประเภทหนึ่งทำมาจาก metal-oxide ซึ่ง Canon ได้นำมาพัฒนาจนคุณภาพใกล้เคียง CCD แต่ยังไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร คุณสมบัติเด่นของ CMOS คือ กินไฟต่ำและราคาถูก อย่างไรก็ตาม ตัวรับภาพ รุ่นใหม่ ๆ ที่ถูกพัฒนาจนโดดเด่นด้านความสามารถในการรับแสง คือ Foveon X₃ [44] ในกล้อง Sigma SD10 เนื่องจากปกติการรับแสงของ CCD และ CMOS นั้น สามารถรับแสงได้พิกเซลละหนึ่งสี ส่วนอีกสองสีได้จากการคำนวณโดยการเฉลี่ยข้อมูลสีของพิกเซลใกล้เคียง แต่ Foveon X₃ นั้นสามารถรับแสงสี RGB ได้ในพิกเซลเดียวกัน จึงทำให้ภาพที่ออกมามีความคมชัดมากกว่า การทำงานของ Foveon X₃ จะเลียนแบบการทำงานของฟิล์มโดยจัดเรียง พิลเตอร์สี RGB ในลักษณะเป็นเลเยอร์ เมื่อแสงผ่านเข้ามา พิลเตอร์สีทั้งสามสีจะรับแสงได้พร้อมกัน ทำให้แสงสีที่ออกมาเป็นสีวัตถุทันทีโดยไม่ต้องอาศัยการคำนวณสีจากจตุรรอบข้างเหมือน CCD ดังนั้น ทำให้ความเร็วในการบันทึกภาพเคลื่อนไหวสูงขึ้นตามไปด้วย[37]

ชนิดและลำดับจัดเรียงของสีของฟิลเตอร์สีมีผลต่อคุณภาพด้านความคมชัด และความถูกต้องของสี กล้องส่วนใหญ่จะจัดเรียงฟิลเตอร์แบบ RGB อย่างไรก็ตาม กล้องบางยี่ห้อ เช่น Canon Powershot G₁, A₅, Pro 70 ใช้ฟิลเตอร์สี C (Cyan), M (Magenta), Y (Yellow)

ความละเอียดของภาพ (Image Resolution) [44] ขึ้นอยู่กับจำนวนพิกเซลที่ประกอบกันขึ้นจนเป็นภาพ ยิ่งจำนวนพิกเซลของภาพมีมากเท่าไร ภาพยิ่งมีความละเอียดมากขึ้นเท่านั้น นั่นคือ จำนวนพิกเซลบน ตัวรับภาพ ในกล้องตัวนั้น ก็ต้องมากตามไปด้วย จำนวนพิกเซลบนตัวรับภาพมีผลอย่างยิ่งต่อคุณภาพของภาพในด้านรายละเอียดและความคมชัด เนื่องจากกล้องที่มีจำนวน พิกเซลบนตัวรับภาพมากกว่าย่อมสามารถบันทึกรายละเอียดของภาพได้มากกว่า กล้องส่วนมากจะบอกค่าความละเอียดของภาพมากกว่าหนึ่งค่า เรียงจากค่ามากที่สุดไปยังค่าน้อยสุด ค่าที่มากที่สุดที่ระบุไว้เป็นค่าความละเอียดสูงสุดที่กล้องตัวนั้นสามารถบันทึกได้ ส่วนค่านี้น้อยลงมาเกิดจากการลดจำนวนของหน่วยประมวลผลภาพ ทำให้ข้อมูลภาพน้อยลง จึงประหยัดพื้นที่หน่วยเก็บข้อมูล ซึ่งค่าความละเอียดจะแสดงในลักษณะจำนวนพิกเซลด้านยาวคูณจำนวนพิกเซลด้านกว้าง เช่น 1280x960 พิกเซล เมื่อคูณกันจะได้ค่าความละเอียด 1,228,800 พิกเซล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2288 เมกะพิกเซล นั่นเอง

เราสามารถจัดกลุ่มกล้องดิจิทัลตามความละเอียดได้เป็น 4 ระดับคือ

1. ระดับความละเอียดต่ำมาก โดยที่กล้องกลุ่มนี้มีจำนวนพิกเซลไม่ถึง 3 แสนพิกเซล ที่พบเห็นกันทั่วไปคือ web camera หรือ toy camera
2. ระดับความละเอียดต่ำ โดยที่กล้องกลุ่มนี้มีจำนวนพิกเซลประมาณ 3 แสน ถึง 1.5 ล้านพิกเซล
3. ระดับความละเอียดปานกลาง โดยที่กล้องกลุ่มนี้มีจำนวนพิกเซลประมาณ 2.1-4 ล้านพิกเซล
4. ระดับความละเอียดสูง กล้องกลุ่มนี้มีจำนวนพิกเซลมากกว่า 4 ล้านพิกเซล

ทั้งนี้ การจะเลือกใช้กล้องระดับใดขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานเป็นหลัก คุณภาพของภาพ เนื้อที่ในการจัดเก็บ ราคา ฯลฯ

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของภาพ ได้แก่ ความละเอียดของตัวรับภาพ การจัดเรียงตัวของโฟโตไดโอด ชนิดและการจัดเรียงของฟิลเตอร์ นอกจากนี้ ยังมีตัวซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ การปรับสมดุลสีขาว (white balance) การปรับความคมชัด (sharpness) ความอิ่มตัวของสี (saturation) การลดสัญญาณรบกวน (noise reduction) ซึ่งกล้องราคาถูกลงซอฟต์แวร์มักจะทำการปรับทุกอย่างได้โดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามกล้องที่มีคุณภาพสูงขึ้น ผู้ใช้สามารถปรับรายละเอียดการทำงานของซอฟต์แวร์ได้บ้างตามสภาพแสงและวัตถุที่ถ่าย ปัจจัยสุดท้ายที่มีผลต่อคุณภาพของภาพ คือ เลนส์ กล้องดิจิทัลระดับมืออาชีพอาจจะสามารถถอดเปลี่ยนเลนส์ได้ แต่กล้องดิจิทัลโดยทั่วไปที่ถอดเปลี่ยนเลนส์ไม่ได้มักมีเลนส์ที่สามารถเปลี่ยนความยาวโฟกัสได้ หรือเราเรียกกันว่า เลนส์ซูม ซึ่งเป็นการซูมภาพจากเลนส์ของกล้องจริง ๆ โดยการเคลื่อนที่ของเลนส์เพื่อปรับระยะใกล้-ไกลตามที่เราต้องการ ทำให้เราไม่ต้องเดินเข้าออกระหว่างการถ่ายภาพ เรียกการซูมลักษณะนี้ว่า การซูมภาพแบบออฟติคัล (Optical zoom) แต่สิ่งที่ควรระวังคือกล้องบางรุ่นสามารถทำการซูมภาพแบบดิจิทัล (Digital zoom) ได้ด้วย ซึ่งเป็นการซูมที่เกิดจากการทำงานของซอฟต์แวร์ในกล้องดิจิทัล โดยทำการซูมผ่านจอ LCD หลังจากถ่ายภาพเรียบร้อยแล้ว แต่ภาพที่ได้จะใหญ่ขึ้น หากแต่มีความคมชัดลดลง กล้องบางรุ่น เช่น Nikon Coolpix ได้เพิ่มความสามารถให้กับเลนส์โดยเป็นเลนส์ถ่ายใกล้ได้ด้วย ซึ่งสามารถถ่ายใกล้ได้ถึง 1 นิ้ว

Photoshop เป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยบริษัท Adobe (อะ-โด-บี) ใช้ในการตกแต่งภาพถ่าย และสร้างงานกราฟิก การนำข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้งานนั้น อาจทำได้โดยผ่านเครื่องสแกนเนอร์ หรือ เชื่อมต่อจาก

กล้องดิจิตอลโดยตรง โหมดสีในโปรแกรม Photoshop นั้น ส่วนหนึ่งถูกกำหนดขึ้นตามโมเดลสีมาตรฐาน (Color model) รูปภาพสีในคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปอยู่ในโหมด RGB แต่มีบางกรณีที่เป็นโหมด CMYK หรืออื่น ๆ ซึ่งโหมดสีเหล่านี้ มีความแตกต่างกันของสีที่นำมาผสมกันเป็นรูปภาพ และเหมาะกับงานแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน ภาพในโหมด RGB เหมาะกับงานที่นำเสนอบนจอคอมพิวเตอร์ ภาพในโหมด CMYK เหมาะกับงานที่ต้องส่งพิมพ์ ดังนั้น การเลือกใช้โหมดสีใด ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งานด้วย

แสงกับการถ่ายภาพ[46]

การถ่ายภาพ เป็นขบวนการเปิดรับแสงให้เข้ามาสู่ฟิล์ม หรือ ตัวรับภาพ โดยผ่านกลไกต่าง ๆ เพื่อควบคุมปริมาณแสงที่ผ่านเข้ามา ซึ่งระบบในการถ่ายภาพนั้น นักถ่ายภาพสามารถควบคุมปริมาณแสงให้ผ่านเข้ามาในกล้องได้สองทาง คือ โดยการปรับช่องรับแสง (Aperture) และความไวชัตเตอร์ (Shutter) ถ้าขนาดของช่องรับแสงกว้างแสงจะผ่านเข้ามาในกล้องได้มาก แต่ถ้ารูรับแสงแคบ แสงจะผ่านเข้ามาในกล้องได้น้อย ส่วนความไวชัตเตอร์ เป็นตัวบ่งบอกระยะเวลาเปิดรับแสงของกล้องว่าจะเปิดให้แสงผ่านเข้ามาภายในระยะเวลาเท่าใด การเลือกขนาดของช่องรับแสงและความไวชัตเตอร์ที่เหมาะสมกับสภาพแสงที่กำลังจะถ่ายภาพก็คือ “การวัดแสง” นั่นเอง โดยเครื่องมือในการวัดแสงที่ติดตั้งอยู่ภายในกล้องจะทำให้ผู้ถ่ายภาพทราบว่า ค่าแสงของภาพที่กำลังจะบันทึกมีค่าเท่าใด เพื่อนำไปปรับจนได้ค่าแสงที่พอดีกับภาพที่ต้องการถ่าย

เครื่องวัดแสง (Light meter) [46] ในยุคแรกของการถ่ายภาพมีลักษณะเป็นมือถือ ทำงานโดยการเปลี่ยนสีของกระดาษไวแสงจากสีขาวเป็นสีเทา เมื่อเปิดช่องให้แสงเข้ามากระทบกับกระดาษ จากนั้นคำนวณระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดให้กระดาษถูกแสงเพื่อหาค่าแสงที่จะใช้ในการบันทึกภาพ ต่อมาในปี 1930 มีการนำเซลล์ไวแสง (light sensor) มาใช้โดยเซลล์ไวแสงรุ่นแรกเป็น ซิลิเนียมเซลล์ ทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า กระตุ้นให้เข็มวัดแสงแสดงผลค่าแสงที่วัดได้ เซลล์ชนิดนี้มักติดอยู่นอกตัวกล้อง ต่อมาเซลล์ไวแสงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็น แคลดเมียมซัลไฟด์ (Cds) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกล้อง SLR สามารถวัดแสงธรรมชาติได้ แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถวัดแสงสะท้อนจากแฟลชได้ ในสภาวะที่มีแสงน้อยการทำงานของเซลล์ไวแสงจะช้าลง ส่วนในภาวะที่มีแสงน้อยเกินหรือมากเกินไป การวัดแสงจะให้ผลที่มีความผิดพลาดมาก และหากสภาพแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น วัดแสงในที่มืดแล้วไปวัดในที่สว่างทันที หรือ จากที่สว่างแล้วไปที่มืดทันที ต้องรอให้เซลล์ไวแสงมีการปรับตัวเสียก่อน ปัจจุบันได้มีการปรับเปลี่ยนเซลล์ไวแสงมาใช้ ซิลิกอนโฟโตไดโอด (Silicon Photo Diode) หรือ SPD cell ซึ่งเป็นเซลล์ไวแสงที่ใช้กันอยู่ใน

ปัจจุบัน ข้อดีของเซลไวแสงชนิดนี้ คือ มีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งอยู่ภายในตัวกล้อง ตอบสนองต่อแสงไวมาก และสามารถทำการวัดแสงแม้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแสงอย่างรวดเร็วได้ เครื่องวัดแสงที่อาศัยการทำงานของเซลไวแสงแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ เครื่องวัดแสงชนิดมือถือ และเครื่องวัดแสงที่ติดตั้งภายในตัวกล้อง โดยลักษณะการทำงานยังแบ่งออกเป็น วัดแสงที่ตกกระทบลงมาบนวัตถุ (Incident light meter) หรือ วัดแสงที่สะท้อนกลับจากวัตถุ (Reflected light meter) ส่วนมากแล้วเครื่องวัดแสงที่ติดตั้งอยู่ภายในกล้องถ่ายภาพในปัจจุบันนี้จะเป็นเครื่องวัดแสงที่วัดแสงสะท้อนกลับจากวัตถุ

แม้ว่าเซลไวแสงจะทำหน้าที่วัดแสงได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่เครื่องวัดแสงของกล้องเกือบทั้งหมดจะวัดแสงสะท้อนออกมาเป็นค่าเฉลี่ย โดยจะเปรียบเทียบค่าแสงที่วัดได้กับค่ามาตรฐานทางอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ[43,46] คือ ค่าการสะท้อนแสงของวัตถุที่ 18% ซึ่งหมายความว่าหากวัตถุรับแสงไป 100 ส่วน จะสะท้อนกลับออกมา 18 ส่วน โดยกล้องจะยึดถือค่านี้เป็นค่ากลางเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสภาพแสงในขณะนั้นกับค่ากลางดังกล่าว ดังนั้น หากวัตถุที่เราต้องการถ่าย มีค่าการสะท้อนแสงมากกว่าหรือน้อยกว่าค่ากลาง 18% กล้องจะปรับการรับแสงจากปกติเพื่อให้ได้ค่าแสงที่ 18 % ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้คือวัตถุมีสีที่ผิดเพี้ยนไปจากเดิม ดังนั้น เพื่อให้ภาพที่บันทึกออกมามีความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีการชดเชยแสงให้กับวัตถุ อุปกรณ์ที่ช่วยในการวัดแสงสะท้อนเพื่อให้การวัดแสงเป็นไปอย่างถูกต้องที่สุด คือ กระดาษสีเทากลาง หรือ Grey Card ซึ่งจะให้ค่าการสะท้อนแสงที่เครื่องวัดแสงสามารถอ่านค่าแสงสะท้อนจากกระดาษแผ่นนี้ได้อย่างพอดี เนื่องจากสีของกระดาษจะเป็นสีเทา 18% เครื่องวัดแสงภายในตัวกล้องจึงอ่านค่าเฉลี่ยของสีได้ 18% ทุกครั้ง จึงสามารถนำค่าของช่องรับแสงและความไวชัตเตอร์ที่วัดแสงได้ในฉากนั้นถ่ายภาพได้ทันที โดยไม่ต้องชดเชยแสงอีก

โมเดลสี (Color Model) [43,45]

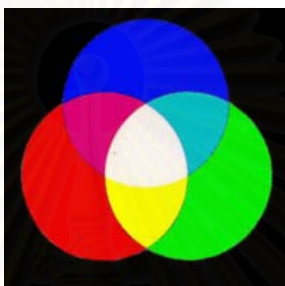
เป็นระบบที่ใช้แทนค่าสี ที่ใช้กันโดยทั่วไป มี 4 ระบบ คือ

1. RGB
2. CMYK
3. CIE L*a*b*
4. HSB

โดยระบบสี RGB และ CMYK นั้นได้จากการผสมกันของสีหลัก 3 สี เพียงแต่ระบบสี RGB เกิดขึ้นจากการผสมสีแบบบวก (additive color mixing) ส่วนระบบสี CMYK เกิดขึ้นจากการผสมสีแบบลบ (subtractive color mixing)

RGB

เป็นระบบที่เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างสีของแสงที่เป็นแม่สีหลัก (primary color) เข้าด้วยกัน คือ แสงสีแดง (Red) แสงสีเขียว (Green) และแสงสีน้ำเงิน (Blue) ผลจากการผสมทำให้เกิดเป็นสีใหม่ เรียกว่า แม่สีรอง (secondary color) ได้แก่ สีฟ้า (cyan) สีม่วงแดง (magenta) สีเหลือง (yellow) และหากสีหลักทั้งสามที่มีความเข้มสูงสุดผสมเข้าด้วยกันจะได้เป็นแสงขาว จึงเรียกวิธีการนี้ว่า การผสมสีแบบบวก (additive color mixing)



รูปที่ 4 แสดงการผสมสีแบบบวก

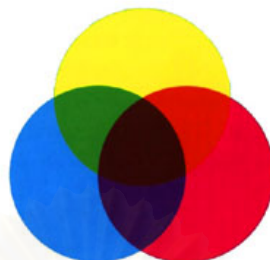
จากระบบสี RGB หรือระบบการผสมสีแบบบวก ได้นำมาสร้างเป็นฟิลเตอร์สี เพื่อให้แสงขาวถูกกรองออกมาเป็นสีหลัก 3 สี นอกจากนี้ เรายังพบเห็นการทำงานโดยใช้ระบบสี RGB ได้จากจอภาพคอมพิวเตอร์และจอโทรทัศน์

จอคอมพิวเตอร์มีหลักการทำงานแบบเดียวกับจอโทรทัศน์โดยจะมีกระแสไฟฟ้าแรงสูง (high voltage) กระตุ้นให้อิเล็กตรอนภายในหลอดภาพแตกตัว โดยที่อิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดลำแสงอิเล็กตรอนไปกระตุ้นผลึกฟอสฟอรัสที่ฉาบอยู่บนหลอดภาพ เมื่อฟอสฟอรัสถูกกระตุ้นจากอิเล็กตรอน จะเกิดการเรืองแสงและปรากฏเป็นจุดสีต่างๆ (RGB color) รวมเป็นภาพบนจอภาพนั่นเอง (ใน Photoshop แต่ละสี (R,G,B) มีค่าตั้งแต่ 0-255 ซึ่งเมื่อผสมทั้งสามสีด้วยกันในระดับ 255 ก็จะทำให้ได้สีขาว แต่ถ้าผสมกันที่ระดับ 0 ทุกสีก็จะได้สีดำ หากผสมทุกสีในระดับเท่า ๆ กัน จะได้สีเทา)

CMYK

เป็นการผสมกันของเม็ดสี ได้แก่ สีฟ้า (cyan) สีม่วงแดง (magenta) และสีเหลือง (yellow) ทำให้ได้แม่สีบวกคือ สีแดง (red) สีเขียว (green) สีน้ำเงิน (blue) และเมื่อนำสีหลักทุก

สีที่มีความเข้มสูงสุดมาผสมกันจะได้เป็นสีดำ เรียกการผสมสีแบบนี้ว่า การผสมสีแบบลบ (subtractive color mixing)



รูปที่ 5 แสดงการผสมสีแบบลบ

เราพบการผสมสีแบบลบได้จากสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ สีทาบ้าน และในกล่องดิจิตอลบางรุ่นที่นำระบบการผสมสีแบบนี้มาสร้างพิกเซลสี เพื่อกรองแสงขาวออกมาเป็นสีหลัก 3 สี ในทางทฤษฎีสามารถนำสี CMY มาผสมกันได้สีดำ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสีทั้งสามกลับผสมกันได้เพียงสีน้ำตาลเข้มเท่านั้น ดังนั้น เพื่อให้ได้สีดำที่สนิท ในระบบการพิมพ์จึงเพิ่มหมึกสีดำมาผสมด้วยอีกสีหนึ่ง สีดำจึงเป็นสีที่ 4 และใช้ตัวย่อ “K” แทน (ใน Photoshop โหมดสี CMYK แต่ละพิกเซลจะประกอบด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของแต่ละสีหมึกพิมพ์โดย 0 % แทนค่าสีอ่อนสุด 100 % แทนค่าสีเข้ม)

CIE L* a* b*

เป็นระบบสีที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อเป็นมาตรฐานในการวัดค่าสีโดยไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ใด ๆ นำเสนอโดย Commission Internationale d' Eclairage (CIE) ตั้งแต่ปี 1939 (สำหรับใน photoshop สีโหมด L*a*b* ถูกใช้เป็นตัวกลางในการแปลงสีจากโหมดหนึ่งไปเป็นอีกโหมดหนึ่ง โดยส่วน L มีระดับตั้งแต่ 0-100 a และ b มีระดับตั้งแต่ +120 ถึง -120)

HSB

เป็นรูปแบบการมองเห็นสีของสายตามนุษย์ ซึ่งแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- Hue คือ สีที่สะท้อนออกมาจากวัตถุเข้าสู่ดวงตา ซึ่งเราเรียกสีตามที่เราเห็น เช่น แดง เขียว เหลือง
- Saturation คือ ความบริสุทธิ์ของสี จะบอกถึงสัดส่วนสีเทาที่ผสมอยู่ในสีหลัก (Hue)
- Brightness คือ ระดับความสว่างของสี มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 0-100 โดย 0% สว่างน้อยสุดจะได้สีดำ ส่วน 100% สว่างมากที่สุดจะได้สีตามที่กำหนดโดยค่า Hue และ Saturation

สีในระบบหนึ่งอาจมีสีไม่ครอบคลุมอีกระบบหนึ่ง เรียกสีที่อยู่ในขอบเขตของระบบในระบบหนึ่งว่า Gamut ของระบบสีนั้น ๆ ระบบสีที่มี Gamut กว้างขวางมากที่สุดคือ $L^*a^*b^*$ รองลงมาคือ RGB และ CMYK ตามลำดับ

จากงานศึกษาของ Bentley และคณะ[13] มีการนำเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์และภาพถ่ายมาใช้ประเมินการเปลี่ยนสีภายหลังการฟอกสีฟัน โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องฟิล์ม 35 มม.(Dental Eye-II,Yashica) และใช้แสงจากไฟแฟลชวงแหวนอัตโนมัติ (automatic ring-light electronic flash) จากนั้นนำภาพถ่ายมาสแกนใส่คอมพิวเตอร์ (Apple PowerMac7100AV) โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop ประเมินสีด้วยโหมดสี RGB และ CIE $L^* a^* b^*$ พบว่าโปรแกรมสามารถใช้ศึกษาการเปลี่ยนของสีได้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์สีในทางดิจิทัลยังช่วยกำจัดปัจจัยรบกวนต่อการอ่านค่าสีด้วยตา และยังให้ข้อมูลที่แน่นอนต่อแล็บในการทำสิ่งบูรณะอีกด้วย

โดยปกติแล้วการสื่อสารระหว่างทันตแพทย์กับช่างทันตกรรมจะกระทำผ่านทางใบสั่งงานที่ถูกเขียนด้วยลายมือโดยทันตแพทย์จะจดบันทึกสิ่งที่ต้องการลงไปใบสั่งงานด้วยวัตถุประสงค์ที่จะให้ช่างทำสิ่งบูรณะออกมาได้ตรงตามความต้องการมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องสี การสื่อสารผ่านตัวหนังสือเพียงอย่างเดียว อาจไม่เพียงพอ ประกอบกับช่างทันตกรรมไม่เห็นช่องปากผู้ป่วย ดังนั้น สีที่ได้ อาจมีการผิดเพี้ยนไป ภาพถ่ายจึงเข้ามามีบทบาทโดยเทคนิคการถ่ายภาพที่ดีช่วยให้ช่างทันตกรรมได้รับข้อมูลที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น[47] จากการศึกษาของ Culpepper[15] ในปี 1970 พบว่า ขณะถ่ายภาพไม่ควรวางกล้องตั้งฉาก แต่ควรทำมุมกับชุดเทียบสีฟันเพื่อลดแสงสะท้อนจากไฟแฟลช และเพื่อการลดปริมาณแสงสะท้อนให้น้อยที่สุด หน้ากล้องควรเอียงทำมุมกับระนาบตั้งฉากกับวัตถุในแนวขึ้นบนหรือลงล่างมากกว่า 30 องศา และใช้กระดาษสีเทากลางซึ่งให้ค่าการสะท้อนแสง 18% เป็นพื้นหลัง

Fondriest[16] กล่าวว่า ภาพถ่ายที่ดีที่สุด คือภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้อง 35-mm slides หรือกล้องดิจิทัลชนิดสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยว (single-lens reflex) โดยใช้เลนส์มาโครทางยาวโฟกัส 90-115 มม. สำหรับไฟแฟลชอาจใช้เป็น dual-point flash หรือแฟลชแบบวงแหวนก็ได้

Dancy และคณะ[17] ทำการเปรียบเทียบวิธีการเลือกสีฟัน 2 วิธี โดยสุ่มผู้ป่วยจำนวน 20 คน มาทำการเลือกสีฟันด้วยวิธีวัดสีด้วยตา และผู้ป่วยอีก 20 คน เลือกสีฟันด้วยวิธีการถ่ายรูปฟัน (ด้วยกล้อง Nikon90s) ที่จะบูรณะกับแถบเทียบสีฟัน (Vita® shade guide) ที่ถูกเลือกไว้สีใกล้เคียง 4 สี ด้วยฟิล์มสไลด์ (Kodak Elitechrome100) นำภาพที่ถ่ายได้ไปอ่านค่าสีด้วยเครื่อง

คัลเลอร์มิเตอร์ (Colortron II) คำนวณหาค่า ΔE สีที่ถูกเลือกต้องมีค่า ΔE ระหว่างพื้นกับ shade tab น้อยที่สุด ผู้ป่วยแต่ละคนจะถูกเทียบสีภายใต้สภาวะแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์สองยังวัตถุ ในระยะที่มีความห่างจากแสงที่ส่องผ่านช่องหน้าต่าง โดยจะนำข้อมูลที่ได้ส่งให้แล็บทำครอบฟัน ครอบฟันที่ได้ถูกนำมาเทียบกับฟันข้างเคียงว่าสีที่ออกมาเป็นที่ยอมรับแก่ผู้ป่วยและผู้สังเกตหรือไม่ ผลการทดลองสรุปว่า วิธีการเลือกสีทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเขายังแนะนำว่าการเลือกสีฟันด้วยการถ่ายภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าเชื่อถือสำหรับผู้ที่มีอุปสรรค หรือไม่มั่นใจในการเลือกสี

Call[4] ประเมินสีระหว่างชุดเทียบสีฟันปลอมที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันว่ามีความน่าเชื่อถือหรือไม่โดยนำโปรแกรม Adobe Photoshop เวอร์ชัน 4.0 มาใช้ในการวิเคราะห์สีจากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล (Olympus Camedia C-2500-L) การศึกษานี้ใช้ชุดเทียบสีฟันปลอมยี่ห้อ Chromascop® จำนวน 3 แผง ถ่ายรูปด้วยกล้องดิจิทัลในแนวตั้งฉาก ระยะห่าง 40 เซนติเมตร ณ เวลา 11.00 น. ภายใต้แสงแดดทางทิศเหนือ และในห้องสตูดิโอที่มีฉากหลังสีกลาง (neutral color) ภายใต้แสงไฟจากแฟลชขนาด 600 วัตต์ จำนวน 2 อัน และแสงไฟจากซอฟท์บ็อก (soft box) ขนาด 600 วัตต์ 1 อัน โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop เวอร์ชัน 4.0 วิเคราะห์สีจากภาพถ่ายโดยดูจากค่า L, RGB ผลการทดลองพบว่า โปรแกรม Adobe Photoshop ใช้ในการวิเคราะห์สีได้แต่ ชุดเทียบสีฟันปลอมที่ผลิตออกมาจากบริษัทเดียวกันในแต่ละแผงขาดความแม่นยำของสี ซึ่งในช่วงท้ายเขาอธิบายว่า สีที่ต่างไปในแต่ละชุดเทียบสี ไม่สามารถอ้างว่าเกิดจากการผลิตอย่างเดียวกันนั้นแต่อาจเกิดจากจีโอเมทริก (geometric) และ สเปคตรัลเมตาเมอริซึม (spectral metamerism) ที่ทำให้สีเพี้ยนไป

เนื่องจากปลายฟันมีลักษณะที่โปร่งแสงทำให้เห็นสีของพื้นหลังได้ และบริเวณคอฟันมีความเข้มของสี/ความทึบมากกว่าตัวฟันเอง ดังนั้น การวิเคราะห์ค่าสีจากชุดเทียบสีฟันปลอมในการทดลองส่วนมากจึงยึดบริเวณส่วนกลางฟันแทน[48]

สำหรับโปรแกรม Photoshop นั้น นอกจากจะใช้ประเมินการเปลี่ยนสีในฟันธรรมชาติและพอร์ซเลนแล้ว ยังสามารถใช้ประเมินสีของวัสดุประเภทอื่นได้อีกด้วย โดย Villar และ คณะ[18] ใช้โปรแกรมดังกล่าว เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุฐานฟันปลอมแบบอ่อนนุ่ม (soft liner) จากภาพที่ถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพแบบวิดีโอ (model MTI-3) โดยใช้ RGB, L* a* b*

Dozic และคณะ[14] ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กล้องดิจิทัล (camedia C-2040 zoom,Olympus) ประเมินการกระจายของสีบนพื้นธรรมชาติที่ยังมีชีวิตบนส่วนคอพื้น กลางพื้น และปลายพื้น ภายใต้แสงจากแฟลชแบบวงแหวน (Minolta 80PX Macro Flashgun) โดยค่า L^* a^* b^* และหาความแตกต่างสีในแต่ละส่วนด้วย ΔE ผลการวิจัยพบความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่า L^* , b^* ตลอดทั้งสามส่วนบนพื้น และสามารถหาค่า L^* , b^* ในส่วนคอพื้น และปลายพื้นได้จากการคำนวณค่าในส่วน กลางพื้น ส่วนค่า a^* แทบไม่มีความสัมพันธ์กับแต่ละส่วนเลย เขายังได้กล่าวถึงกล้องดิจิทัลว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ง่าย ราคาถูก และเป็นเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการประเมินสีได้โดยไม่มีความจำเป็นต้องสัมผัสกับวัตถุอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุอุปกรณ์

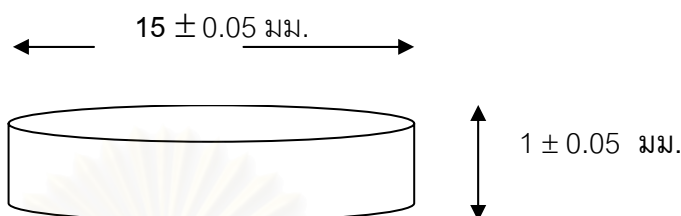
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบโลหะสำหรับเตรียมชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร
2. ผงพอร์ซเลนเนื้อฟัน Felspatic porcelain ยี่ห้อ Vita VMK 95[®] (Vita Zahnfabrik, West, Germany) สี A1 , A2 , A3 , A3.5 , A4 , B1 , B2 , B3 , B4 , C1 , C2 , C3 , C4 , D2 , D3 , D4
3. ไม้บรรทัดวัดมุม, กระจกใส
4. กระดาษสีเทากลาง (Grey card)
5. กระดาษทรายน้ำซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide , water proof) เบอร์ 280, 400, 600
6. สายไฟและปลั๊กเสียบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. กล้องดิจิทัลยี่ห้อ Nikon Coolpix 4500 และขาตั้งกล้อง
2. หลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Vita-Lite[®] (Duro-Test[®] Lighting, Inc., Philadelphia, USA) ขนาด 20 วัตต์
3. รางหลอดไฟอิเล็กทรอนิกส์
4. เครื่องวัดขนาดแบบละเอียดด้วยระบบดิจิทัล (Digital veneer caliper: Mitutoyo, Tokyo, Japan)
5. เครื่องวัดความส่องสว่างของแสง (Digital Lux Meter) Model LX-50
6. เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่เหนือเสียง (Ultrasonic cleanser) รุ่น 5210 , Branson, Germany
7. โปรแกรม Adobe Photoshop CS2, Corel Draw เวอร์ชัน 11.0 และ Paint Shop Pro เวอร์ชัน 9.0

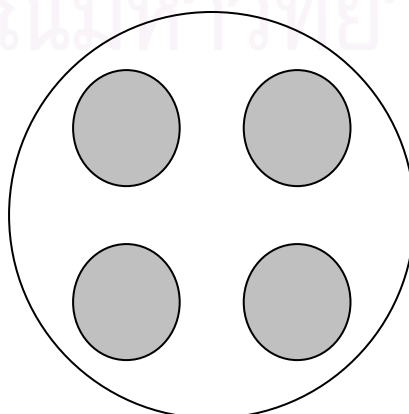
8. คอมพิวเตอร์รุ่น Intel(R) Pentium(R) M processor 1.6 GHZ , 512 MB of RAM
System : Microsoft Windows XP Professional version 2002



รูปที่ 6 แสดงชิ้นตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน

เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยใช้แบบโลหะสำหรับเตรียมชิ้นงานขึ้นรูปพอร์ซเลนเนื้อฟันด้วยเฟลสปาทิกพอร์ซเลน Vita VMK95[®] (Vita Zahnfabrik, West Germany) สี A1 , A2 , A3 , A3.5 , A4 , B1 , B2 , B3 , B4 , C1 , C2 , C3 , C4 , D2 , D3 , D4. Lot No. 7336 ภายใต้ความควบคุมและดูแลของห้องปฏิบัติการบริษัทบุญชูอารีญา โดยผู้ทำชิ้นตัวอย่างเป็นบุคคลเดียวกันด้วยวิธีการตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ให้มีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disk) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร จำนวนสี่ละ 1 ชิ้น ขัดบริเวณผิวหน้าโดยใช้แบบช่วยยึดชิ้นตัวอย่าง ให้มีลักษณะพื้นผิวที่แบนเรียบสม่ำเสมอเมื่อมองด้วยตา ด้วยกระดาษทรายน้ำซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 280 , 400 , และ 600 ตามลำดับ วัดความหนาของชิ้นตัวอย่างทั้งสี่ตำแหน่งด้วยเครื่องวัดขนาดแบบละเอียดด้วยระบบดิจิตอล ที่มีความละเอียดถึง 0.01 มิลลิเมตร จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างมีความหนา 1 ± 0.05 มิลลิเมตร นำชิ้นตัวอย่างไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่เหนือเสียง เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 7 แสดงตำแหน่งวัดความหนาของชิ้นตัวอย่างทั้งสี่ตำแหน่ง



รูปที่ 8 แสดงแบบโลหะสำหรับเตรียมชิ้นงาน



รูปที่ 9 แสดงแบบช่วยยึดชิ้นตัวอย่างขณะขัด



รูปที่ 10 แสดงเครื่องวัดขนาดแบบละเอียดด้วยระบบดิจิทัล
(Digital veneer caliper: Mitutoyo, Tokyo, Japan)



รูปที่ 11 แสดงเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นความถี่เหนือเสียง
(Ultrasonic cleanser) รุ่น 5210 , Bransonic , Germany



รูปที่ 12 แสดงเครื่องวัดความส่องสว่างของแสง
(Digital Lux Meter) Model LX-50

กล้องดิจิทัล : ปรับระบบการทำงานเป็นแบบควบคุมด้วยมือ (manual) ตั้งขนาดภาพ (image size) 2272 x1704 พิกเซล ค่าความชัดลึกของสีในแต่ละพิกเซล (color depth) 24 บิต (RGB สเกล) ระดับคุณภาพของภาพเป็นแบบละเอียด (fine) ช่องรับแสง(aperture) F9.3 ความไวชัตเตอร์ (shutter speed) 1/8 วินาที ปรับโฟกัสแบบควบคุมด้วยมือ ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพเก็บบันทึกในรูปแบบของไฟล์ภาพ ชนิด JPEG

แหล่งกำเนิดแสง: หลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Vita-Lite[®] (Duro-Test[®] Lighting, Inc., Philadelphia, USA) ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ซึ่งมีอุณหภูมิสี 5,500 เคลวิน ดัชนีเทียบสี

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 การทดลองเบื้องต้น

การเลือกโปรแกรมเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดสี

ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2 สร้างวงกลมสีขนาด 100x100 พิกเซล จำนวน 6 วง ประกอบไปด้วย สีแดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ฟ้ำ และสี D4 (โดยใช้เครื่องมือ Eyedropper ดูดสีจาก ภาพถ่ายสี D4 ตามด้วยเครื่องมือ Paint Bucket คลิกในพื้นที่วงกลม จะได้วงกลมสีเหมือนสี ณ ตำแหน่งที่ดูดมา) จัดเก็บไฟล์ภาพไว้ในไฟล์ Tagged Image File Format (TIFF) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียข้อมูล นำไฟล์ภาพวงกลมสีดังกล่าวไปอ่านค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2, Corel draw เวอร์ชัน 11.0 และ Jasc Paint shop Pro เวอร์ชัน 9.0 บันทึกข้อมูลลงในตารางบันทึกผล เปรียบเทียบค่าสีที่แต่ละโปรแกรมอ่านได้



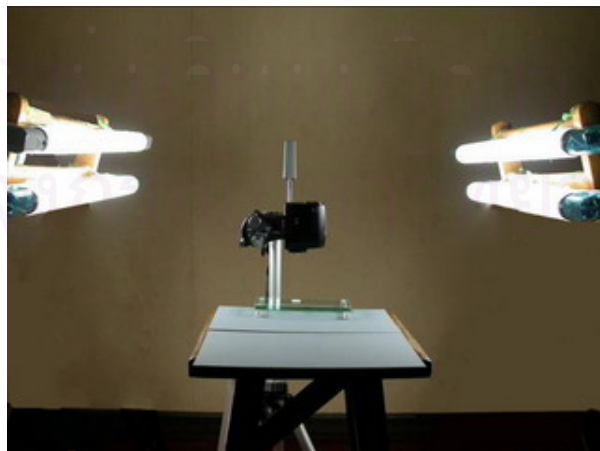
รูปที่ 13 แสดงวงกลมสี

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ของวงกลมสีเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

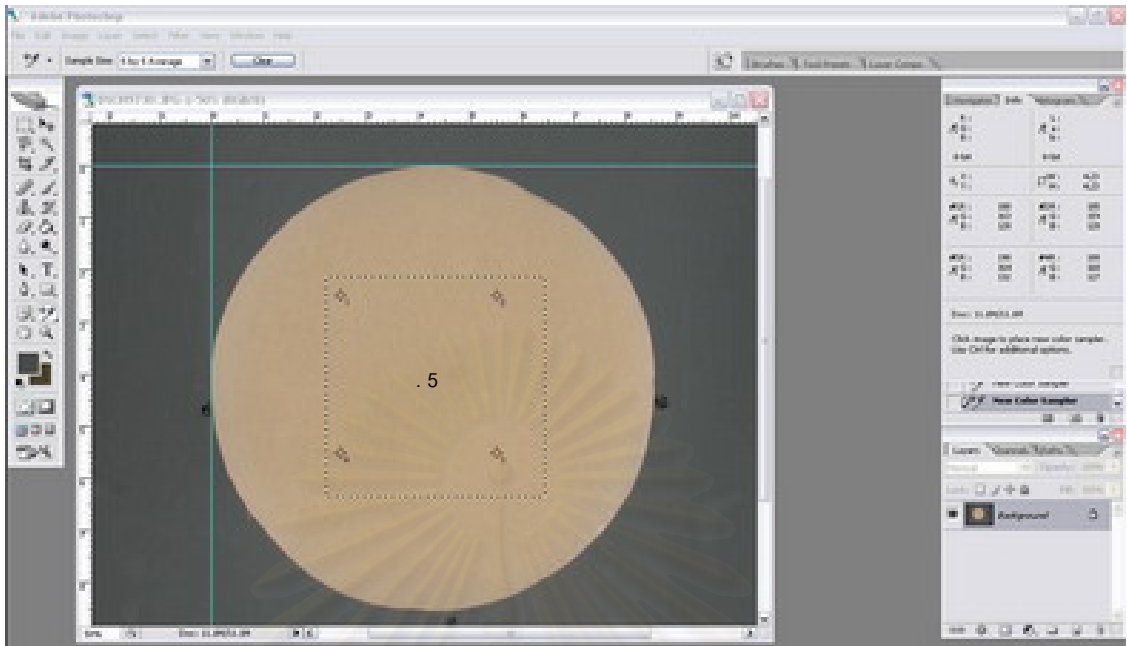
โปรแกรม	วงกลมสี.....					
	ค่าสี					
	R	G	B	L^*	a^*	b^*
Adobe Photoshop CS2						
Corel Draw V11.0						
Paint Shop Pro V9.0						

การหาเกณฑ์ในการกำหนดสีพอร์ชเลน

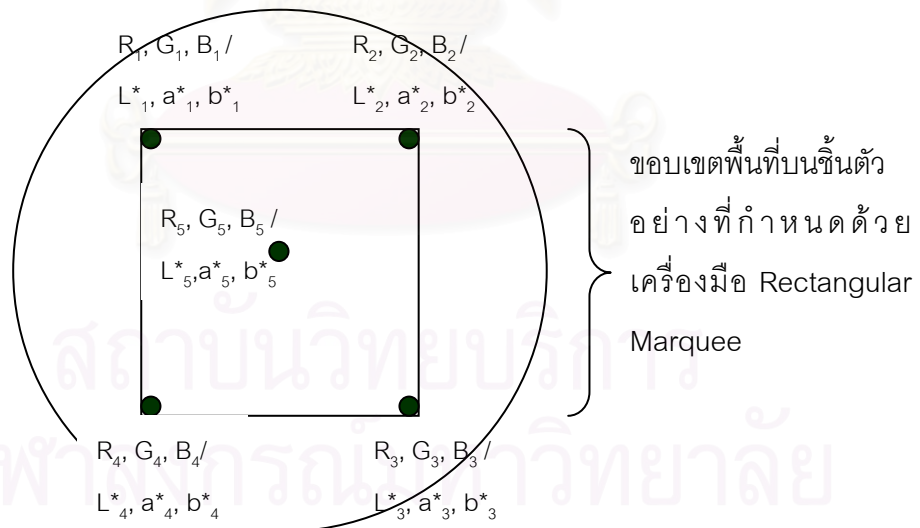
ใช้กระดาษสีเทากลางที่มีค่าการสะท้อนแสง 18 % เป็นพื้นหลัง วางกระจกใสเหนือกระดาษให้มีระยะห่างเพียงพอที่ไม่ทำให้เกิดเงาของชิ้นตัวอย่างบนฉาก ใช้ปากกาเมจิกปลายเล็ก ๆ จุดบนกระจก เพื่อเวลาวางชิ้นตัวอย่างจะได้เป็นตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ยึดหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ประกอบติดกับรางอิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้วเข้ากับขาตั้งข้างละ 2 หลอด วัดระดับความเข้มแสงด้วยเครื่องวัดความส่องสว่างของแสง (Digital Lux Meter) Model LX-50 จนมีระดับความเข้มแสง 1,360 ลักซ์โดยประมาณ ทำให้มีระยะห่างจากตำแหน่งวางชิ้นตัวอย่าง 43 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา ดังรูปที่ 14 นำชิ้นตัวอย่างวางบนตำแหน่งที่กำหนดไว้ ถ่ายภาพชิ้นตัวอย่างทีละสี สีละ 30 ครั้งจนครบทั้ง 16 เฉดสี โดยปรับระดับขาตั้งกล้องจนกระทั่งหน้ากล้องอยู่ในตำแหน่ง 90 60 และ 45 องศา กับชิ้นตัวอย่างและมีระยะห่าง 10 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ ดาวน์โหลดไฟล์ภาพเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านทาง Compact flash ซึ่งภาพที่ได้ถูกเก็บบันทึกในรูปแบบของไฟล์ภาพชนิด JPEG ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2 อ่านค่าสีบนภาพ โดยเริ่มแรกตั้งสเกลไม้บรรทัดให้เป็นศูนย์บริเวณขอบของชิ้นงาน ใช้เครื่องมือ Color Sample อ่านค่าสีบนภาพภายในขอบเขตพื้นที่บนชิ้นตัวอย่างที่กำหนดด้วยเครื่องมือ Rectangular Marquee ภายในขอบเขตพื้นที่ 500, 400, 350, 250, 200 และ 200 พิกเซล บนชิ้นตัวอย่างที่ถ่าย ณ ตำแหน่ง 10 เซนติเมตร 90 องศา, 10 เซนติเมตร 60 องศา, 10 เซนติเมตร 45 องศา, 20 เซนติเมตร 90 องศา, 20 เซนติเมตร 60 องศา และ 20 เซนติเมตร 45 องศา ตามลำดับ ด้วยค่าสีในโหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ณ จุดโคออดิเนตเดียวกัน ดังรูปที่ 15, 16 โดยกำหนดขนาดพื้นที่สำหรับอ่านค่าสีต่อหนึ่งตำแหน่งด้วยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากพื้นที่ 5 x 5 พิกเซล



รูปที่ 14 แสดงการจัดตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 15 แสดงขอบเขตพื้นที่และตำแหน่งอ่านค่าสีในโปรแกรม Adobe Photoshop



รูปที่ 16 ภาพแสดงขอบเขตพื้นที่และตำแหน่งอ่านค่าสี

ค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ที่อ่านได้ในแต่ละตำแหน่งจะปรากฏบนพาเลตอินโฟ (Palette Info) นำมาหาค่าเฉลี่ย ดังนี้

1. นำค่าในโหมด RGB ซึ่งได้แก่

ค่า R (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 / 5 = \bar{R}_n$$

ค่า G (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 / 5 = \bar{G}_n$$

ค่า B (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 / 5 = \bar{B}_n$$

ซึ่งค่าเฉลี่ย \bar{R}_n , \bar{G}_n , \bar{B}_n จะเป็นค่าแทนสีในโหมด RGB ของภาพนั้น ๆ

2. นำค่าในโหมด $L^*a^*b^*$ ซึ่งได้แก่

ค่า L^* (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$L^*_1 + L^*_2 + L^*_3 + L^*_4 + L^*_5 / 5 = \bar{L}^*_n$$

ค่า a^* (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$a^*_1 + a^*_2 + a^*_3 + a^*_4 + a^*_5 / 5 = \bar{a}^*_n$$

ค่า b^* (ที่อ่านบนภาพลำดับที่ n) ทั้ง 5 ตำแหน่งมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$b^*_1 + b^*_2 + b^*_3 + b^*_4 + b^*_5 / 5 = \bar{b}^*_n$$

ซึ่งค่าเฉลี่ย \bar{L}^*_n , \bar{a}^*_n , \bar{b}^*_n จะเป็นค่าแทนสีในโหมด $L^*a^*b^*$ ของภาพนั้น ๆ

จุดบันทึกค่าเฉลี่ย \bar{R}_n , \bar{G}_n , \bar{B}_n และ \bar{L}^*_n , \bar{a}^*_n , \bar{b}^*_n ของแต่ละภาพลงในตารางบันทึกผล ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกค่าเฉลี่ยสีในโหมด RGB และ L*a*b* ของแต่ละภาพ

ระยะห่าง.....มม.....เจด.....

ลำดับภาพ	ค่าเฉลี่ย					
ภาพที่ 1	\bar{R}_1	\bar{G}_1	\bar{B}_1	\bar{L}^*1	\bar{a}^*1	\bar{b}^*1
ภาพที่ 2	\bar{R}_2	\bar{G}_2	\bar{B}_2	\bar{L}^*2	\bar{a}^*2	\bar{b}^*2
ภาพที่ 3	\bar{R}_3	\bar{G}_3	\bar{B}_3	\bar{L}^*3	\bar{a}^*3	\bar{b}^*3
.
.
.
ภาพที่ 30	\bar{R}_{30}	\bar{G}_{30}	\bar{B}_{30}	\bar{L}^*30	\bar{a}^*30	\bar{b}^*30
Mean±S.D	$\bar{R} \pm S.D$	$\bar{G} \pm S.D$	$\bar{B} \pm S.D$	$\bar{L}^* \pm S.D$	$\bar{a}^* \pm S.D$	$\bar{b}^* \pm S.D$
$P_5 - P_{95}$						

ดังนั้น ณ สภาวะหนึ่ง ในแต่ละเจด จะได้ช่วงของค่าเฉลี่ยได้แก่ $\bar{R}_1 - \bar{R}_{30}$, $\bar{G}_1 - \bar{G}_{30}$, $\bar{B}_1 - \bar{B}_{30}$ และ $\bar{L}^*1 - \bar{L}^*30$, $\bar{a}^*1 - \bar{a}^*30$, $\bar{b}^*1 - \bar{b}^*30$ ใช้วิธีการของสถิติพรรณนาตัดข้อมูลในแต่ละช่วงของค่าเฉลี่ย ที่มีค่ามากหรือน้อยเกินออกไปอย่างละร้อยละ 5 (ค่า Outlier) ด้วยการหาค่าที่แสดงตำแหน่งของข้อมูลแบบเปอร์เซ็นต์ไทล์ จะได้ตำแหน่งค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ P_5 และ P_{95} ซึ่งช่วงตั้งแต่ P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย $\bar{R}_1 - \bar{R}_{30}$, $\bar{G}_1 - \bar{G}_{30}$, $\bar{B}_1 - \bar{B}_{30}$ และ $\bar{L}^*1 - \bar{L}^*30$, $\bar{a}^*1 - \bar{a}^*30$, $\bar{b}^*1 - \bar{b}^*30$ ในแต่ละเจด จะใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดสี ณ สภาวะนั้น ๆ ขึ้นต่อไป

ส่วนที่ 2 การทดลองกำหนดเจดสีจากภาพถ่ายพอร์ซเลน

ให้ผู้ช่วยวิจัยนำชิ้นตัวอย่างชุดเดิมใส่ตลับ ตลับละ 1 ชิ้น เขียนรหัสแทนเจดสีของชิ้นตัวอย่างบริเวณด้านล่างของตลับโดยไม่ให้ผู้วิจัยทราบ คละทั้ง 16 ตลับ แล้วถ่ายภาพชิ้นตัวอย่างที่ละตลับภายใต้สภาวะเดิมซ้ำอีกครั้ง โดยในแต่ละสภาวะจะถ่ายภาพเจดสีละ 5 ครั้ง ตามระยะห่างและมุมที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น จนครบ ดาวนั้โหลดไฟล์ภาพเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านทาง Compact flash ซึ่งภาพที่ได้ถูกเก็บบันทึกในรูปของไฟล์ภาพ ชนิด JPEG จดรหัสภาพให้ตรงกับ

รหัสเฉดสี ใช้โปรแกรม Adobe Photoshop อ่านค่าสีบนภาพ ด้วยค่าสีในโหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ ทั้งหมด 5 ตำแหน่งเช่นเดิม โดยกำหนดขนาดพื้นที่สำหรับอ่านค่าสีต่อหนึ่งตำแหน่งด้วยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากพื้นที่ 5×5 พิกเซล นำค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ที่ได้ในแต่ละตำแหน่งมาหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ ค่าเฉลี่ย $\bar{R}_n, \bar{G}_n, \bar{B}_n$ และ $\bar{L}^*_n, \bar{a}^*_n, \bar{b}^*_n$ (เมื่อ n แทนลำดับภาพ) ที่ได้จะเป็นค่าแทนสีของภาพนั้น ๆ บันทึกค่าตัวเลขและลำดับภาพลงในตารางบันทึกผล คละภาพทั้งหมดอีกครั้ง เพื่อไม่ให้ค่าที่อ่านได้จากภาพเฉดสีเดียวกันอยู่ติดกัน เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย $\bar{R}_n, \bar{G}_n, \bar{B}_n$ และ $\bar{L}^*_n, \bar{a}^*_n, \bar{b}^*_n$ ที่ได้กับเกณฑ์ในการกำหนดสีพอร์ชเลนที่หาไว้ในตอนที่แล้ว เพื่อกำหนดเฉดสี

จากนั้น นับจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้อง เปรียบเทียบจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ และเปรียบเทียบจำนวนภาพถ่ายพอร์ชเลนที่กำหนดสีได้ถูกต้อง ณ ระยะเวลาและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน

การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

นำเสนอด้วยสถิติเชิงพรรณนาแบบแจกแจงความถี่ และเปรียบเทียบจำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วนสองกลุ่มตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กัน (McNemar) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha < 0.05$)

เปรียบเทียบจำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีภาพถ่ายพอร์ชเลน ณ ระยะเวลาและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วนสองกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกัน (Chi-Square) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha < 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows เวอร์ชัน 11.5 (SPSS Inc., 444 N. Michigan, Chicago, Illinois USA.)



รูปที่ 17 แสดงกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Nikon Coolpix 4500



รูปที่ 18 แสดงขาตั้งกล้อง

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการเลือกโปรแกรมเพื่อนำมาใช้ในการกำหนดสี

จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ 3 ชนิด ได้แก่ Adobe Photoshop CS2, Corel Draw เวอร์ชัน 11.0 และ Paint Shop Pro เวอร์ชัน 9.0 อ่านค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ในพื้นที่วงกลมสีแดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ฟ้ำ และสี D4 จำนวน 6 วง พบว่า โปรแกรมทั้งสามอ่านค่า RGB ได้เท่ากัน สำหรับ $L^*a^*b^*$ โปรแกรม Adobe Photoshop และ Corel Draw อ่านค่าได้ไม่แตกต่างกัน (ต่างกันประมาณ 1-2 ในค่า a^* และ b^* ในวงสีแดง, เขียว, น้ำเงิน และเหลือง) ขณะที่โปรแกรม Paint Shop Pro ไม่สามารถอ่านค่า $L^*a^*b^*$ ได้ นอกจากนั้น ยังพบอุปสรรคเกี่ยวกับการใช้งานของโปรแกรม คือ ช่วงห่างสเกลไม้บรรทัดของโปรแกรม Corel Draw ไม่เท่ากับโปรแกรม Adobe Photoshop แม้หน่วยวัดจะเป็นหน่วยเดียวกันก็ตาม ทำให้การนำเอาทั้งสองโปรแกรมนี้ไปอ่านค่าสีโดยเทียบตำแหน่งวัดให้เป็นตำแหน่งเดียวกันเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการทำงานกับไฟล์ภาพแบบ JPEG ของโปรแกรม Corel Draw ที่ต้องใช้วิธีการอิมพอร์ตไฟล์ภาพเข้ามา

สำหรับโปรแกรม Paint Shop Pro มีช่วงห่างสเกลไม้บรรทัดเท่ากับโปรแกรม Adobe Photoshop แต่ไม่สามารถตั้งสเกลไม้บรรทัดให้เป็นศูนย์บริเวณขอบชิ้นงานได้ ทำให้การอ่านค่าสี ณ ตำแหน่งเดียวกันในแต่ละภาพเกิดความคลาดเคลื่อน เพื่อเลี่ยงอุปสรรคการใช้งานที่ค่อนข้างยุ่งยากของทั้งโปรแกรม Corel Draw และ Paint Shop Pro ประกอบกับ การที่ทั้ง 3 โปรแกรมสามารถอ่านค่า RGB ได้เท่ากัน และอ่านค่า $L^*a^*b^*$ ได้ไม่ต่างกัน (ยกเว้นโปรแกรม Paint Shop Pro ที่อ่านค่า $L^*a^*b^*$ ไม่ได้) ดังนั้น การอ่านค่าสีในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โปรแกรม Adobe Photoshop CS2

ตารางที่ 4 แสดงค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ วงกลมสีแดงเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสีแดง					
	ค่าสี					
	R	G	B	L^*	a^*	b^*
Adobe Photoshop CS2	255	11	0	55	80	70
Corel Draw V11.0	255	11	0	55	80	71
Paint Shop Pro V9.0	255	11	0	-	-	-

ตารางที่ 5 แสดงค่า RGB และ L*a*b* วงกลมสีเขียวเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสีเขียว					
	ค่าสี					
	R	G	B	L*	a*	b*
Adobe Photoshop CS2	24	255	26	88	-78	79
Corel Draw V11.0	24	255	26	88	-78	80
Paint Shop Pro V9.0	24	255	26	-	-	-

ตารางที่ 6 แสดงค่า RGB และ L*a*b* วงกลมสีน้ำเงินเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสีน้ำเงิน					
	ค่าสี					
	R	G	B	L*	a*	b*
Adobe Photoshop CS2	0	0	255	30	68	-112
Corel Draw V11.0	0	0	255	30	70	-115
Paint Shop Pro V9.0	0	0	255	-	-	-

ตารางที่ 7 แสดงค่า RGB และ L*a*b* วงกลมสีเหลืองเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสีเหลือง					
	ค่าสี					
	R	G	B	L*	a*	b*
Adobe Photoshop CS2	252	243	0	94	-12	91
Corel Draw V11.0	252	243	0	94	-12	92
Paint Shop Pro V9.0	252	243	0	-	-	-

ตารางที่ 8 แสดงค่า RGB และ L*a*b* วงกลมสีฟ้าเทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสีฟ้า					
	ค่าสี					
	R	G	B	L*	a*	b*
Adobe Photoshop CS2	142	245	255	91	-29	-15
Corel Draw V11.0	142	245	255	91	-29	-15
Paint Shop Pro V9.0	142	245	255	-	-	-

ตารางที่ 9 แสดงค่า RGB และ L*a*b* วงกลมสี D4 เทียบระหว่าง 3 โปรแกรม

โปรแกรม	วงกลมสี D4					
	ค่าสี					
	R	G	B	L*	a*	b*
Adobe Photoshop CS2	192	173	147	72	4	16
Corel Draw V11.0	192	173	147	72	4	16
Paint Shop Pro V9.0	192	173	147	-	-	-

ผลการหาเกณฑ์ในการกำหนดสีพอร์ชเลน

จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำค่าที่ได้จากการอ่านค่าสีในโหมด RGB และ L*a*b* แต่ละเฉด แต่ละสภาวะ มาแสดงผลโดยการคำนวณหา Mean, S.D และ ช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 ถึง 95 ของค่าเฉลี่ย R, G, B และ L*, a*, b* (ซึ่งนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดสี) ได้ผลสรุป ดังตารางที่ 10 และ ตารางที่ 11

ตารางที่ 10 แสดง Mean, S.D และเกณฑ์ในการกำหนดสีเมื่ออิงตาม R, G, B จำแนกตามเฉด

สี	ระยะห่างระหว่างกลีบกับชั้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 90 องศา					
	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	192.48 \pm 0.75	191.13- 193.6	181.96 \pm 0.72	180.62 -183.27	172.54 \pm 0.89	171 -174
A2	195.98 \pm 0.61	194.6- 197.09	178.6 \pm 0.55	177.8 -179.58	157.27 \pm 1.1	155.33 -159.25
A3	196.73 \pm 0.88	195.04- 198.4	171.87 \pm 0.57	170.8 -172.69	144.76 \pm 1.19	142.91 -147.21
A3.5	187.92 \pm 0.79	186.71- 189.65	161.87 \pm 0.69	160.71- 163.2	128.03 \pm 1.33	125.41- 130.4
A4	184.68 \pm 1.17	182.4- 186.09	155.33 \pm 1.06	152.93 -156.78	121.11 \pm 1.15	118.71- 122.87
B1	193.59 \pm 0.96	192.11- 195.56	185.27 \pm 0.91	183.8 -186.69	178.61 \pm 0.88	176.71- 180.4
B2	193.45 \pm 1.07	191.71- 195.47	181.47 \pm 0.76	180.15 -183.09	169.77 \pm 1.27	168 -171.58
B3	191.94 \pm 1.33	189.17- 193.98	166.43 \pm 0.76	164.77- 167.6	131.46 \pm 1.41	128.5 -133.87
B4	191.71 \pm 0.86	190.11- 193.38	164.97 \pm 0.56	164.11 -166.09	126.85 \pm 1.03	124.93 -128.47
C1	186.19 \pm 0.97	184.33- 187.76	173.88 \pm 0.89	172.42 -175.29	161.66 \pm 1.31	159.71- 163.78
C2	189.72 \pm 0.85	188.13- 191.32	165.77 \pm 0.62	164.6 -166.89	136.68 \pm 1.13	133.88 -138.47
C3	180.29 \pm 0.69	178.91- 181.49	154.21 \pm 0.61	152.62- 155	122.94 \pm 0.83	121.71- 124.38
C4	176.03 \pm 0.85	174.31- 177.47	145.57 \pm 0.64	144.51 -146.98	113.44 \pm 1.06	111.37- 115.27
D2	189.03 \pm 0.76	187.42- 190.47	178.35 \pm 0.7	177 -179.49	169.64 \pm 0.7	168.26- 170.78
D3	189.39 \pm 1.16	187.71- 191.58	169.45 \pm 0.85	167.6 -170.69	147.76 \pm 1.12	145.71- 150
D4	189.12 \pm 1.08	187.6- 191.47	171.09 \pm 0.75	169.71 -172.56	145.31 \pm 1.25	143.22 -147.18

สี	ระยะห่างระหว่างกลีบกับชั้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 60 องศา					
	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	196.53 \pm 1.02	194.55 -198.27	179.95 \pm 0.92	178.2-181.6	167.73 \pm 1.42	165.53 -170.09
A2	200.63 \pm 0.67	199.42- 201.78	175.73 \pm 0.63	174.8-177.07	153.32 \pm 0.83	151.62- 154.8
A3	199.33 \pm 0.78	197.71- 200.69	168.02 \pm 0.47	167.22-168.89	142.22 \pm 0.76	140.91- 143.6
A3.5	190.05 \pm 0.92	188.6 -192.03	160.63 \pm 0.59	159.4-161.6	128.07 \pm 1.31	125.71 -130.12
A4	190.35 \pm 0.94	188.51- 192.16	155.16 \pm 0.5	154.22-155.89	119.23 \pm 0.92	117.22 -120.58
B1	198.87 \pm 0.84	197.04 -200.09	184.48 \pm 0.48	183.71-185.38	176.17 \pm 0.88	174.73 -177.69
B2	199.43 \pm 0.75	198.31- 201	181.28 \pm 0.66	179.91-182.27	165.64 \pm 0.92	163.91 -167.16
B3	196.77 \pm 1.24	194.33 -198.8	166 \pm 0.48	165.31-166.8	132.03 \pm 0.94	130.33 -133.92
B4	197.05 \pm 0.99	195.31 -198.69	164.44 \pm 0.72	163.31-165.96	125.55 \pm 0.94	123.71 -126.98
C1	192.05 \pm 0.69	190.73 -193.29	174.08 \pm 0.53	173.04-174.89	159.55 \pm 0.73	158.02 -160.49
C2	194.54 \pm 0.95	192.71 -196.2	166.35 \pm 0.57	165.4-167.29	137.65 \pm 0.61	136.51 -138.69
C3	180.03 \pm 1.06	177.33 -181.78	150.23 \pm 0.66	148.82-151.2	120.11 \pm 0.66	118.82 -121.29
C4	182.58 \pm 0.81	181.22 -184.27	147.24 \pm 0.43	146.51-148.09	114.83 \pm 0.96	113.6 -116.8
D2	194.94 \pm 0.78	193.71 -196.29	177.76 \pm 0.43	176.91-178.49	166.67 \pm 0.72	165.4 -168
D3	194.06 \pm 0.82	192.24 -195.47	168.59 \pm 0.53	167.62-169.38	146.04 \pm 0.73	144.8 -147.49
D4	185.71 \pm 0.84	184.22 -187.49	170.79 \pm 0.55	169.82-171.6	143.99 \pm 1.14	141.75-145.76

สี	ระยะห่างระหว่างกล็องกับขึ้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 45 องศา					
	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	201.27 \pm 0.56	200.51-202.38	183.48 \pm 0.56	182.6-184.69	171.67 \pm 0.78	170.62-173.47
A2	205.64 \pm 0.74	204.4-206.6	180.31 \pm 0.55	179.31-181.27	158.71 \pm 1.07	157.02-160.76
A3	204.19 \pm 0.9	202.31-206	172.79 \pm 0.51	171.82-173.78	147.2 \pm 0.71	145.75-148.29
A3.5	194.91 \pm 0.99	193-196.56	162.37 \pm 0.76	160.91-163.78	127.73 \pm 1.05	125.91-129.4
A4	191.39 \pm 0.92	189.62-192.89	155.76 \pm 0.61	154.71-157	121.38 \pm 0.92	119.53-123.09
B1	201.29 \pm 0.78	200.11-202.8	184.59 \pm 0.73	183.51-186.2	176.57 \pm 0.79	175.51-178.38
B2	200.91 \pm 1.06	199.22-203	181.15 \pm 0.64	179.93-182.38	165.57 \pm 1.03	163.53-167.36
B3	197.69 \pm 0.78	196.24-199.09	166.23 \pm 0.66	164.91-167.29	131.8 \pm 0.93	130.11-133.4
B4	196.75 \pm 0.86	195.24-198.49	163.74 \pm 0.61	162.51-164.8	125.69 \pm 0.92	124.4-127.81
C1	194.34 \pm 0.8	193-195.6	174.2 \pm 0.73	173-175.47	159.7 \pm 0.89	158.13-161.29
C2	196.11 \pm 1	194.31-197.89	165.71 \pm 0.56	164.6-166.69	137.91 \pm 1.09	135.62-139.87
C3	184.37 \pm 0.81	182.8-185.6	152.29 \pm 0.44	151.6-153.29	121.77 \pm 1.37	119.73-124.89
C4	182.49 \pm 1.05	180.02-184.09	147.27 \pm 0.68	146.11-148.69	116.13 \pm 1.09	114.02-117.78
D2	196.54 \pm 0.84	194.75-197.8	177.49 \pm 0.51	176.71-178.58	166.48 \pm 1.06	164.91-168.54
D3	196.65 \pm 0.75	195.11-197.89	169.63 \pm 0.65	168.2-170.6	147.64 \pm 1.02	145.37-149.29
D4	196.63 \pm 0.67	195.4-197.69	171.33 \pm 0.65	170.11-172.58	144.13 \pm 0.88	142.62-145.76

สี	ระยะห่างระหว่างกล็องกับขึ้นตัวอย่าง 20 ซม. ทำมุม 90 องศา					
	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	203.74 \pm 0.93	202.04-205.6	182.05 \pm 0.65	180.91-183	166.59 \pm 1.23	164.44-169.07
A2	207.03 \pm 0.83	205-208.2	179 \pm 0.47	178.2-179.8	155.01 \pm 0.97	153.4-157.29
A3	204.23 \pm 0.86	202.31-205.49	171.95 \pm 0.73	170.73-173.58	145.85 \pm 1.22	143.91-148.09
A3.5	197.47 \pm 0.79	195.91-198.87	164.31 \pm 0.68	162.84-165.4	129.39 \pm 0.99	127.33-130.89
A4	192.55 \pm 0.63	191.11-193.78	155.92 \pm 0.45	154.8-156.6	120.83 \pm 1.06	119.11-122.69
B1	204.44 \pm 0.88	202.82-205.6	184.59 \pm 0.67	183.33-185.49	174.15 \pm 0.56	173.11-175
B2	205.26 \pm 0.85	204.04-207.25	181.97 \pm 0.45	180.8-182.78	163.77 \pm 1.03	161.64-165.4
B3	200.24 \pm 0.68	199.11-201.49	167.63 \pm 0.6	166.51-168.8	133.38 \pm 1.13	131.2-135.18
B4	198.84 \pm 0.72	197.33-200	165.09 \pm 0.56	163.91-166	126.81 \pm 0.77	125.06-127.8
C1	197.33 \pm 0.68	196.22-198.6	174.59 \pm 0.73	173.02-175.76	157.17 \pm 1.17	155.42-159.45
C2	198.4 \pm 1.03	196.37-200.4	167.75 \pm 0.46	166.8-168.4	139.37 \pm 0.95	137.64-141.25
C3	186.19 \pm 0.75	184.71-187.67	153.59 \pm 0.53	152.71-154.49	122.69 \pm 0.82	121.22-124.25
C4	184.29 \pm 0.93	182.42-185.89	147.49 \pm 0.57	146.51-148.69	114.78 \pm 1.12	112.86-116.98
D2	201.29 \pm 0.92	199.51-202.6	178.35 \pm 0.77	176.82-179.67	165.07 \pm 0.72	163.51-166.38
D3	200.02 \pm 0.67	198.73-201.4	171.97 \pm 0.44	171.13-172.8	148.96 \pm 0.85	147.6-150.47
D4	198.81 \pm 0.92	196.82-200.09	173.4 \pm 0.73	172.2-175.09	145.51 \pm 0.88	144-146.78

ระยะห่างระหว่างกล็องกับขึ้นตัวอย่าง 20 ซม. ทำมุม 60 องศา						
สี	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	208.17 \pm 1.09	206.2-210.09	183.35 \pm 1.01	181.82-185.2	168 \pm 1.28	166.2-170.49
A2	210.55 \pm 0.83	209.4-212.16	179.69 \pm 0.52	178.71-180.49	155.11 \pm 1.19	152.84-157.18
A3	208.01 \pm 1.1	205.82-209.58	172.41 \pm 0.54	171.71-173.58	144.35 \pm 0.68	143.11-145.49
A3.5	198.03 \pm 0.84	196.73-199.67	161.89 \pm 0.56	161.11-163.09	126.89 \pm 0.95	125-128.58
A4	194.58 \pm 1.19	192.8-196.67	155.45 \pm 0.62	154.2-156.78	119.67 \pm 0.72	118.4-120.89
B1	206.8 \pm 0.99	204.9-208.65	185.33 \pm 0.64	184.31-186.6	173.5 \pm 0.79	172-175.09
B2	207.01 \pm 0.77	205.71-208.49	181.49 \pm 0.59	180.42-182.58	162.26 \pm 0.79	160.71-163.6
B3	202.57 \pm 0.7	201.22-203.76	167.27 \pm 0.43	166.51-167.98	132.35 \pm 0.88	130.84-134.29
B4	202.89 \pm 0.79	201.42-204.2	166.06 \pm 0.72	164.53-167.47	127.37 \pm 0.95	125.55-129.34
C1	200.72 \pm 0.84	199.11-202.09	174.71 \pm 0.67	173.4-175.78	156.99 \pm 0.89	155.51-158.6
C2	201.33 \pm 0.86	199.8-203.09	167.33 \pm 0.67	166.24-168.49	137.99 \pm 0.92	136.31-139.87
C3	190.09 \pm 1.27	188.11-192.78	154.01 \pm 0.6	153.11-155.2	122.09 \pm 0.8	120.42-123.49
C4	187.51 \pm 0.78	186.11-188.69	147.69 \pm 0.66	146.31-148.78	115.17 \pm 1.39	113.2-118.58
D2	204.24 \pm 2.47	196.82-206.65	179.27 \pm 0.77	178.13-181	165.75 \pm 1.08	162.86-167.29
D3	202.73 \pm 0.76	201.51-204.09	170.99 \pm 0.55	170.11-171.89	147.23 \pm 1.01	145.24-148.89
D4	202.23 \pm 0.87	200.35-203.87	173.29 \pm 0.63	172.31-174.76	144.69 \pm 0.77	143.6-146.2

ระยะห่างระหว่างกล็องกับขึ้นตัวอย่าง 20 ซม. ทำมุม 45 องศา						
สี	R		G		B	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	211.2 \pm 0.71	210-212.58	187.55 \pm 0.56	186.6-188.49	171.9 \pm 0.76	170.71-173.29
A2	212.93 \pm 0.76	211.8-214.29	184.22 \pm 0.68	182.91-185.45	160.94 \pm 1.01	159.11-162.2
A3	210.27 \pm 0.66	209.02-211.69	176.12 \pm 0.69	174.93-177.69	149.12 \pm 0.95	147.31-150.6
A3.5	201.91 \pm 0.63	200.82-203.27	167.03 \pm 0.54	166.31-168.09	132.35 \pm 0.99	130.42-133.8
A4	197.37 \pm 1.08	195.31-199.09	158.69 \pm 0.83	157.6-160.58	122.5 \pm 1.1	120.13-124.2
B1	210.08 \pm 0.71	208.66-211.2	188.71 \pm 0.54	187.73-189.69	177.38 \pm 0.81	176.31-179.09
B2	209.38 \pm 0.63	208.42-210.67	183.89 \pm 0.51	183.11-184.8	166.88 \pm 0.75	165.71-168.09
B3	203.43 \pm 0.82	201.64-204.78	168.65 \pm 0.69	167.51-169.8	133.87 \pm 0.77	132.33-135.27
B4	203.98 \pm 0.78	202.31-205.4	168.27 \pm 0.64	166.91-169.29	128.74 \pm 0.94	126.91-130.36
C1	202.85 \pm 1.01	201.11-204.6	176.71 \pm 0.69	175.31-177.8	159.19 \pm 1.4	156.64-161.4
C2	201.78 \pm 0.86	200-203.09	169.22 \pm 0.5	168.31-170.18	140.36 \pm 0.95	138.64-142.38
C3	192.26 \pm 0.51	191.22-193	157.36 \pm 0.72	155.51-158.38	126.05 \pm 0.88	124.51-127.56
C4	188.05 \pm 1.8	182.19-189.78	149.96 \pm 0.56	149.2-151.29	118.29 \pm 1.09	116.02-120.09
D2	205.61 \pm 0.88	204.2-207.45	180.32 \pm 0.56	179.22-181.2	167.31 \pm 0.92	165.53-168.8
D3	202.99 \pm 0.83	201.33-204.4	173.24 \pm 0.62	172.11-174.18	150.73 \pm 0.87	149.02-152.45
D4	202.72 \pm 0.97	200.91-204.49	175.23 \pm 0.61	174.2-176.49	147.41 \pm 0.87	146-149.12

ตารางที่ 11 แสดง Mean, S.D และเกณฑ์ในการกำหนดสีเมื่ออิงตาม L*, a*, b* จำแนกตามชนิด

สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 90 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	74.73 \pm 0.22	74.2-75.09	2.64 \pm 0.43	1.8-3.29	6.22 \pm 0.46	5.31-6.98
A2	73.86 \pm 0.23	73.42-74.29	3.89 \pm 0.38	3.31-4.67	13.33 \pm 0.55	12.31-14.2
A3	71.93 \pm 0.26	71.6-72.4	6.2 \pm 0.43	5.6-7.18	17.51 \pm 0.6	16.44-18.58
A3.5	68.31 \pm 0.24	67.91-68.8	6.15 \pm 0.45	5.2-6.89	21.39 \pm 0.71	20.11-22.67
A4	66.17 \pm 0.39	65.4-66.6	7.64 \pm 0.4	6.91-8.36	22.29 \pm 0.59	21.2-23.4
B1	75.77 \pm 0.3	75.31-76.29	2.19 \pm 0.41	1.6-2.98	4.48 \pm 0.47	3.82-5.49
B2	74.57 \pm 0.28	74.11-75.09	2.93 \pm 0.43	2.2-3.69	7.6 \pm 0.57	6.6-8.4
B3	69.89 \pm 0.39	69.04-70.4	5.76 \pm 0.53	4.71-6.67	21.8 \pm 0.57	20.73-22.69
B4	69.39 \pm 0.22	69-69.8	6.05 \pm 0.49	5.4-6.89	23.67 \pm 0.52	22.91-24.67
C1	71.85 \pm 0.34	71.4-72.29	3.01 \pm 0.39	2.31-3.69	7.94 \pm 0.55	6.91-8.8
C2	69.65 \pm 0.21	69.4-70.09	5.79 \pm 0.54	4.73-6.78	18.53 \pm 0.62	17.62-20.07
C3	65.49 \pm 0.24	65-65.8	6.55 \pm 0.45	5.71-7.49	20.24 \pm 0.54	19.31-21.07
C4	62.63 \pm 0.21	62.4-63.09	8.31 \pm 0.48	7.6-9.29	21.61 \pm 0.59	20.53-22.78
D2	73.41 \pm 0.29	72.8-73.89	2.81 \pm 0.42	1.93-3.69	5.87 \pm 0.4	5.11-6.6
D3	70.71 \pm 0.33	70.11-71.29	4.97 \pm 0.56	4-5.89	13.99 \pm 0.4	13.2-14.69
D4	71.07 \pm 0.26	70.71-71.58	3.63 \pm 0.46	2.8-4.4	15.85 \pm 0.7	14.71-17

สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 60 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	74.45 \pm 0.34	73.8-75	4.57 \pm 0.35	3.91-5.09	8.55 \pm 0.45	7.82-9.49
A2	73.53 \pm 0.18	73.2-73.89	6.73 \pm 0.42	6-7.4	15.05 \pm 0.42	14.31-15.69
A3	71.21 \pm 0.2	70.91-71.6	9.01 \pm 0.36	8.31-9.49	17.84 \pm 0.48	17.11-18.6
A3.5	68.15 \pm 0.21	66.2-67	7.62 \pm 0.5	6.91-8.58	21.49 \pm 0.48	20.62-22.4
A4	66.73 \pm 0.23	66.2-67	9.77 \pm 0.5	8.62-10.67	24.05 \pm 0.51	23.11-25.09
B1	76.07 \pm 0.26	75.6-76.4	4.25 \pm 0.4	3.6-4.89	6.17 \pm 0.5	5.2-6.89
B2	75.01 \pm 0.16	74.71-75.29	4.8 \pm 0.52	3.84-5.8	10.51 \pm 0.52	9.42-11.49
B3	70.25 \pm 0.24	69.8-70.78	7.96 \pm 0.59	7.11-9	22.11 \pm 0.56	20.93-23.09
B4	69.84 \pm 0.23	69.4-70.2	8.31 \pm 0.52	7.33-9.29	24.95 \pm 0.46	24.2-25.78
C1	72.35 \pm 0.27	72-72.8	4.94 \pm 0.38	4.4-5.69	9.98 \pm 0.46	9.11-10.8
C2	70.25 \pm 0.2	69.91-70.6	7.47 \pm 0.57	6.51-8.4	18.89 \pm 0.35	18.31-19.6
C3	64.33 \pm 0.22	64-64.8	8.17 \pm 0.57	7.2-9.18	20.32 \pm 0.43	19.71-21.4
C4	63.73 \pm 0.19	63.4-64.09	10.35 \pm 0.38	9.71-11.09	22.45 \pm 0.55	21.4-23.2
D2	73.75 \pm 0.15	73.4-74	5.01 \pm 0.29	4.51-5.49	8.04 \pm 0.41	7.31-8.87
D3	70.89 \pm 0.19	70.6-71.2	7.03 \pm 0.41	6.2-7.69	15.31 \pm 0.44	14.4-16
D4	71.74 \pm 0.18	71.4-72	5.73 \pm 0.4	5.02-6.58	17.6 \pm 0.5	16.91-18.6

สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 10 ซม. ทำมุม 45 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	75.8 \pm 0.16	75.6-76.2	5.13 \pm 0.37	4.51-5.8*	8.47 \pm 0.48	7.53-9.2
A2	75.21 \pm 0.22	74.8-75.6	6.9 \pm 0.4	6.31-7.69	14.57 \pm 5	13.71-15.29
A3	72.97 \pm 0.25	72.6-73.4	9.02 \pm 0.38	8.31-9.8	17.7 \pm 0.39	17.2-18.58
A3.5	69.08 \pm 0.24	68.6-69.6	8.73 \pm 0.55	7.71-9.78	22.75 \pm 0.53	21.82-23.6
A4	66.93 \pm 0.16	66.51-67.2	10.17 \pm 0.54	9.2-11.09	23.31 \pm 0.5	22.51-24.2
B1	76.25 \pm 0.26	75.8-76.6	5.05 \pm 0.34	4.51-5.8	6.35 \pm 0.46	5.42-7.2
B2	75.14 \pm 0.27	74.51-75.58	5.42 \pm 0.53	4.6-6.4	10.69 \pm 0.45	10-11.49
B3	70.41 \pm 0.16	70.11-70.69	8.23 \pm 0.47	7.4-9.29	22.43 \pm 0.56	21.42-23.6
B4	69.59 \pm 0.25	69.2-70.09	8.57 \pm 0.45	7.71-9.29	24.61 \pm 0.46	23.62-25.4
C1	72.68 \pm 0.19	72.4-73	5.7 \pm 0.52	4.71-6.6	10.41 \pm 0.34	9.82-11.07
C2	70.21 \pm 0.29	69.71-70.8	8.39 \pm 0.48	7.71-9.29	18.87 \pm 0.56	17.82-19.89
C3	65.4 \pm 0.22	64.91-65.8	9.11 \pm 0.42	8.31-9.89	20.93 \pm 0.74	19.51-22.29
C4	63.8 \pm 0.26	63.22-64.18	10.47 \pm 0.45	9.6-11.2	21.85 \pm 0.59	20.91-23.09
D2	73.8 \pm 0.18	73.4-74	5.73 \pm 0.45	4.91-6.49	8.26 \pm 0.51	7.31-9.2
D3	71.41 \pm 0.18	71-71.6	7.63 \pm 0.47	6.71-8.4	15.18 \pm 0.51	14.2-16.27
D4	71.81 \pm 0.25	71.4-72.29	6.44 \pm 0.35	5.82-7	17.63 \pm 0.37	17-18.29

สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 20 ซม. ทำมุม 90 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	75.61 \pm 0.19	75.31-75.89	6.15 \pm 0.64	4.91-7.2	10.97 \pm 0.54	9.91-11.89
A2	74.9 \pm 0.16	74.8-75.2	7.74 \pm 0.39	6.91-8.49	16.25 \pm 0.51	15.11-17.09
A3	72.76 \pm 0.24	72.4-73.2	9.27 \pm 0.47	8.31-10.09	18.11 \pm 0.59	17.11-19.2
A3.5	69.83 \pm 0.19	69.42-70.09	8.94 \pm 0.42	7.91-9.6	22.83 \pm 0.92	20.52-24.09
A4	67.11 \pm 0.16	66.71-67.4	10.52 \pm 0.45	9.71-11.4	23.77 \pm 0.56	22.6-24.8
B1	76.54 \pm 0.27	76-77	5.98 \pm 0.5	5.2-6.98	7.97 \pm 0.28	7.4-8.4
B2	75.75 \pm 0.2	75.22-76	6.47 \pm 0.46	5.64-7.29	12.53 \pm 0.5	11.73-13.49
B3	71.02 \pm 0.17	70.71-71.4	8.61 \pm 0.54	7.6-9.69	22.43 \pm 0.56	21.51-23.49
B4	70.13 \pm 0.22	69.8-70.4	8.87 \pm 0.43	8-9.69	24.77 \pm 0.47	24.2-25.98
C1	72.94 \pm 0.22	72.71-73.4	6.48 \pm 0.5	5.71-7.4	12.02 \pm 0.46	11.11-12.98
C2	70.97 \pm 0.19	70.51-71.2	8.48 \pm 0.5	7.6-9.38	19.09 \pm 0.53	18.11-20.2
C3	65.95 \pm 0.16	65.6-66.2	9.25 \pm 0.53	8.51-10.38	20.96 \pm 0.61	19.57-21.8
C4	63.96 \pm 0.25	63.6-64.49	11.04 \pm 0.51	9.91-11.8	22.87 \pm 0.59	21.73-23.89
D2	74.45 \pm 0.26	74-74.98	6.99 \pm 0.59	5.64-8.07	10.02 \pm 0.52	8.93-10.78
D3	72.32 \pm 0.22	72-72.8	7.95 \pm 0.4	7.31-8.69	15.89 \pm 0.44	15.2-16.6
D4	72.55 \pm 0.29	72.2-73.29	6.36 \pm 0.54	5.24-7.2	17.93 \pm 0.42	17.2-18.67

สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 20 ซม. มุม 60 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	76.39 \pm 0.37	75.8-77	7.33 \pm 0.61	6.31-8.47	11.22 \pm 0.4	10.6-11.98
A2	75.53 \pm 0.27	74.91-75.8	8.74 \pm 0.35	8.11-9.29	16.95 \pm 0.58	15.91-18
A3	73.27 \pm 0.28	72.71-73.6	10.36 \pm 0.54	9.42-11.2	19.59 \pm 0.32	19-20.2
A3.5	69.24 \pm 0.22	68.91-69.6	10.17 \pm 0.46	9.51-11.2	23.55 \pm 0.53	22.8-24.6
A4	67.15 \pm 0.23	66.8-67.6	11.45 \pm 0.7	10.24-13	24.55 \pm 0.46	23.71-25.2
B1	76.79 \pm 0.24	76.4-77.29	6.49 \pm 0.53	5.51-7.38	8.97 \pm 0.44	8.11-9.89
B2	75.71 \pm 0.19	75.31-76	7.3 \pm 0.49	6.4-8.29	13.37 \pm 0.5	12.51-14.27
B3	71.2 \pm 0.23	70.8-71.6	9.77 \pm 0.39	9.11-10.6	23.21 \pm 0.46	22.4-24.2
B4	70.88 \pm 0.17	70.51-71	9.99 \pm 0.51	8.91-10.89	25.41 \pm 0.55	24.31-26.49
C1	73.29 \pm 0.24	72.82-73.69	7.62 \pm 0.41	6.8-8.29	12.79 \pm 0.42	11.91-13.29
C2	71.14 \pm 0.17	71-71.6	9.75 \pm 0.4	9.2-10.49	20.14 \pm 0.44	19.42-20.89
C3	66.39 \pm 0.22	66.11-66.78	10.52 \pm 0.67	9.51-11.98	22.17 \pm 0.49	21.4-23.2
C4	64.36 \pm 0.24	64-64.8	12.13 \pm 0.51	11.4-13.09	23.25 \pm 0.74	21.62-24.6
D2	75.01 \pm 0.24	74.4-75.2	7.67 \pm 1.37	3.53-8.69	10.41 \pm 0.45	9.8-11.58
D3	72.34 \pm 0.26	72-72.89	9.28 \pm 0.52	8.4-10.18	16.82 \pm 0.47	16-17.8
D4	72.86 \pm 0.12	72.71-73.09	7.69 \pm 0.55	6.6-8.67	18.85 \pm 0.41	18.02-19.4

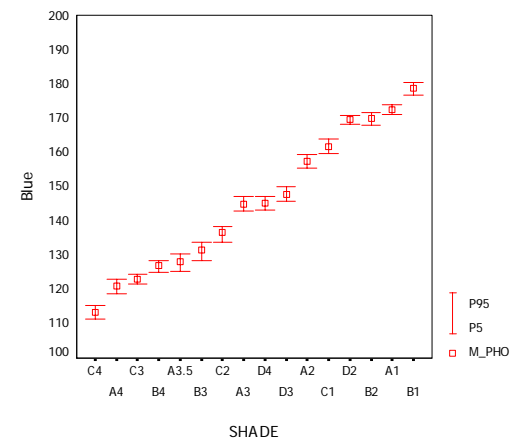
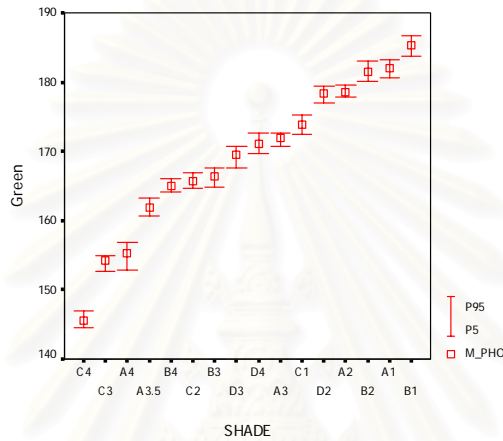
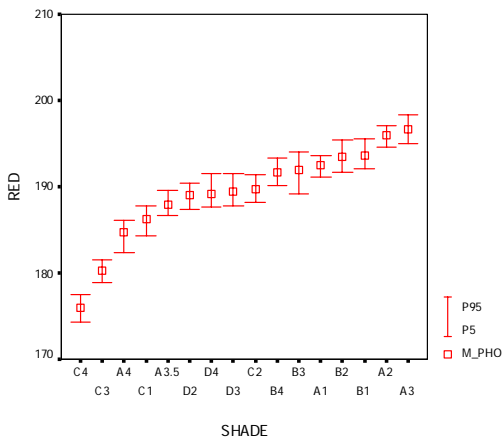
สี	ระยะห่างระหว่างกล่องกับชั้นตัวอย่าง 20 ซม. มุม 45 องศา					
	L*		a*		b*	
	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี	Mean \pm S.D	เกณฑ์กำหนดสี
A1	77.81 \pm 0.24	77.31-78.2	6.86 \pm 0.36	6.22-7.4	11.17 \pm 0.28	10.62-11.69
A2	76.95 \pm 0.21	76.6-77.38	7.99 \pm 0.49	7.11-8.8	15.84 \pm 0.54	14.91-16.89
A3	74.44 \pm 0.23	74-74.89	9.87 \pm 0.47	9-10.6	18.71 \pm 0.49	17.91-19.6
A3.5	71.03 \pm 0.11	70.91-71.29	9.57 \pm 0.39	8.91-10.27	23.02 \pm 0.48	22.22-24
A4	68.31 \pm 0.34	68-69	11.2 \pm 0.66	10.11-12.49	24.61 \pm 0.68	23.6-26.29
B1	78.01 \pm 0.13	77.91-78.4	6.52 \pm 0.52	5.62-7.56	8.65 \pm 0.46	7.51-9.29
B2	76.63 \pm 0.2	76.4-77	7.39 \pm 0.36	6.71-8	12.19 \pm 0.34	11.51-12.69
B3	71.66 \pm 0.24	71.2-72	9.47 \pm 0.54	8.4-10.4	23.1 \pm 0.38	22.4-23.89
B4	71.51 \pm 0.19	71.11-71.89	9.47 \pm 0.51	8.71-10.58	25.59 \pm 0.51	24.71-26.58
C1	74.06 \pm 0.3	73.51-74.4	7.69 \pm 0.41	7-8.58	12.68 \pm 0.63	11.51-13.69
C2	71.75 \pm 0.14	71.51-72	9.14 \pm 0.46	8.22-9.8	19.64 \pm 0.49	18.71-20.69
C3	67.56 \pm 0.18	67.2-67.89	9.99 \pm 0.35	9.4-10.6	21.64 \pm 0.47	21-22.69
C4	65.15 \pm 0.26	64.6-65.6	11.77 \pm 0.5	11.11-12.87	22.56 \pm 0.58	21.51-23.8
D2	75.41 \pm 0.23	74.91-75.69	7.85 \pm 0.55	6.8-8.89	10.17 \pm 0.45	9.31-11
D3	72.94 \pm 0.23	72.6-73.4	8.65 \pm 0.45	7.62-9.29	15.78 \pm 0.35	15.13-16.49
D4	73.41 \pm 0.22	73-73.8	7.15 \pm 0.59	6-8.18	18.14 \pm 0.55	16.91-19.18

จากตารางที่ 10 หากนำเกณฑ์กำหนดสีเมื่ออิงตามค่า R, G และ B แต่ละเฉดภายในสถานะเดียวกันมาสร้างเป็นกราฟ โดยเรียงตามลำดับค่าเฉลี่ยเฉดสี (Mean) จากน้อยไปมาก ได้ผลดังรูปที่ 19.1-19.6 และ

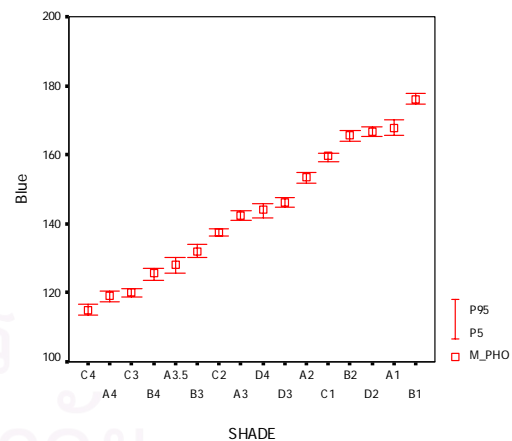
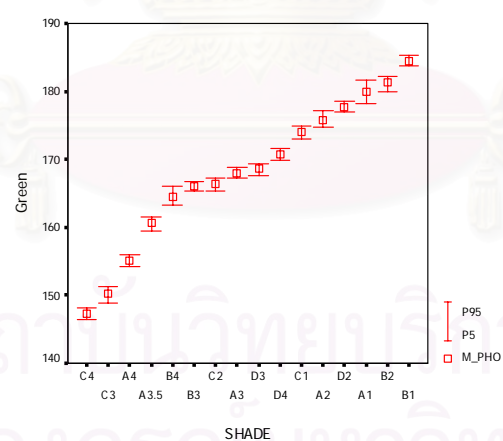
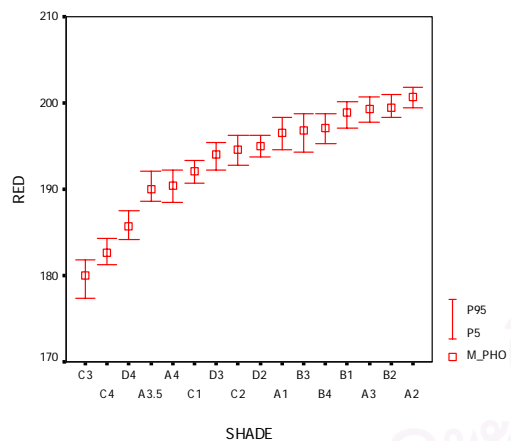
จากตารางที่ 11 หากนำเกณฑ์กำหนดสีเมื่ออิงตามค่า L^* , a^* และ b^* แต่ละเฉดภายในสถานะเดียวกันมาสร้างเป็นกราฟ โดยเรียงตามลำดับค่าเฉลี่ยเฉดสี (Mean) จากน้อยไปมาก ได้ผลดังรูปที่ 20.1- 20.6



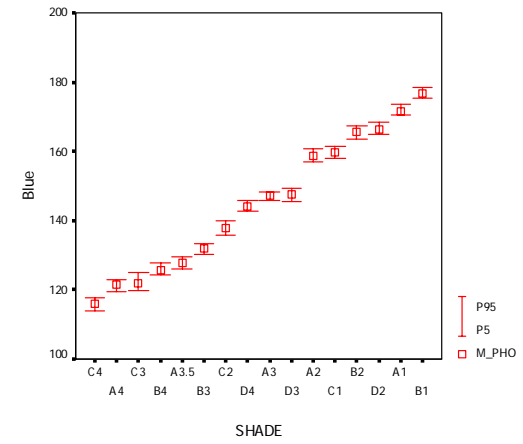
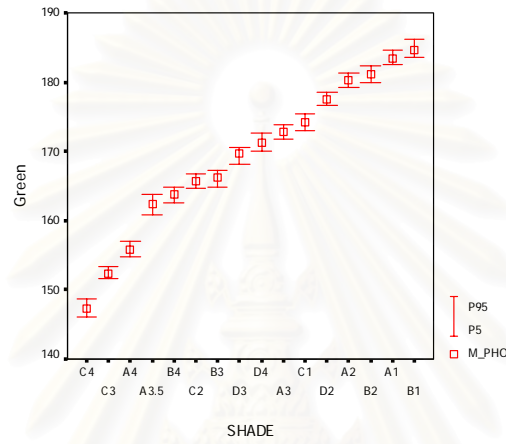
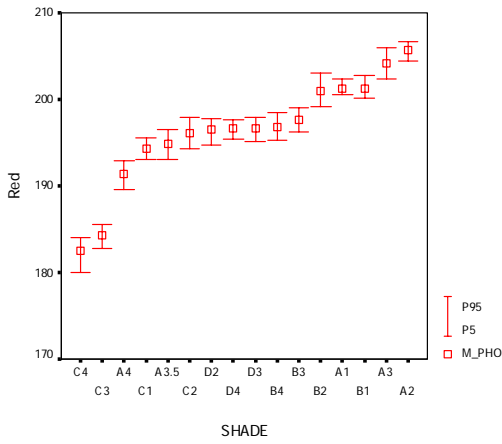
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



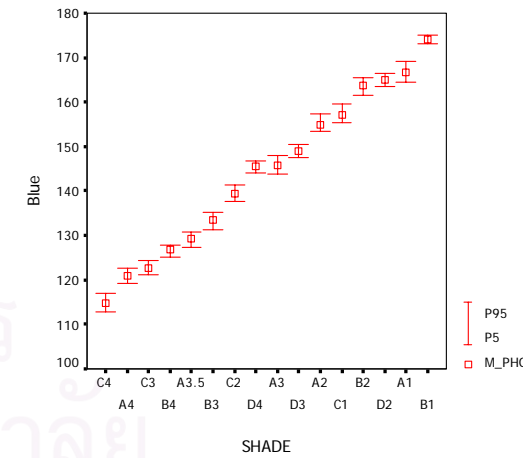
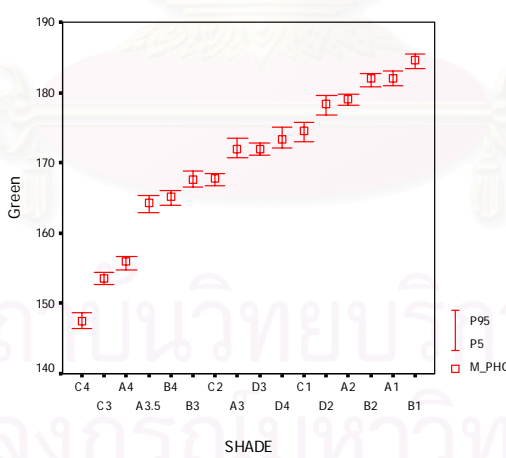
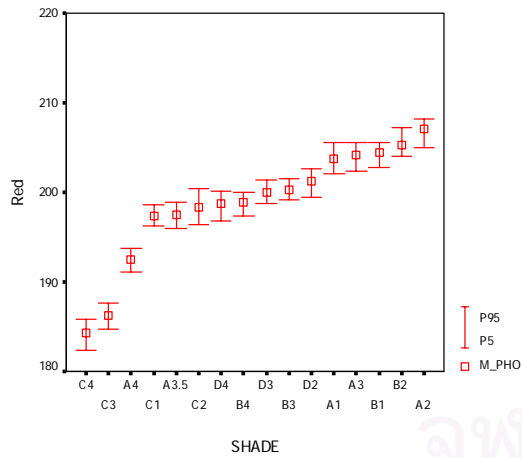
รูปที่ 19.1 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 10 ซม. 90 องศา



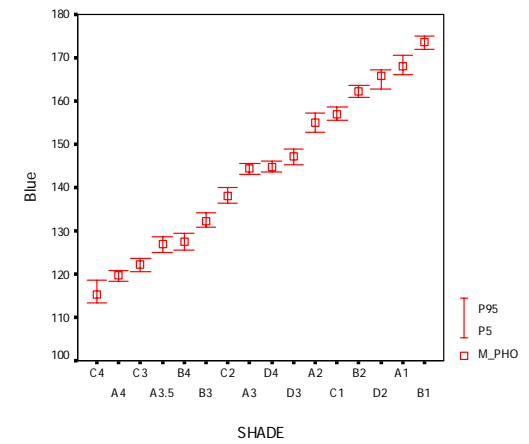
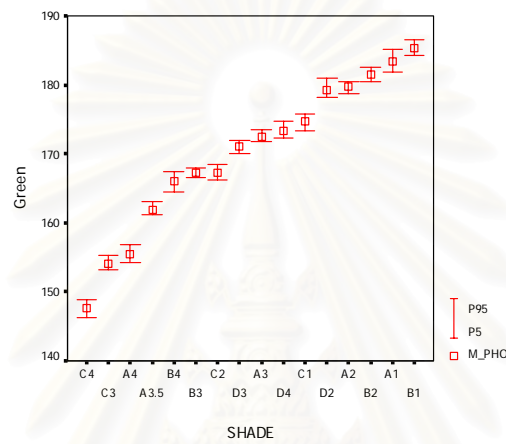
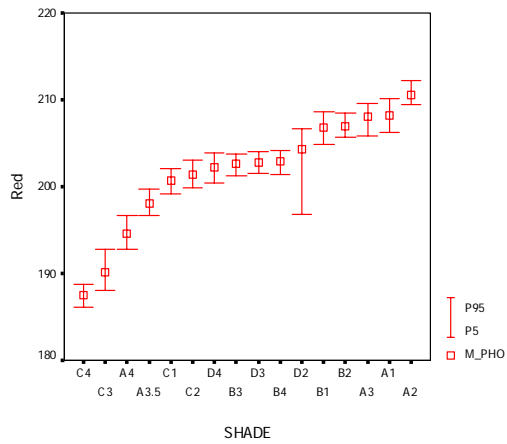
รูปที่ 19.2 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 10 ซม. 60 องศา



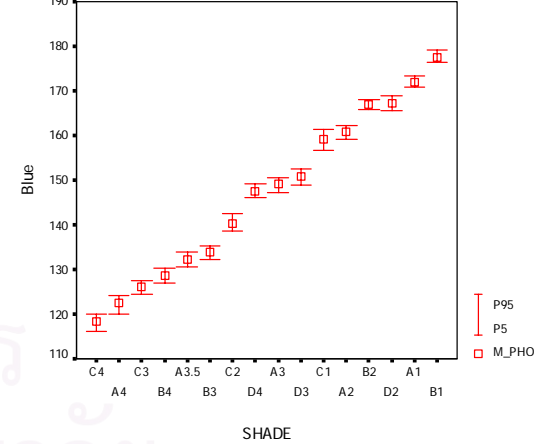
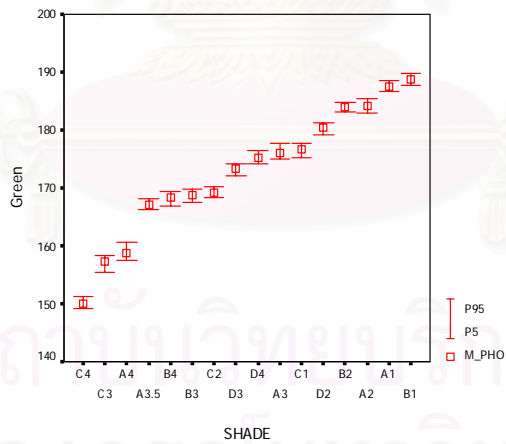
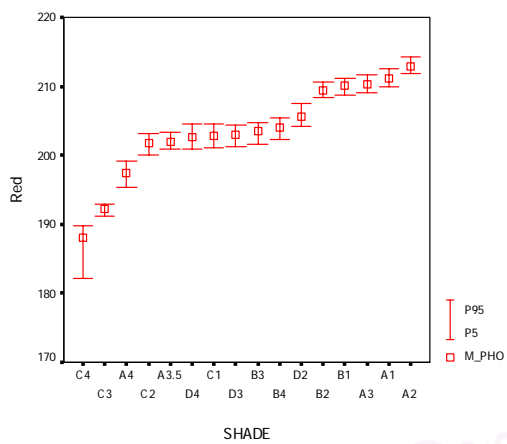
รูปที่ 19.3 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 10 ซม. 45 องศา



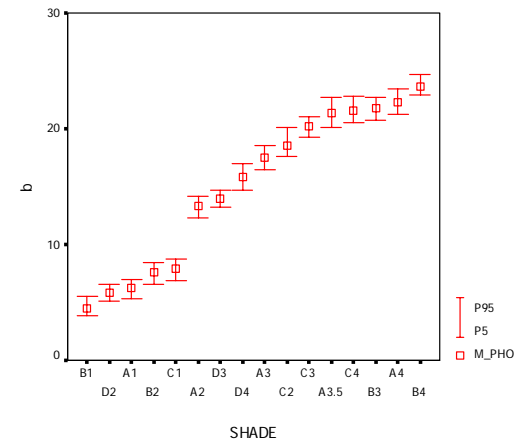
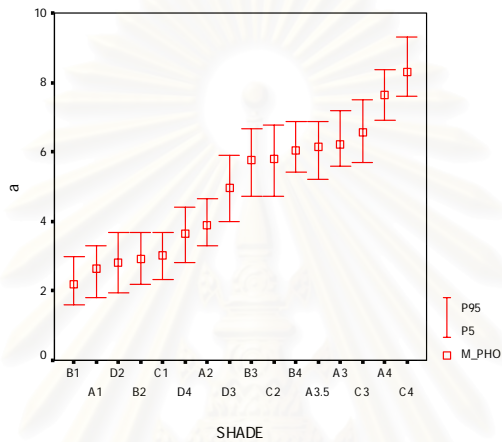
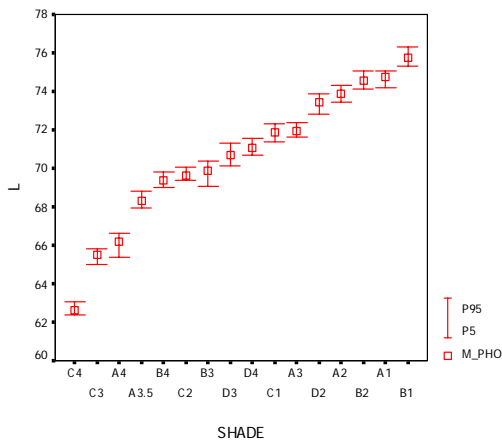
รูปที่ 19.4 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 20 ซม. 90 องศา



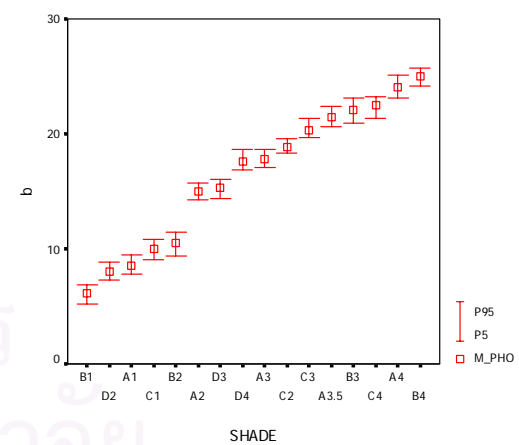
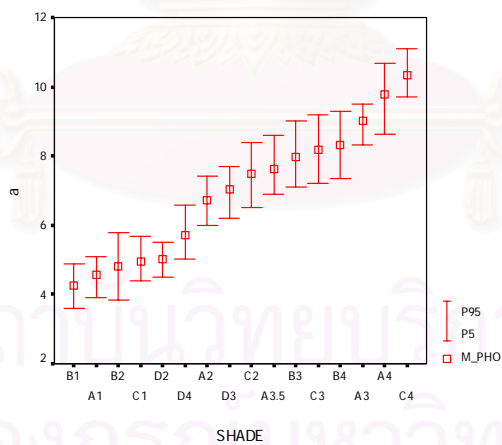
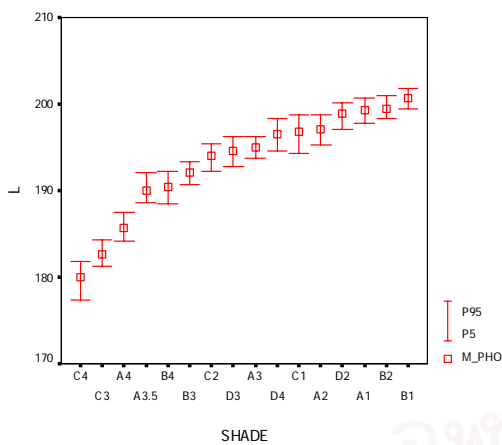
รูปที่ 19.5 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 20 ซม. 60 องศา



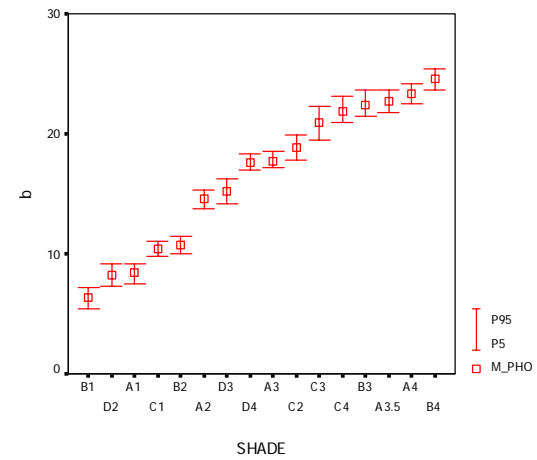
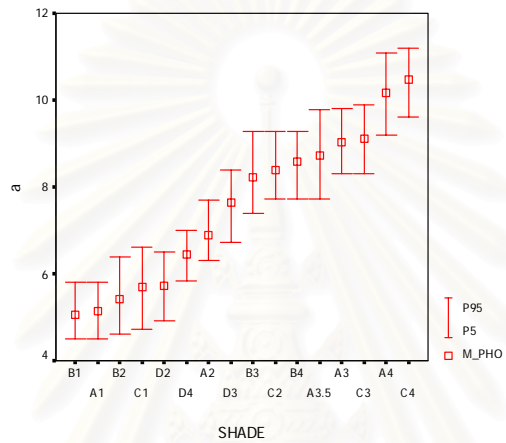
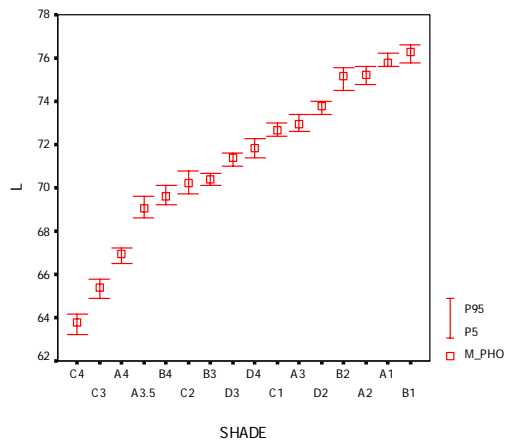
รูปที่ 19.6 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ95 ของค่าเฉลี่ย R G และB แบบช่วง ที่ 20 ซม. 45 องศา



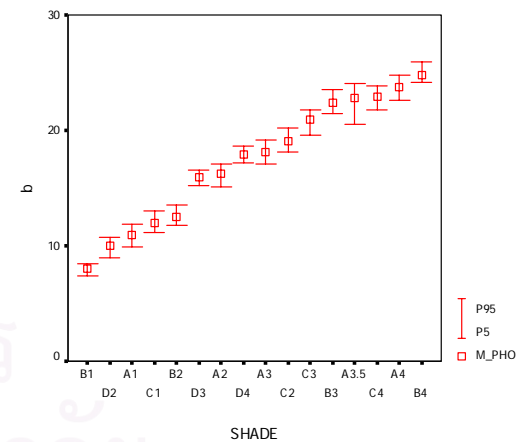
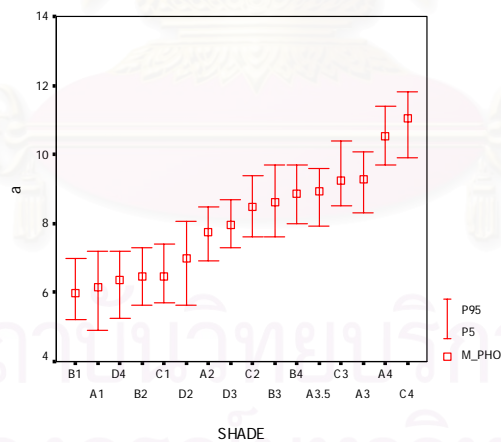
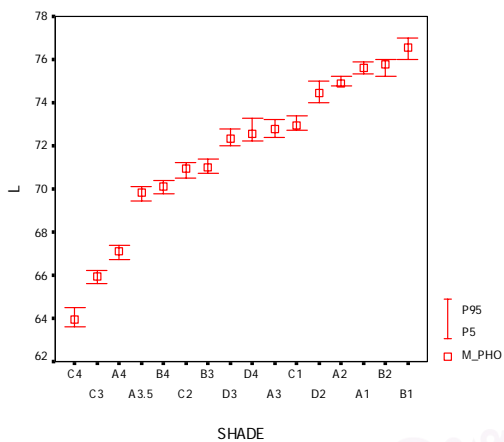
รูปที่ 20.1 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 90 องศา



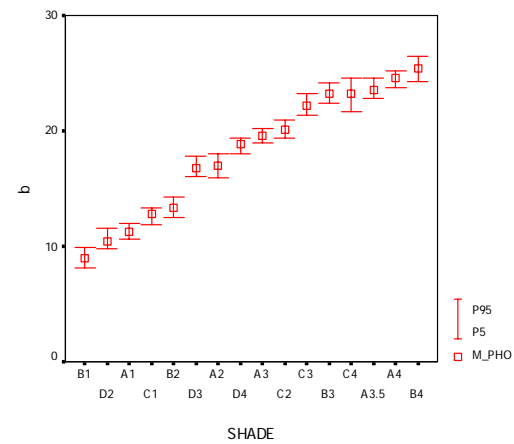
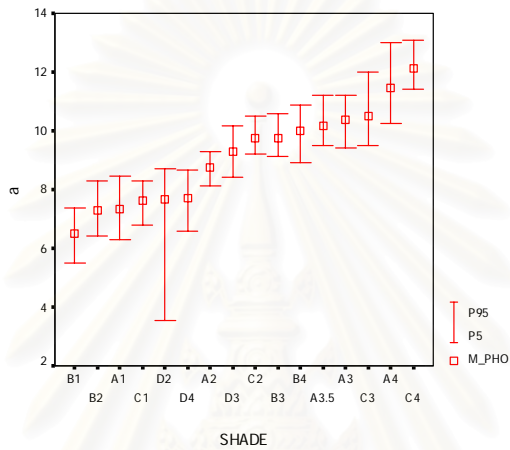
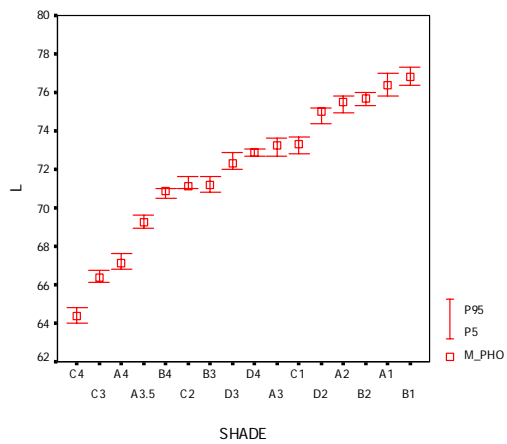
รูปที่ 20.2 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 60 องศา



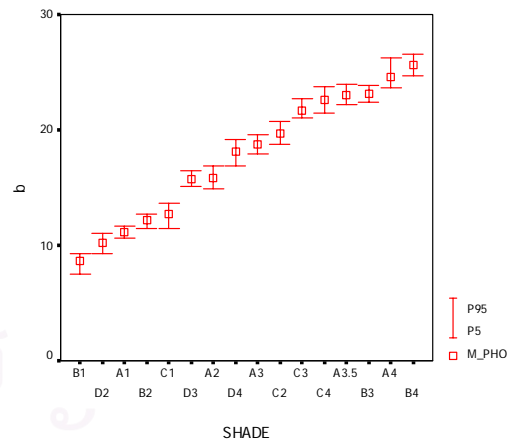
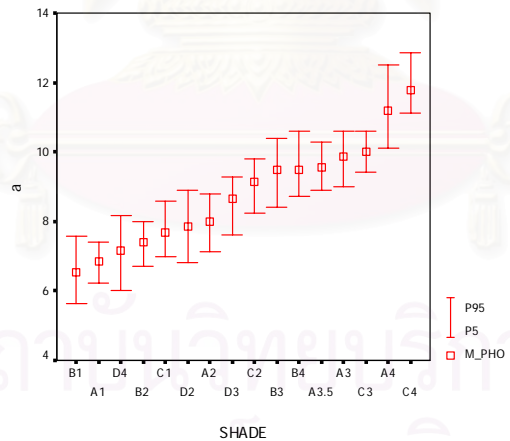
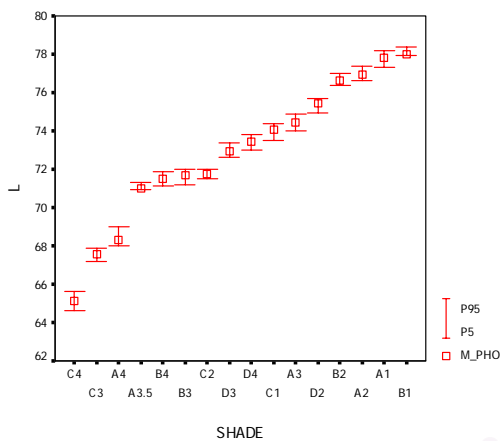
รูปที่ 20.3 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 10 ซม. 45 องศา



รูปที่ 20.4 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L* a* และ b* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 90 องศา



รูปที่ 20.5 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 60 องศา



รูปที่ 20.6 กราฟแสดงการประมาณค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 และ 95 ของค่าเฉลี่ย L^* , a^* และ b^* แบบช่วง ที่ 20 ซม. 45 องศา

จากรูปที่ 19.1-19.6 พบว่า ช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย R มีการคร่อมกันของค่าต่ำสุดและสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ G และ B ตามลำดับ จากการคร่อมกันที่ไม่มากของช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย B ทำให้สามารถแยกช่วงสีที่ต่างกันได้ ดังนั้นในการแยกสี จึงอาจพิจารณาจากเกณฑ์กำหนดสีที่อิงตามค่า B เป็นแนวทางเริ่มต้น กล่าวคือ นำค่าเฉลี่ย B ของภาพที่ต้องการกำหนดสีมาเทียบกับเกณฑ์กำหนดสีที่อิงตามค่า B ว่าตกอยู่ในช่วงของสีใด ต่อเมื่อยังกำหนดเฉดสีที่แน่นอนไม่ได้ เนื่องจากบางครั้งค่าสีที่นำมาเทียบนั้นไม่ได้อยู่ในช่วงของเกณฑ์สีใดเพียงสีเดียว แต่อยู่ในช่วงของเกณฑ์สีอื่นด้วย จึงต้องแยกสีโดยนำค่าเฉลี่ย G และ R ของภาพนั้น ๆ มาพิจารณาตามเกณฑ์กำหนดสีที่อิงตามค่า G และ R เพิ่มเติม ทั้งนี้จะใช้ตารางแสดงเกณฑ์ในการกำหนดสีที่อิงตามค่า R , G และ B ที่ได้จัดเรียงลำดับตามค่าเฉลี่ยจากน้อยไปมากเรียบร้อยแล้ว เพื่อสะดวกในการพิจารณา ดังตารางที่ 12 และ

จากรูปที่ 20.1-20.6 พบว่า ช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย a^* มีการคร่อมกันของค่าต่ำสุดและสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ L^* และ b^* ตามลำดับ เนื่องจากช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย b^* มีการคร่อมกันน้อยที่สุด ดังนั้นในการแยกสี จึงอาจพิจารณาจากเกณฑ์กำหนดสีที่อิงตามค่า b^* เป็นแนวทางเริ่มต้น ต่อเมื่อยังกำหนดเฉดสีที่แน่นอนไม่ได้ จึงพิจารณาเกณฑ์กำหนดสีที่อิงตามค่า L^* และ a^* เพิ่มเติม (ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับ RGB) ทั้งนี้จะใช้ตารางแสดงเกณฑ์ในการกำหนดสีที่อิงตามค่า L^* , a^* และ b^* ที่ได้จัดเรียงลำดับตามค่าเฉลี่ยจากน้อยไปมากเรียบร้อยแล้ว เพื่อสะดวกในการพิจารณา เช่นกัน ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 แสดงเกณฑ์ในการกำหนดสี อิงตามค่า R, G, B (เรียงตามค่าเฉลี่ย จากน้อยไปมาก)

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 90 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
111.37- 115.27	C4
118.71- 122.87	A4
121.71- 124.38	C3
124.93 -128.47	B4
125.41- 130.4	A3.5
128.5 -133.87	B3
133.88 -138.47	C2
142.91 -147.21	A3
143.22 -147.18	D4
145.71- 150	D3
155.33 -159.25	A2
159.71- 163.78	C1
168.26- 170.78	D2
168 -171.58	B2
171 -174	A1
176.71- 180.4	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
144.51 -146.98	C4
152.62- 155	C3
152.93 -156.78	A4
160.71- 163.2	A3.5
164.11 -166.09	B4
164.6 -166.89	C2
164.77- 167.6	B3
167.6 -170.69	D3
169.71 -172.56	D4
170.8 -172.69	A3
172.42 -175.29	C1
177 -179.49	D2
177.8 -179.58	A2
180.15 -183.09	B2
180.62 -183.27	A1
183.8 -186.69	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
174.31- 177.47	C4
178.91- 181.49	C3
182.4- 186.09	A4
184.33- 187.76	C1
186.71- 189.65	A3.5
187.42- 190.47	D2
187.6- 191.47	D4
187.71- 191.58	D3
188.13- 191.32	C2
190.11- 193.38	B4
189.17- 193.98	B3
191.13- 193.6	A1
191.71- 195.47	B2
192.11- 195.56	B1
194.6- 197.09	A2
195.04- 198.4	A3

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
113.6- 116.8	C4
117.22 -120.58	A4
118.82 -121.29	C3
123.71 -126.98	B4
125.71- 130.12	A3.5
130.33- 133.92	B3
136.51 -138.69	C2
140.91- 143.6	A3
141.75-145.76	D4
144.8- 147.49	D3
151.62 -154.8	A2

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
146.51-148.09	C4
148.82-151.2	C3
154.22-155.89	A4
159.4-161.6	A3.5
163.31-165.96	B4
165.31-166.8	B3
165.4-167.29	C2
167.22-168.89	A3
167.62-169.38	D3
169.82-171.6	D4
173.04-174.89	C1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
177.33 -181.78	C3
181.22 -184.27	C4
184.22 -187.49	D4
188.6- 192.03	A3.5
188.51 -192.16	A4
190.73 -193.29	C1
192.24 -195.47	D3
192.71 -196.2	C2
193.71 -196.29	D2
194.55 -198.27	A1
194.33 -198.8	B3

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
158.02 -160.49	C1
163.91- 167.16	B2
165.4 -168	D2
165.53 -170.09	A1
174.73- 177.69	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
174.8-177.07	A2
176.91-178.49	D2
178.2-181.6	A1
179.91-182.27	B2
183.71-185.38	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
195.31- 198.69	B4
197.04- 200.09	B1
197.71- 200.69	A3
198.31- 201	B2
199.42- 201.78	A2

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
114.02-117.78	C4
119.53-123.09	A4
119.73-124.89	C3
124.4-127.81	B4
125.91-129.4	A3.5
130.11-133.4	B3
135.62-139.87	C2
142.62-145.76	D4
145.75-148.29	A3
145.37-149.29	D3
157.02-160.76	A2
158.13-161.29	C1
163.53-167.36	B2
164.91-168.54	D2
170.62-173.47	A1
175.51-178.38	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
146.11-148.69	C4
151.6-153.29	C3
154.71-157	A4
160.91-163.78	A3.5
162.51-164.8	B4
164.6-166.69	C2
164.91-167.29	B3
168.2-170.6	D3
170.11-172.58	D4
171.82-173.78	A3
173-175.47	C1
176.71-178.58	D2
179.31-181.27	A2
179.93-182.38	B2
182.6-184.69	A1
183.51-186.2	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
180.02-184.09	C4
182.8-185.6	C3
189.62-192.89	A4
193-195.6	C1
193-196.56	A3.5
194.31-197.89	C2
194.75-197.8	D2
195.4-197.69	D4
195.11-197.89	D3
195.24-198.49	B4
196.24-199.09	B3
199.22-203	B2
200.51-202.38	A1
200.11-202.8	B1
202.31-206	A3
204.4-206.6	A2

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 90 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
112.86-116.98	C4
119.11-122.69	A4
121.22-124.25	C3
125.06-127.8	B4
127.33-130.89	A3.5
131.2-135.18	B3

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
146.51-148.69	C4
152.71-154.49	C3
154.8-156.6	A4
162.84-165.4	A3.5
163.91-166	B4
166.51-168.8	B3

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
182.42-185.89	C4
184.71-187.67	C3
191.11-193.78	A4
196.22-198.6	C1
195.91-198.87	A3.5
196.37-200.4	C2

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 90 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
137.64-141.25	C2
144-146.78	D4
143.91-148.09	A3
147.6-150.47	D3
153.4-157.29	A2
155.42-159.45	C1
161.64-165.4	B2
163.51-166.38	D2
164.44-169.07	A1
173.11-175	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
166.8-168.4	C2
170.73-173.58	A3
171.13-172.8	D3
172.2-175.09	D4
173.02-175.76	C1
176.82-179.67	D2
178.2-179.8	A2
180.8-182.78	B2
180.91-183	A1
183.33-185.49	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
196.82-200.09	D4
197.33-200	B4
198.73-201.4	D3
199.11-201.49	B3
199.51-202.6	D2
202.04-205.6	A1
202.31-205.49	A3
202.82-205.6	B1
204.04-207.25	B2
205-208.2	A2

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
113.2-118.58	C4
118.4-120.89	A4
120.42-123.49	C3
125-128.58	A3.5
125.55-129.34	B4
130.84-134.29	B3
136.31-139.87	C2
143.11-145.49	A3
143.6-146.2	D4
145.24-148.89	D3
152.84-157.18	A2
155.51-158.6	C1
160.71-163.6	B2
162.86-167.29	D2
166.2-170.49	A1
172-175.09	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
146.31-148.78	C4
153.11-155.2	C3
154.2-156.78	A4
161.11-163.09	A3.5
164.53-167.47	B4
166.51-167.98	B3
166.24-168.49	C2
170.11-171.89	D3
171.71-173.58	A3
172.31-174.76	D4
173.4-175.78	C1
178.13-181	D2
178.71-180.49	A2
180.42-182.58	B2
181.82-185.2	A1
184.31-186.6	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
186.11-188.69	C4
188.11-192.78	C3
192.8-196.67	A4
196.73-199.67	A3.5
199.11-202.09	C1
199.8-203.09	C2
200.35-203.87	D4
201.22-203.76	B3
201.51-204.09	D3
201.42-204.2	B4
196.82-206.65	D2
204.9-208.65	B1
205.71-208.49	B2
205.82-209.58	A3
206.2-210.09	A1
209.4-212.16	A2

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา

เกณฑ์กำหนดสี B	สี
116.02-120.09	C4
120.13-124.2	A4
124.51-127.56	C3
126.91-130.36	B4
130.42-133.8	A3.5
132.33-135.27	B3
138.64-142.38	C2
146-149.12	D4
147.31-150.6	A3
149.02-152.45	D3
156.64-161.4	C1
159.11-162.2	A2
165.71-168.09	B2
165.53-168.8	D2
170.71-173.29	A1
176.31-179.09	B1

เกณฑ์กำหนดสี G	สี
149.2-151.29	C4
155.51-158.38	C3
157.6-160.58	A4
166.31-168.09	A3.5
166.91-169.29	B4
167.51-169.8	B3
168.31-170.18	C2
172.11-174.18	D3
174.2-176.49	D4
174.93-177.69	A3
175.31-177.8	C1
179.22-181.2	D2
183.11-184.8	B2
182.91-185.45	A2
186.6-188.49	A1
187.73-189.69	B1

เกณฑ์กำหนดสี R	สี
182.19-189.78	C4
191.22-193	C3
195.31-199.09	A4
200-203.09	C2
200.82-203.27	A3.5
200.91-204.49	D4
201.11-204.6	C1
201.33-204.4	D3
201.64-204.78	B3
202.31-205.4	B4
204.2-207.45	D2
208.42-210.67	B2
208.66-211.2	B1
209.02-211.69	A3
210-212.58	A1
211.8-214.29	A2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 13 แสดงเกณฑ์ในการกำหนดสี อิงตามค่า L^* , a^* , b^* (เรียงตามค่าเฉลี่ย จากน้อยไปมาก)

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 90 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b^*	สี
3.82-5.49	B1
5.11-6.6	D2
5.31-6.98	A1
6.6-8.4	B2
6.91-8.8	C1
12.31-14.2	A2
13.2-14.69	D3
14.71-17	D4
16.44-18.58	A3
17.62-20.07	C2
19.31-21.07	C3
20.11-22.67	A3.5
20.53-22.78	C4
20.73-22.69	B3
21.2-23.4	A4
22.91-24.67	B4

เกณฑ์กำหนดสี L^*	สี
62.4-63.09	C4
65-65.8	C3
65.4-66.6	A4
67.91-68.8	A3.5
69-69.8	B4
69.4-70.09	C2
69.04-70.4	B3
70.11-71.29	D3
70.71-71.58	D4
71.4-72.29	C1
71.6-72.4	A3
72.8-73.89	D2
73.42-74.29	A2
74.11-75.09	B2
74.2-75.09	A1
75.31-76.29	B1

เกณฑ์กำหนดสี a^*	สี
1.6-2.98	B1
1.8-3.29	A1
1.93-3.69	D2
2.2-3.69	B2
2.31-3.69	C1
2.8-4.4	D4
3.31-4.67	A2
4-5.89	D3
4.71-6.67	B3
4.73-6.78	C2
5.4-6.89	B4
5.2-6.89	A3.5
5.6-7.18	A3
5.71-7.49	C3
6.91-8.36	A4
7.6-9.29	C4

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b^*	สี
5.2-6.89	B1
7.31-8.87	D2
7.82-9.49	A1
9.11-10.8	C1
9.42-11.49	B2
14.31-15.69	A2
14.4-16	D3
16.91-18.6	D4
17.11-18.6	A3
18.31-19.6	C2

เกณฑ์กำหนดสี L^*	สี
63.4-64.09	C4
64-64.8	C3
66.2-67	A4
66.2-67	A3.5
69.4-70.2	B4
69.8-70.78	B3
69.91-70.6	C2
70.6-71.2	D3
70.91-71.6	A3
71.4-72	D4

เกณฑ์กำหนดสี a^*	สี
3.6-4.89	B1
3.91-5.09	A1
3.84-5.8	B2
4.4-5.69	C1
4.51-5.49	D2
5.02-6.58	D4
6-7.4	A2
6.2-7.69	D3
6.51-8.4	C2
6.91-8.58	A3.5

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
19.71-21.4	C3
20.62-22.4	A3.5
20.93-23.09	B3
21.4-23.2	C4
23.11-25.09	A4
24.2-25.78	B4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
72-72.8	C1
73.2-73.89	A2
73.4-74	D2
73.8-75	A1
74.71-75.29	B2
75.6-76.4	B1

เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
7.11-9	B3
7.2-9.18	C3
7.33-9.29	B4
8.31-9.49	A3
8.62-10.67	A4
9.71-11.09	C4

ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
5.42-7.2	B1
7.31-9.2	D2
7.53-9.2	A1
9.82-11.07	C1
10-11.49	B2
13.71-15.29	A2
14.2-16.27	D3
17-18.29	D4
17.2-18.58	A3
17.82-19.89	C2
19.51-22.29	C3
20.91-23.09	C4
21.42-23.6	B3
21.82-23.6	A3.5
22.51-24.2	A4
23.62-25.4	B4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
63.22-64.18	C4
64.91-65.8	C3
66.51-67.2	A4
68.6-69.6	A3.5
69.2-70.09	B4
69.71-70.8	C2
70.11-70.69	B3
71-71.6	D3
71.4-72.29	D4
72.4-73	C1
72.6-73.4	A3
73.4-74	D2
74.51-75.58	B2
74.8-75.6	A2
75.6-76.2	A1
75.8-76.6	B1

เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
4.51-5.8	B1
4.51-5.8*	A1
4.6-6.4	B2
4.71-6.6	C1
4.91-6.49	D2
5.82-7	D4
6.31-7.69	A2
6.71-8.4	D3
7.4-9.29	B3
7.71-9.29	C2
7.71-9.29	B4
7.71-9.78	A3.5
8.31-9.8	A3
8.31-9.89	C3
9.2-11.09	A4
9.6-11.2	C4

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 90 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
7.4-8.4	B1
8.93-10.78	D2
9.91-11.89	A1
11.11-12.98	C1
11.73-13.49	B2
15.2-16.6	D3
15.11-17.09	A2
17.2-18.67	D4
17.11-19.2	A3
18.11-20.2	C2
19.57-21.8	C3
21.51-23.49	B3
20.52-24.09	A3.5
21.73-23.89	C4
22.6-24.8	A4
24.2-25.98	B4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
63.6-64.49	C4
65.6-66.2	C3
66.71-67.4	A4
69.42-70.09	A3.5
69.8-70.4	B4
70.51-71.2	C2
70.71-71.4	B3
72-72.8	D3
72.2-73.29	D4
72.4-73.2	A3
72.71-73.4	C1
74-74.98	D2
74.8-75.2	A2
75.31-75.89	A1
75.22-76	B2
76-77	B1

เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
5.2-6.98	B1
4.91-7.2	A1
5.24-7.2	D4
5.64-7.29	B2
5.71-7.4	C1
5.64-8.07	D2
6.91-8.49	A2
7.31-8.69	D3
7.6-9.38	C2
7.6-9.69	B3
8-9.69	B4
7.91-9.6	A3.5
8.51-10.38	C3
8.31-10.09	A3
9.71-11.4	A4
9.91-11.8	C4

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
8.11-9.89	B1
9.8-11.58	D2
10.6-11.98	A1
11.91-13.29	C1
12.51-14.27	B2
16-17.8	D3
15.91-18	A2
18.02-19.4	D4
19-20.2	A3
19.42-20.89	C2
21.4-23.2	C3
22.4-24.2	B3
21.62-24.6	C4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
64-64.8	C4
66.11-66.78	C3
66.8-67.6	A4
68.91-69.6	A3.5
70.51-71	B4
71-71.6	C2
70.8-71.6	B3
72-72.89	D3
72.71-73.09	D4
72.71-73.6	A3
72.82-73.69	C1
74.4-75.2	D2
74.91-75.8	A2

เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
5.51-7.38	B1
6.4-8.29	B2
6.31-8.47	A1
6.8-8.29	C1
3.53-8.69	D2
6.6-8.67	D4
8.11-9.29	A2
8.4-10.18	D3
9.2-10.49	C2
9.11-10.6	B3
8.91-10.89	B4
9.51-11.2	A3.5
9.42-11.2	A3

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
22.8-24.6	A3.5
23.71-25.2	A4
24.31-26.49	B4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
75.31-76	B2
75.8-77	A1
76.4-77.29	B1

เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
9.51-11.98	C3
10.24-13	A4
11.4-13.09	C4

ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา

เกณฑ์กำหนดสี b*	สี
7.51-9.29	B1
9.31-11	D2
10.62-11.69	A1
11.51-12.69	B2
11.51-13.69	C1
15.13-16.49	D3
14.91-16.89	A2
16.91-19.18	D4
17.91-19.6	A3
18.71-20.69	C2
21-22.69	C3
21.51-23.8	C4
22.22-24	A3.5
22.4-23.89	B3
23.6-26.29	A4
24.71-26.58	B4

เกณฑ์กำหนดสี L*	สี
64.6-65.6	C4
67.2-67.89	C3
68-69	A4
70.91-71.29	A3.5
71.11-71.89	B4
71.2-72	B3
71.51-72	C2
72.6-73.4	D3
73-73.8	D4
73.51-74.4	C1
74-74.89	A3
74.91-75.69	D2
76.4-77	B2
76.6-77.38	A2
77.31-78.2	A1
77.91-78.4	B1

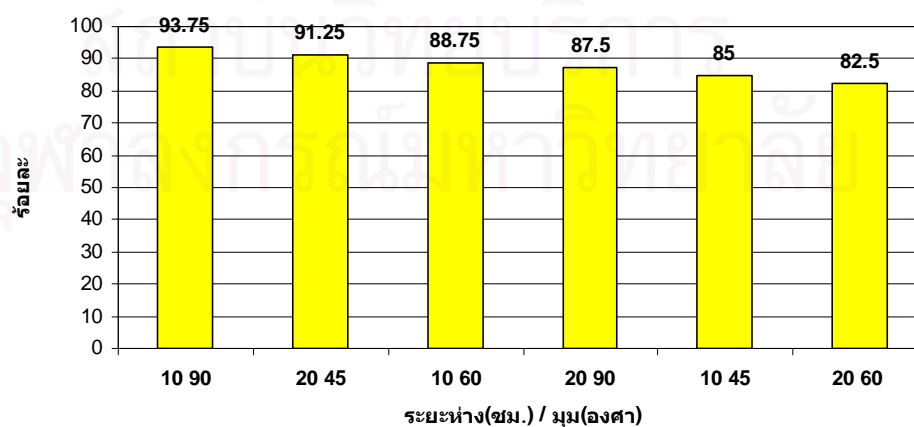
เกณฑ์กำหนดสี a*	สี
5.62-7.56	B1
6.22-7.4	A1
6-8.18	D4
6.71-8	B2
7-8.58	C1
6.8-8.89	D2
7.11-8.8	A2
7.62-9.29	D3
8.22-9.8	C2
8.4-10.4	B3
8.71-10.58	B4
8.91-10.27	A3.5
9-10.6	A3
9.4-10.6	C3
10.11-12.49	A4
11.11-12.87	C4

ผลการทดลองกำหนดเฉดสีจากภาพถ่ายพอร์ซเลน

จากการศึกษาพบว่า จำนวนภาพถ่ายที่มีการกำหนดเฉดสีได้ถูกต้อง เมื่ออ่านค่าด้วย โหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ ที่ระยะห่างระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่าง 10, 20 ซม. มุมกล้อง 90, 60 และ 45 องศา ตามลำดับ สามารถสรุปผลดังแสดงในตารางที่ 14 และตารางที่ 15 โดยจำแนก จำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องออกตามค่า B, G, R และ b^*, a^*, L^* ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการอิงเพื่อกำหนดสี ซึ่งเมื่อนำร้อยละของภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องในแต่ละสภาวะมาสร้างเป็น แผนภูมิแท่งโดยเรียงลำดับจากร้อยละที่มากไปน้อย ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 21 และ รูปที่ 22

ตารางที่ 14 แสดงจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด RGB ที่ ระยะห่าง และมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่าง ต่าง ๆ กัน

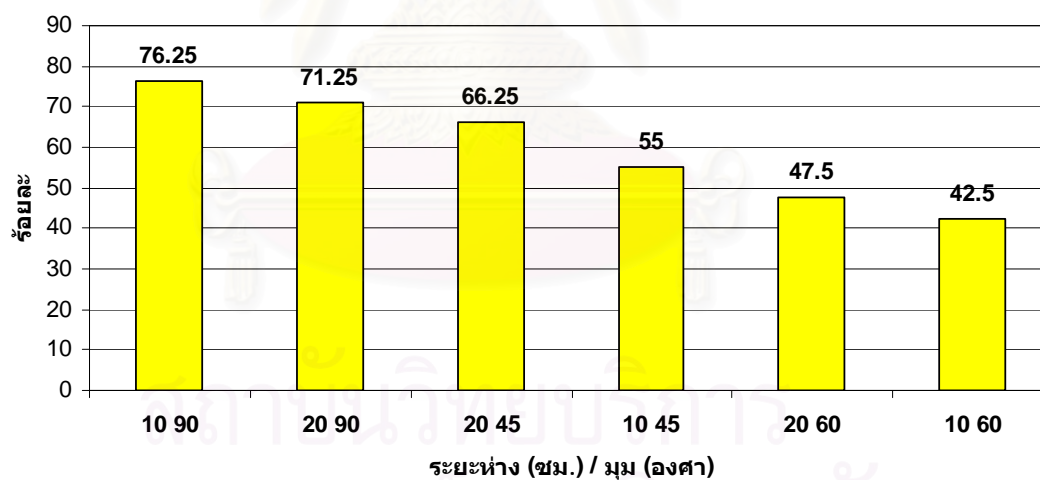
ระยะห่าง (ซม.)/ มุม(องศา)	ภาพ ทั้งหมด	จำนวนภาพที่กำหนดสีถูก					รวม	ร้อยละ
		B	BG	BR	RG	BGR		
10 90	80	57	9	2	3	4	75	93.75
10 60	80	57	13	1	0	0	71	88.75
10 45	80	50	16	0	2	0	68	85
20 90	80	45	17	2	0	6	70	87.5
20 60	80	61	1	4	0	0	66	82.5
20 45	80	48	15	6	0	4	73	91.25
รวม	480	318	71	15	5	14	423	88.13
คิดเป็นร้อยละ		66.25	14.79	3.13	1.04	2.92		



รูปที่ 21 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้อง เมื่อพิจารณาจากโหมด RGB ที่ระยะห่าง 10 และ 20 ซม. มุม 90, 60 และ 45 องศา

ตารางที่ 15 แสดงจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด $L^*a^*b^*$ ที่ระยะห่าง และมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับพื้นผิวอย่าง ต่าง ๆ กัน

ระยะห่าง (ซม.)/ มุม(องศา)	ภาพ ทั้งหมด	จำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้อง					รวม	ร้อยละ
		b^*	b^*a^*	b^*L^*	L^*a^*	$b^*a^*L^*$		
10 90	80	13	19	5	2	22	61	76.25
10 60	80	11	9	9	4	1	34	42.5
10 45	80	21	6	13	1	3	44	55
20 90	80	19	13	3	0	21	57	71.25
20 60	80	12	7	1	0	18	38	47.5
20 45	80	12	19	2	1	19	53	66.25
รวม	480	88	73	33	8	84	287	59.79
คิดเป็นร้อยละ		18.33	15.21	6.88	1.67	17.5		



รูปที่ 22 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากโหมด $L^*a^*b^*$ ที่ระยะห่าง 10 และ 20 ซม. มุม 90, 60 และ 45 องศา

เมื่อพิจารณารูปที่ 21 และรูปที่ 22 พบว่า จำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องเมื่ออ่านค่าด้วยโหมด RGB มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 82.5 ถึงร้อยละ 93.75 ซึ่งมากกว่า $L^*a^*b^*$ ที่มีจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องอยู่ระหว่างร้อยละ 42.5 ถึงร้อยละ 76.25 หากนำจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดสีพอร์ชเลนได้ถูกต้อง เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ มาวิเคราะห์ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วนสองกลุ่มตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กัน (McNemar) พบว่า ทั้ง 2 โหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 16 โดยจำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลนด้วยโหมด RGB มีปริมาณที่มากกว่าโหมด $L^*a^*b^*$ ในทุกสภาวะ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 16 แสดงสถิติทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสีพอร์ชเลนเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี ระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$

	Value	Exact Sig. (2-sided)
McNemar Test		.000 ^a
N of Valid Cases	480	

a. Binomial distribution used.

LABS * RGBS Crosstabulation

Count		RGSB		Total
		ถูก	ผิด	
LABS	ถูก	272	15	287
	ผิด	151	42	193
Total		423	57	480

ตารางที่ 17 แสดงการทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสีพอร์ชเลนในแต่ละสถานะ เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ L*a*b*

COND		Value	Exact Sig. (2-sided)
1090	McNemar Test		.001 ^a
	N of Valid Cases	80	
1060	McNemar Test		.000 ^a
	N of Valid Cases	80	
1045	McNemar Test		.000 ^a
	N of Valid Cases	80	
2090	McNemar Test		.001 ^a
	N of Valid Cases	80	
2060	McNemar Test		.000 ^a
	N of Valid Cases	80	
2045	McNemar Test		.000 ^a
	N of Valid Cases	80	

a. Binomial distribution used.

LABS * RGBS Crosstabulation

Count

COND			RGS		Total
			ถูก	ผิด	
1090	LABS	ถูก	59	2	61
		ผิด	16	3	19
	Total		75	5	80
1060	LABS	ถูก	29	5	34
		ผิด	42	4	46
	Total		71	9	80
1045	LABS	ถูก	42	2	44
		ผิด	26	10	36
	Total		68	12	80
2090	LABS	ถูก	56	1	57
		ผิด	14	9	23
	Total		70	10	80
2060	LABS	ถูก	36	2	38
		ผิด	30	12	42
	Total		66	14	80
2045	LABS	ถูก	50	3	53
		ผิด	23	4	27
	Total		73	7	80

หากนำจำนวนภาพที่กำหนดสีพอร์ชเลนได้ถูกต้อง เมื่ออ่านค่าด้วยโหมด RGB ณะระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน มาวิเคราะห์ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วนสองกลุ่มตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกัน (Chi-Square) ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อใช้โหมด RGB ความแตกต่างของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างไม่มีผลต่อการกำหนดสีพอร์ชเลน อย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงสถิติทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสีพอร์ชเลนเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี RGB ที่ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างต่าง ๆ กัน

Chi-Square Tests

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	6.390	5	.270

COND * RGBS Crosstabulation

			RGBS		Total
			ถูก	ผิด	
COND	1090	Count	75	5	80
		% within COND	93.8%	6.3%	100.0%
1060	Count	71	9	80	
	% within COND	88.8%	11.3%	100.0%	
1045	Count	68	12	80	
	% within COND	85.0%	15.0%	100.0%	
2090	Count	70	10	80	
	% within COND	87.5%	12.5%	100.0%	
2060	Count	66	14	80	
	% within COND	82.5%	17.5%	100.0%	
2045	Count	73	7	80	
	% within COND	91.3%	8.8%	100.0%	
Total	Count	423	57	480	
	% within COND	88.1%	11.9%	100.0%	

สำหรับโหมด L*a*b* เมื่อนำจำนวนภาพที่กำหนดสีพอร์ชเลนได้ถูกต้อง ณ ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน มาวิเคราะห์ด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วนสองกลุ่ม ตัวอย่างที่เป็นอิสระต่อกัน (Chi-Square) ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อใช้โหมด L*a*b* ความแตกต่างของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างมีผลต่อการกำหนดสีพอร์ชเลน อย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 แสดงสถิติทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสีพอร์ชเลน เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี L*a*b* ที่ระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างต่าง ๆ กัน

Chi-Square Tests

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	30.512	5	.000

COND * LABS Crosstabulation

			LABS		Total
			ถูก	ผิด	
COND	1090	Count	61	19	80
		% within COND	76.3%	23.8%	100.0%
	1060	Count	34	46	80
		% within COND	42.5%	57.5%	100.0%
	1045	Count	44	36	80
		% within COND	55.0%	45.0%	100.0%
	2090	Count	57	23	80
		% within COND	71.3%	28.8%	100.0%
	2060	Count	38	42	80
		% within COND	47.5%	52.5%	100.0%
	2045	Count	53	27	80
		% within COND	66.3%	33.8%	100.0%
Total		Count	287	193	480
		% within COND	59.8%	40.2%	100.0%

หากนำจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้อง ในแต่ละสภาวะ เมื่ออ่านค่าด้วยโหมด L*a*b* มาจับคู่วิเคราะห์ความแตกต่างด้วยสถิติทดสอบค่าสัดส่วน Chi-Square จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 แสดงการจับคู่ทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนความถูกต้องในการกำหนดสีพอร์ซเลนด้วยโหมดสี L*a*b* ในแต่ละสภาวะ

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มุม 90 องศา กับ ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	18.889	1	.000

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มุม 90 องศา กับ ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	8.007	1	.005

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มุม 60 องศา กับ ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	2.502	1	.114

ระหว่างระยะห่าง 20 ซม.มุม 90 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	9.354	1	.002

ระหว่างระยะห่าง 20 ซม.มุม 60 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	5.733	1	.017

ระหว่างระยะห่าง 20 ซม.มุม 90 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	.465	1	.495

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 90 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 90 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	.517	1	.472

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 90 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 60 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	14.016	1	.000

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 90 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	1.953	1	.162

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 60 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 90 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	13.480	1	.000

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 60 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 60 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	.404	1	.525

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 60 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	9.095	1	.003

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม.มูม 45 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มูม 90 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	4.538	1	.033

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	.901	1	.343

ระหว่างระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา กับ ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
Pearson Chi-Square	2.121	1	.145

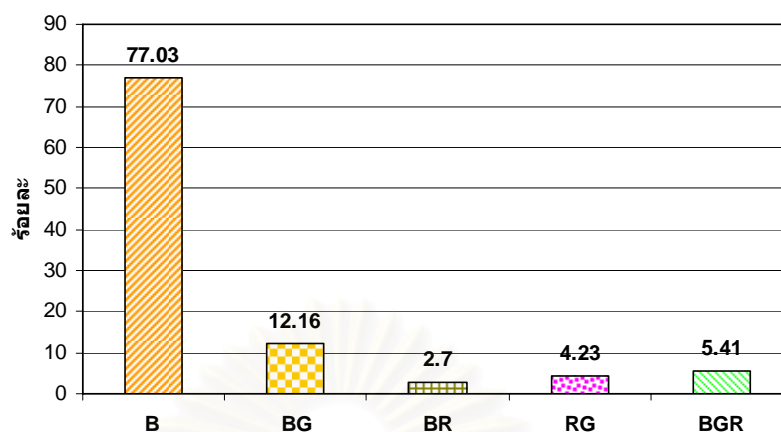
จากตารางที่ 20 พบว่า เมื่อใช้โหมด L*a*b* ระยะห่างระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการกำหนดเฉดสี อย่างมีนัยสำคัญ แต่มุมที่ใช้ถ่ายมีผลต่อการกำหนดเฉดสี อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุมกล้อง 90 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องมากกว่ามุม 45 และ 60 องศา ทั้งนี้ที่มุม 45 และ 60 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน สำหรับระยะห่าง 20 ซม. ที่มุม 90 องศา และ 45 องศา ให้สัดส่วนจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน และดีกว่ามุม 60 องศา อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สรุปได้ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ซเลนด้วยโหมด L*a*b*

ร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้อง	ระยะห่าง/มุม					
	10 90	20 90	20 45	10 45	20 60	10 60
	76.25	71.25	66.25	55	47.5	42.5

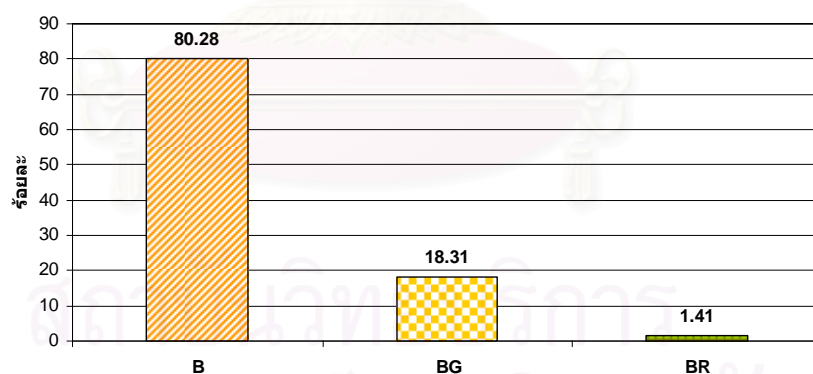
(— แสดงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ, $p \geq 0.05$)

เมื่อนำจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้อง ในแต่ละสภาวะ มาพิจารณาจำแนกออกตามค่า R, G และ B สามารถแยกออกได้เป็น กำหนดสีถูกต้องโดยอิงจากค่า B อย่างเดียว ใช้ค่า B ร่วมกับค่า G ค่า B ร่วมกับค่า R ค่า R ร่วมกับค่า G หรืออิงทั้งค่า B G R ในการกำหนดสี ซึ่งแสดงจำนวนในรูปแบบของร้อยละได้ดังแผนภูมิแท่ง รูปที่ 23 ถึง รูปที่ 28



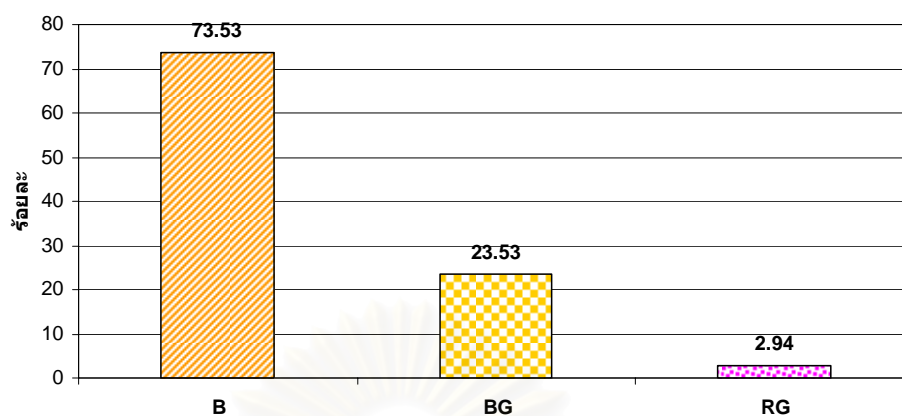
รูปที่ 23 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 90 องศา

จากรูปที่ 23 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 90 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 77.03 เมื่อใช้ค่า B ร่วมกับค่า G จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 12.16 ใช้ค่า B ร่วมกับค่า R เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 2.7 ใช้ค่า R ร่วมกับค่า G และใช้ทั้งค่า B G R จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 4.23 และ ร้อยละ 5.41 ตามลำดับ



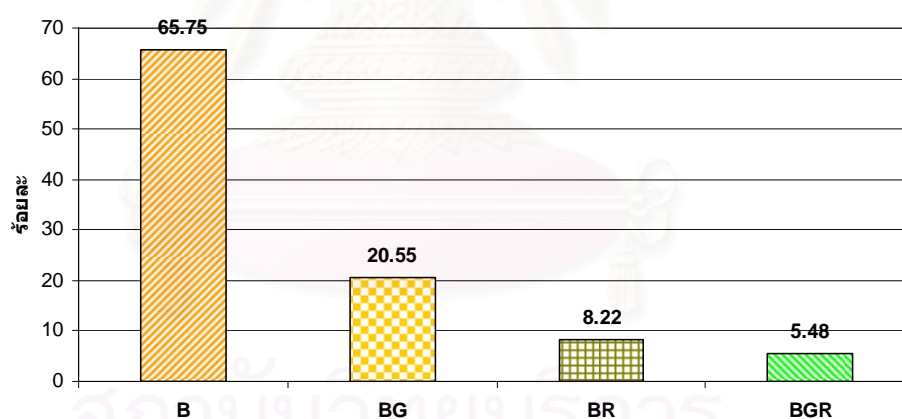
รูปที่ 24 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา

จากรูปที่ 24 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 60 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 80.28 เมื่อใช้ค่า B ร่วมกับค่า G และ ค่า B ร่วมกับค่า R จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 18.31 และ ร้อยละ 1.41 ตามลำดับ



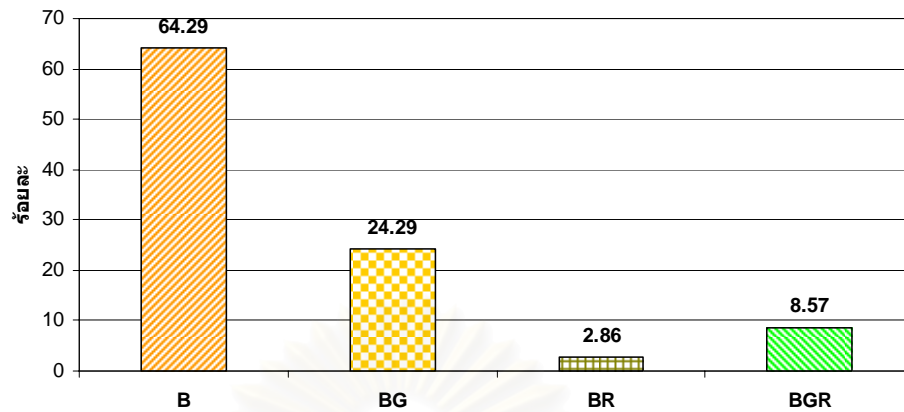
รูปที่ 25 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา

จากรูปที่ 25 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม. มุม 45 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 73.53 เมื่อใช้ค่า B ร่วมกับค่า G และค่า R ร่วมกับค่า G จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 23.53 และร้อยละ 2.94 ตามลำดับ



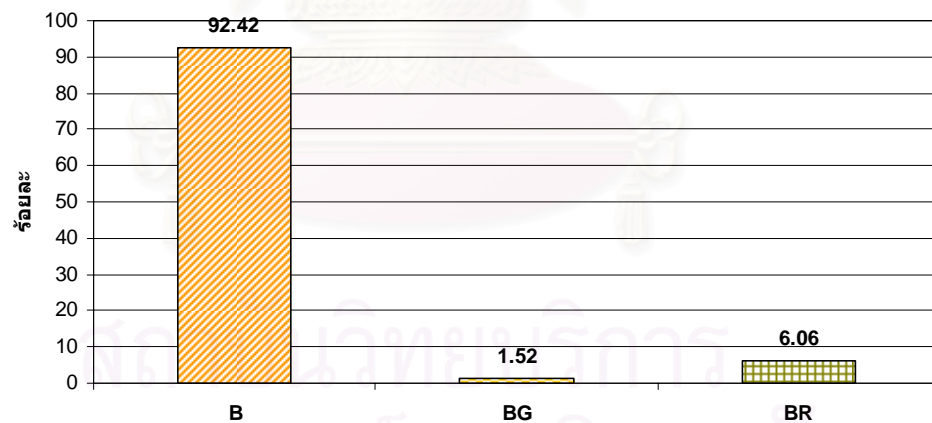
รูปที่ 26 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม. 45 องศา

จากรูปที่ 26 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม. มุม 45 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 65.75 เมื่อใช้ค่า B ร่วมกับค่า G ค่า B ร่วมกับค่า R และใช้ทั้งร่วมกันทั้ง B G R จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 20.55, ร้อยละ 8.22 และร้อยละ 5.48 ตามลำดับ



รูปที่ 27 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม.90 องศา

จากรูปที่ 27 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม.มุม 90 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้ถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 64.29 ใช้ค่า B ร่วมกับค่า G ค่า B ร่วมกับค่า R และใช้ร่วมกันทั้ง B G R จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 24.29, ร้อยละ 2.86 และร้อยละ 8.57 ตามลำดับ

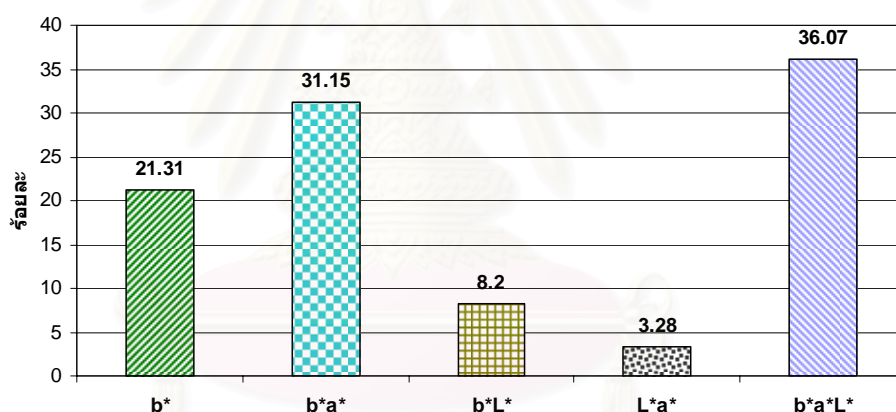


รูปที่ 28 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า RGB ที่ระยะ 20 ซม.60 องศา

จากรูปที่ 28 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม.มุม 60 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้ถูกต้อง โดยอิงจากค่า B อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 92.42 ใช้ค่า B ร่วมกับค่า G และใช้ค่า B ร่วมกับค่า R จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 1.52 และร้อยละ 6.06 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 23 ถึง รูปที่ 28 และตารางที่ 14 พบว่า การกำหนดเฉดสีโดยพิจารณาจากค่าในโหมด RGB นั้น ค่า B เป็นค่าที่ทำให้มีการกำหนดเฉดสีถูกต้องเป็นส่วนมาก คิดเป็นร้อยละ 66.25 ต่อเมื่อใช้ค่า B แล้วยังกำหนดเฉดสีไม่ได้จึงพิจารณาค่า B ร่วมกับ ค่า G ซึ่งจะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีก คิดเป็นร้อยละ 14.79 เมื่อใช้ค่า B ร่วมกับ ค่า R และ พิจารณาร่วมกันทั้ง BGR จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 3.13 และร้อยละ 2.92 ตามลำดับ

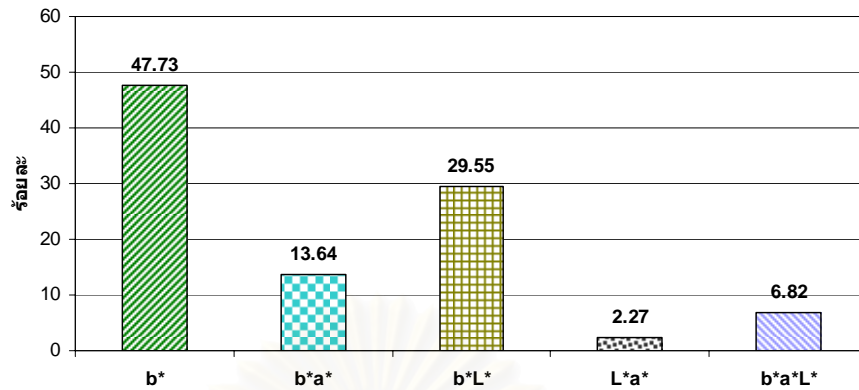
เมื่อนำจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้อง ในแต่ละสภาวะ มาพิจารณาจำแนกออกตามค่า L^* a^* b^* สามารถแยกออกได้เป็นกำหนดสีถูกต้องโดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว .ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* หรือ อิงทั้งค่า b^* a^* L^* ในการกำหนดสี ซึ่งแสดงจำนวนในรูปของร้อยละได้ดังแผนภูมิแท่ง รูปที่ 29 ถึงรูปที่ 34



รูปที่ 29 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง

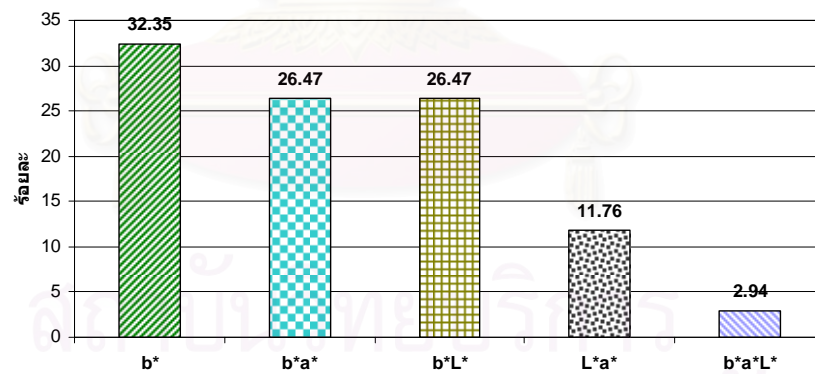
จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.90 องศา

รูปที่ 29 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม.มุม 90 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียวมีอยู่ร้อยละ 21.31 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.15 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* และใช้ร่วมกันทั้ง b^* a^* L^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 8.2, ร้อยละ 3.28 และ ร้อยละ 36.07 ตามลำดับ



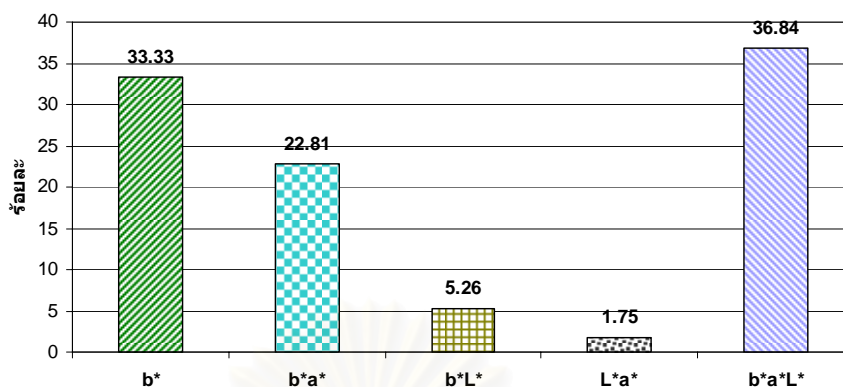
รูปที่ 30 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.45 องศา

รูปที่ 30 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม.มุม 45 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 47.73 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.64 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* และใช้ร่วมกันทั้ง $b^* a^* L^*$ จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 29.55, ร้อยละ 2.27 และร้อยละ 6.82 ตามลำดับ



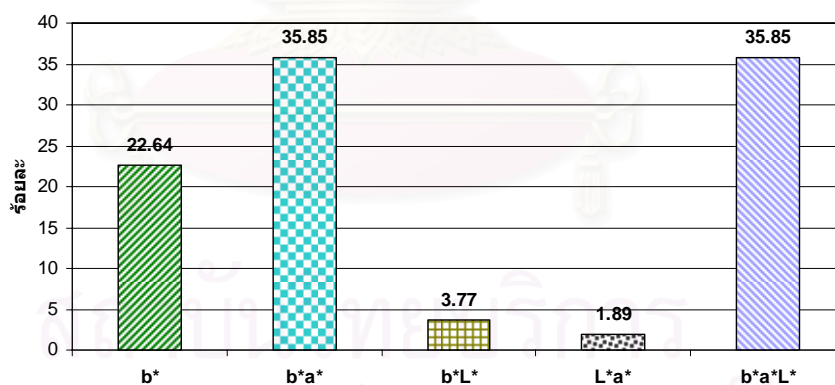
รูปที่ 31 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 10 ซม.60 องศา

รูปที่ 31 พบว่าที่ระยะห่าง 10 ซม.มุม 60 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 32.35 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นร้อยละร้อยละ 26.47 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* และใช้ร่วมกันทั้ง $b^* a^* L^*$ จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 26.47, ร้อยละ 11.76 และ ร้อยละ 2.94 ตามลำดับ



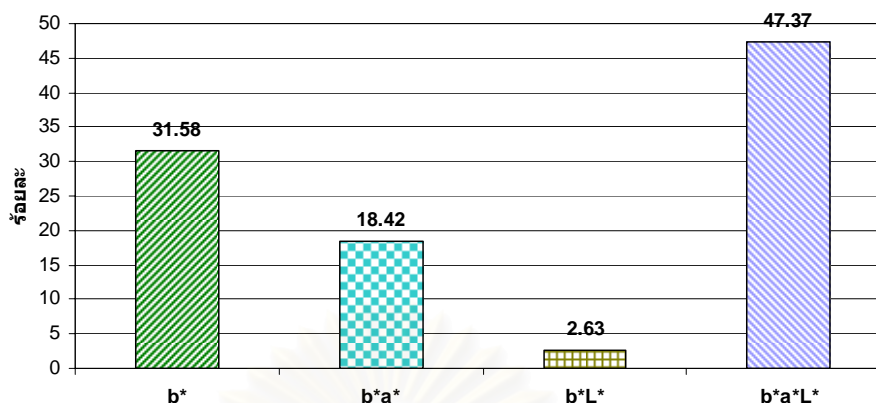
รูปที่ 32 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม.90 องศา

รูปที่ 32 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม.มุม 90 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 33.33 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 22.81 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* และใช้ร่วมกันทั้งค่า b^* a^* L^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 5.26, ร้อยละ 1.75 และ ร้อยละ 36.84 ตามลำดับ



รูปที่ 33 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง
จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม.45 องศา

รูปที่ 33 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม.มุม 45 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเจดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 22.64 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.85 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* ค่า L^* ร่วมกับค่า a^* และใช้ร่วมกันทั้ง b^* a^* L^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 3.77, ร้อยละ 1.89 และร้อยละ 35.85 ตามลำดับ

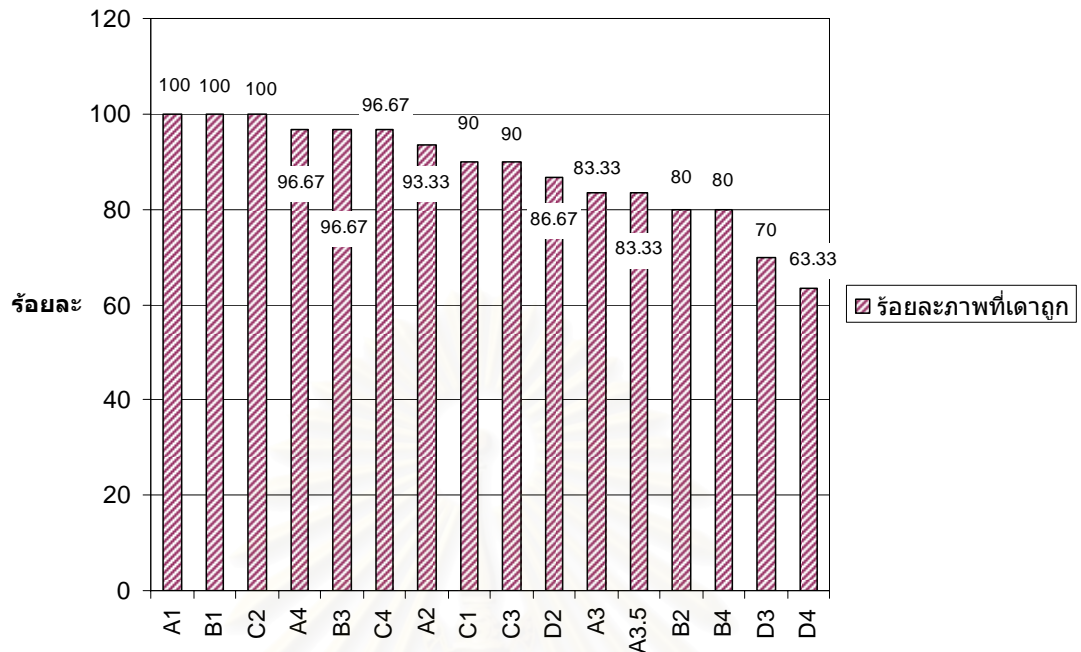


รูปที่ 34 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง จำแนกตามค่า $L^*a^*b^*$ ที่ระยะ 20 ซม. 60 องศา

รูปที่ 34 พบว่าที่ระยะห่าง 20 ซม. มุม 60 องศา จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้อย่างถูกต้อง โดยอิงจากค่า b^* อย่างเดียว มีอยู่ร้อยละ 31.58 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* และใช้ร่วมกันทั้ง b^* a^* L^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 18.42, ร้อยละ 2.63 และร้อยละ 47.37 ตามลำดับ

จากรูปที่ 29 ถึง รูปที่ 34 และตารางที่ 15 พบว่า การกำหนดเฉดสีโดยพิจารณาจากค่า $L^*a^*b^*$ นั้น ค่า b^* เป็นค่าที่ทำให้มีการกำหนดเฉดสีถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 18.33 ใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า a^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดสีถูกต้องเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 15.21 เมื่อใช้ค่า b^* ร่วมกับค่า L^* และพิจารณาร่วมกันทั้ง b^* a^* L^* จะทำให้มีจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีถูกต้องเพิ่มขึ้น คิดเป็นร้อยละ 6.88 และ 17.5 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจาก ระยะห่างและมุมการถ่ายภาพทั้งหมด พบว่า จำนวนภาพถ่ายที่กำหนดสีได้อย่างถูกต้อง เมื่อพิจารณาจาก ค่า RGB แยกออกตามเฉดสี ดังตาราง ก. และเรียงลำดับร้อยละจากมากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 35

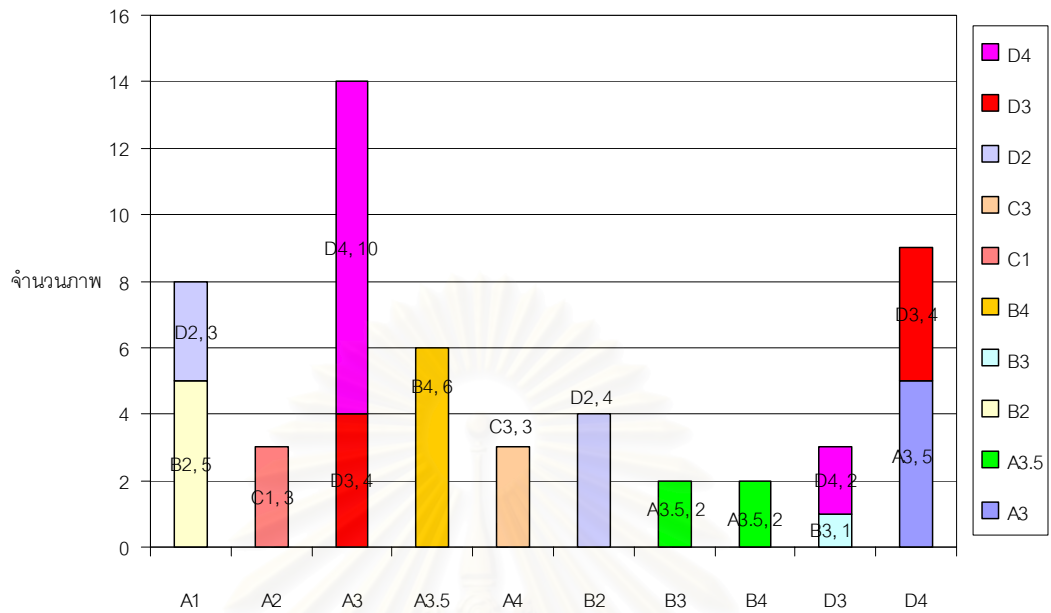


รูปที่ 35 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของภาพที่กำหนดเฉดสี
ได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากค่า RGB แยกออกตามเฉดสี

จากรูปที่ 35 พบว่าการกำหนดเฉดสีโดยใช้โหมด RGB นั้น สามารถกำหนดสี A1, B1 และ C2 ได้ถูกต้องมากที่สุดถึงร้อยละ 100 พบเฉดสีที่กำหนดผิดพลาดมากที่สุดคือสี D4

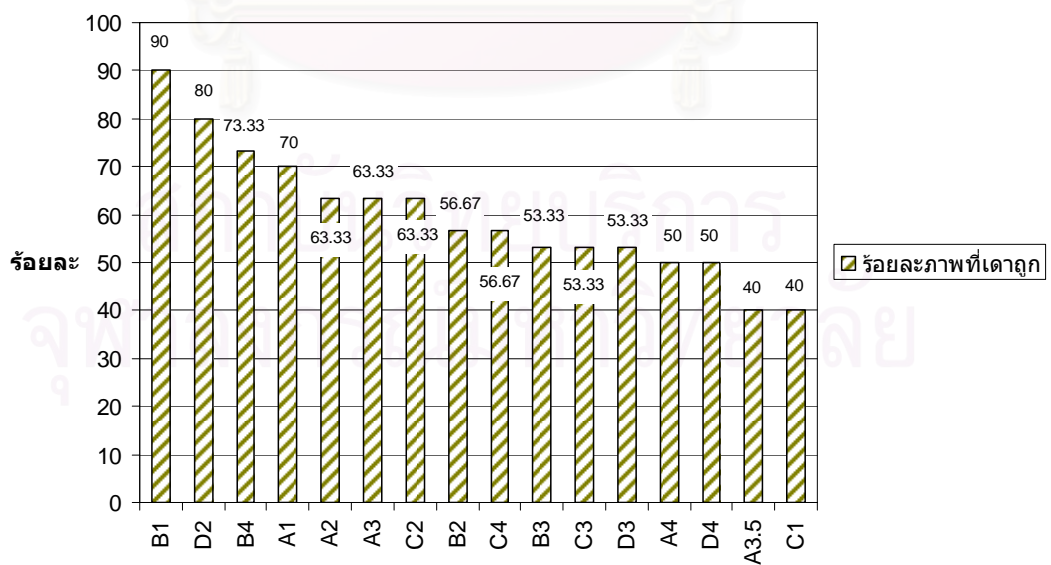
ในทางตรงกันข้าม จำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วแต่มีแนวโน้มที่จะผิดเพี้ยนไปเป็นเฉดสีอื่นเมื่อพิจารณาโดยค่า RGB จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด ได้ผลสรุปดังตาราง ข. ซึ่งแสดงเป็นแผนภูมิได้ ดังรูปที่ 36

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 36 แผนภูมิแท่งแสดงจำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วกลายเป็นเฉดสีอื่น เมื่อพิจารณาโดยค่า RGB จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด

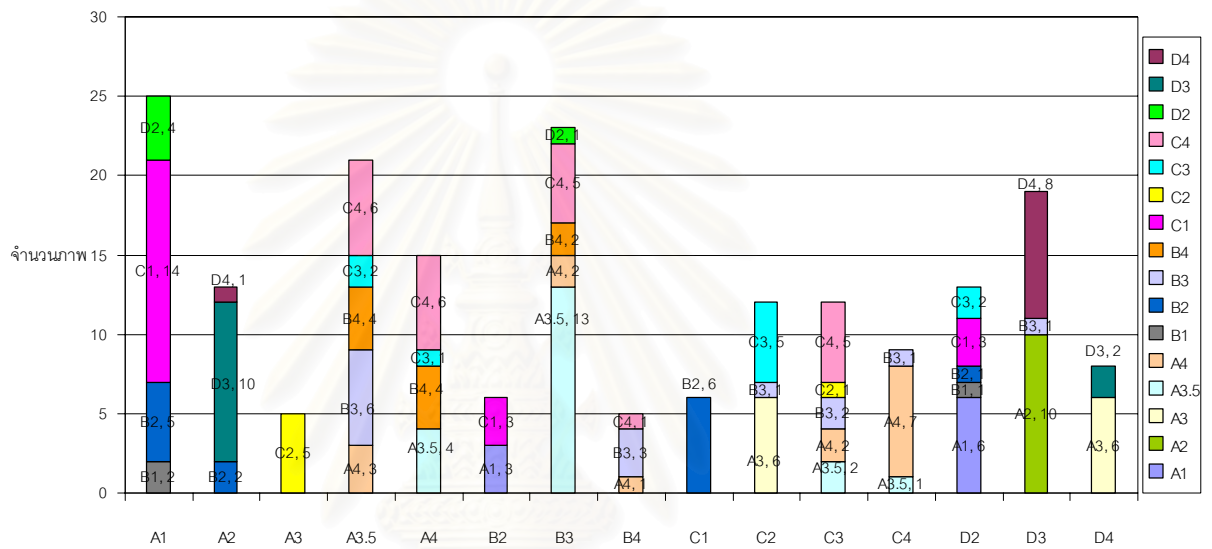
เมื่อพิจารณาจาก ระยะห่าง/มุม การถ่ายภาพทั้งหมด จำนวนภาพถ่ายที่กำหนดสีได้ ถูกต้อง เมื่อพิจารณาจาก ค่า $L^*a^*b^*$ แยกออกตามเฉดสีดังตาราง ค. และเรียงลำดับร้อยละจาก มากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 37 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของภาพที่กำหนดเฉดสี ได้ถูกต้องเมื่อพิจารณาจากค่า $L^*a^*b^*$ แยกออกตามเฉดสี

จากรูปที่ 37 พบว่าการกำหนดเฉดสีโดยใช้โหมด $L^*a^*b^*$ นั้น สามารถกำหนดสี B1 ได้ถูกต้องมากที่สุดถึงร้อยละ 90 พบเฉดสีที่กำหนดผิดพลาดมากที่สุดคือสี A3.5 และ C1

ในทางตรงกันข้าม จำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วแต่มีแนวโน้มที่จะผิดเพี้ยนไปเป็นเฉดสีอื่นเมื่อพิจารณาโดยค่า $L^*a^*b^*$ จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด ได้ผลสรุปดังตาราง ง. ซึ่งแสดงเป็นแผนภูมิได้ ดังรูปที่ 38



รูปที่ 38 แผนภูมิแท่งแสดงจำนวนเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วกลายเป็นเฉดสีอื่นเมื่อพิจารณาโดยค่า $L^*a^*b^*$ จาก ระยะห่าง/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด

บทที่ 5

อภิปรายผล และสรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาพบว่า จำนวนภาพที่กำหนดสีพอร์ชเลนได้ถูกต้องเมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสีระหว่าง RGB และ $L^*a^*b^*$ มีความแตกต่างกัน โดยจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องเมื่ออ่านค่าด้วยโหมด RGB มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 82.5 ถึงร้อยละ 93.75 ซึ่งมากกว่าโหมด $L^*a^*b^*$ ที่มีจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องอยู่ระหว่างร้อยละ 42.5 ถึงร้อยละ 76.25 น่าจะเนื่องมาจากการทำงานของกล้องดิจิทัลที่บันทึกภาพในรูปแบบของ RGB และเมื่อถ่ายโอนข้อมูลภาพเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ก็ยังถูกจัดเก็บในรูปแบบ RGB อีก[43] จึงเป็นไปได้เนื่องจากโหมดสีที่นำมาใช้อ่านค่าเป็นโหมดเดียวกันกับที่ภาพได้ถูกบันทึก ถ่ายโอน และจัดเก็บในคอมพิวเตอร์นั่นเอง

จากผลการกำหนดสีภาพถ่ายพอร์ชเลนนั้น พบว่า เมื่อใช้ค่าในโหมด RGB ความแตกต่างของระยะห่างและมุมระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างไม่มีผลต่อการกำหนดสีพอร์ชเลน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นหมายถึงอาจเลือกใช้สภาวะใดในการถ่ายภาพก็ได้ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าการเลือกเฉดสีนั้นเกี่ยวข้องกับความสะดวก และความพึงพอใจของผู้ป่วยที่มีต่อชิ้นงานฟันปลอม ซึ่งย่อมต้องการเครื่องมือและเทคนิคเพื่อให้กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องมากที่สุด ในแง่ของความสะดวก จำนวนที่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติอาจมีผลในทางคลินิกได้ ดังนั้น หากต้องใช้โหมด RGB ในการกำหนดเฉดสี อาจเลือกใช้ระยะห่างระหว่างกล้องกับชิ้นพอร์ชเลน 10 ซม. ทำมุม 90 องศา เนื่องจากให้จำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องมากกว่าสภาวะอื่น ๆ คือร้อยละ 93.75 และยังคงสะดวกต่อการจัดตำแหน่งของกล้องให้ตั้งฉากกับชิ้นพอร์ชเลนอีกด้วย

สำหรับโหมด $L^*a^*b^*$ ระยะห่างระหว่างกล้องดิจิทัลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการกำหนดเฉดสีอย่างมีนัยสำคัญ เช่นกัน แต่มุมที่ใช้ถ่ายมีผลต่อการกำหนดเฉดสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุมกล้อง 90 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องมากกว่ามุม 45 และ 60 องศา (ทั้งนี้ที่มุม 45 และ 60 องศาจะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน) สำหรับระยะห่าง 20 ซม. ที่มุม 90 องศา และ 45 องศา ให้จำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน และดีกว่ามุม 60 องศา อย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นว่าไม่ว่าระยะห่างของกล้องจะเป็นเท่าใด มุมในการถ่ายภาพที่ 90 องศาจะให้จำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องดีกว่ามุมอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องตามเงื่อนไข $d/0^\circ$ illuminating/viewing geometry ซึ่ง CIE ได้เสนอแนะแนวทางเพื่อการอ่านค่าสีจากวัตถุที่มีลักษณะการสะท้อนแสงบนพื้นผิวแบบกระจัด

กระจาย โดยตำแหน่งมุมมองทำมุม 0 องศากับแนวเส้นตั้งฉาก ในขณะที่ d เป็นมุมที่แสงตกกระทบบนวัตถุ[12]

การที่ความแตกต่างของระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ ไม่มีผลต่อการกำหนดสีพิกเซลเลยไม่ว่าจะใช้ค่าในโหมด RGB หรือ $L^*a^*b^*$ ก็ตาม อาจเป็นไปได้ว่าที่ระยะห่าง 10 ซม. และ 20 ซม. ใกล้กันเกินไปที่จะเห็นผลของความแตกต่าง แต่มีข้อสังเกตว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุมากกว่านี้ จะทำให้ภาพที่ปรากฏบนหน้าจอ LCD เป็นภาพพื้นที่ฉากและสิ่งรอบข้างเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ภาพขึ้นตัวอย่างขนาดเล็ก จึงอาจส่งผลกระทบต่อปริมาณแสงที่สะท้อนเข้าสู่หน้ากล้องคลาดเคลื่อนไปจากค่าการสะท้อนของแสงเดิม ทำให้ต้องมีการชดเชยแสง

การที่ความแตกต่างระหว่างมุมกล้องกับวัตถุ ไม่มีผลต่อการกำหนดสีพิกเซลเมื่อใช้ค่าในโหมด RGB อาจเป็นไปได้ว่าจำนวนภาพที่ใช้กำหนดสีมีปริมาณน้อยเกินไปที่จะทำให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มจำนวนน่าจะทำให้ปริมาณภาพในแต่ละเฉด ตกอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่แยกสีได้และไม่ได้ มีความแตกต่างกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งการที่ค่าเฉลี่ยสีแต่ละภาพที่ถ่ายจากชิ้นงานเดียวกันได้ค่าไม่เหมือนกัน น่าจะมาจากขั้นตอนการนำข้อมูลดิจิทัลไปเก็บไว้ในหน่วยความจำภายในกล้องในลักษณะของไฟล์ภาพ และขั้นตอนการถ่ายโอนข้อมูลภาพจากกล้องดิจิทัลเก็บเป็นไฟล์ภาพภายในคอมพิวเตอร์ ซึ่งเก็บข้อมูลภาพอยู่ในรูปไฟล์ JPEG (joint photographic experts group) ในทุกๆ ครั้งที่มีเปิดและกักรบันทึกภาพนั้น ๆ ระบบจะทำการบีบอัดไฟล์ภาพทุกครั้ง ทำให้คุณภาพของภาพด้อยลง ในความเป็นจริงแล้วการที่จะคงคุณภาพของภาพไว้ให้มากที่สุด ควรเลือกบันทึกในรูปแบบไฟล์ TIFF[43] แต่เนื่องจากขนาดของไฟล์ที่ใหญ่ ทำให้สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ และเพื่อเป็นการประหยัดเนื้อที่ เนื่องจากต้องถ่ายภาพในปริมาณมาก การทดลองนี้จึงบันทึกภาพแบบ JPEG โดยตั้งค่าการบีบอัดน้อยที่สุด

นามสกุลไฟล์ภาพที่นิยมกันมากที่สุดคือนามสกุล JPG หรือ JPEG นอกจากนี้ยังมีนามสกุลอื่น ๆ เช่น TIFF และ RAW ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละประเภท ดังนี้[43]

JPEG เป็นนามสกุลไฟล์สำหรับเก็บภาพมาตรฐานที่ใช้กันแพร่หลาย พบได้ในกล้องดิจิทัลเกือบทุกรุ่น มีข้อดีคือ ขนาดของภาพที่เล็กทำให้เก็บข้อมูลได้ในปริมาณมาก ๆ ไฟล์ภาพนามสกุลนี้อาศัยเทคโนโลยีการบีบอัดข้อมูล ในลักษณะของการตัดทอนข้อมูลที่ไม่สำคัญออก (ข้อมูลที่สลายตามนุษย์ไม่สามารถแยกแยะได้) ซึ่งสามารถเลือกระดับการบีบอัดได้ ทำให้สะดวกในการใช้งานและจัดเก็บ แต่สิ่งที่สูญเสียไปคือ คุณภาพของภาพ ซึ่งถ้ามองโดยรวมแล้วอาจจะสังเกตไม่เห็น แต่ถ้าพิจารณาใกล้ ๆ จะเห็นการสูญเสียรายละเอียดบางส่วนไป และจะเห็นภาพเป็นลายตาราง ๆ สี่เหลี่ยมอยู่ในภาพด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพการบีบอัดไฟล์ตอนบันทึก เนื่องจากทุกครั้งที่มีการบันทึกภาพ จะเกิดการบีบอัดข้อมูลตามมา

TIFF (tagged image file format) เป็นนามสกุลไฟล์ที่ใช้กันแพร่หลายในระบบสิ่งพิมพ์ เนื่องจากแทบไม่มีการบีบอัดข้อมูลเลย ทำให้ได้คุณภาพของภาพดีกว่าไฟล์แบบ JPEG แต่มีข้อเสียคือ ขนาดไฟล์ที่ใหญ่มาก ภาพ ๆ เดียวกันอาจมีขนาดไฟล์ใหญ่กว่าไฟล์แบบ JPEG ถึง 5-10 เท่า จึงเปลืองเนื้อที่ในการจัดเก็บ

RAW ไฟล์ภาพแบบนี้จะนำเอาข้อมูลที่ออกมาจากตัวเซ็นเซอร์โดยตรงมาจัดเก็บไว้โดยไม่มีการปรุงแต่งอะไร เพื่อให้แน่ใจว่าไม่ได้สูญเสียคุณภาพของภาพไปกับกระบวนการอื่น ๆ ดังนั้นรูปแบบไฟล์ RAW นี้จะให้คุณภาพของภาพที่ดีที่สุด แต่ขนาดไฟล์ภาพก็ใหญ่ที่สุดเช่นกัน ที่สำคัญคือไฟล์นามสกุล RAW จะมีเฉพาะกับกล้องบางรุ่นเท่านั้น ทำให้อาจมีปัญหากการเปิดอ่านไฟล์ในระบบคอมพิวเตอร์อื่น ๆ

เมื่อพิจารณาผลการศึกษา จากค่าในโหมด RGB พบว่า มีการคร่อมกันของช่วงค่าเฉลี่ย B ที่ตำแหน่ง P_5 ถึง P_{95} ที่น้อย ประกอบกับ ผลการกำหนดสีพอร์ชเลนโดยพิจารณาจากค่า RGB นั้น ค่า B เป็นค่าที่ช่วยให้มีการกำหนดเฉดสีถูกต้องเป็นปริมาณมาก สอดคล้องตามการศึกษาของ Bentley และคณะ[13] ที่ได้นำค่า $L^*a^*b^*$ และ RGB มาใช้เพื่อการอ่านค่าสีภาพถ่าย Vita shades ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่า B มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดในแต่ละแถบบนแผงเทียบสีฟันปลอม โดยมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงนี้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับความสว่างของแผงเทียบสีฟันปลอม จากมากที่สุดไปน้อยสุด นอกจากนี้ Bentley และคณะ[13] ยังกล่าวอีกว่า การที่แต่ละแถบบนแผงเทียบสีฟันปลอมมีการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของค่า B ที่เด่นชัดกว่าค่าอื่น เนื่องจากสีน้ำเงินเป็นสีที่ตรงข้ามกับสีเหลืองซึ่งเป็นสีที่เด่นของฟัน [49] จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ค่า $L^*a^*b^*$ ไม่เหมาะนำมาใช้อ่านค่าสี ประกอบกับจำนวนภาพที่กำหนดโดยใช้สีในโหมดนี้มีก็ปริมาณที่น้อยกว่าโหมด RGB อย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์ เมื่อแยกจำนวนภาพถ่ายที่กำหนดสีได้ถูกต้องออกตามเฉด พบว่า B1 เป็นเฉดที่กำหนดสีได้ถูกต้องจำนวนมากที่สุดทั้งในโหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ ซึ่งในแผงเทียบสีฟัน Vita นั้น เฉด A จะมีสีส้ม-น้ำตาล, เฉด B : สีเหลือง, เฉด C : สีเทา-น้ำตาล, เฉด D : สีแดง แต่จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีในแต่ละเฉดที่แสดงในผลการศึกษาทั้งในโหมด RGB และ $L^*a^*b^*$ เหมือนจะไม่อิงตามหลักการผสมสีดังกล่าว จึงนำเสนอไว้เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดสีขั้นต่อไป

สำหรับผลของเฉดสีที่กำหนดไว้แล้วมีแนวโน้มที่จะผิดเพี้ยนไปเป็นสีอื่นนั้น นำมาใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสีเช่นกัน แต่มีข้อสังเกตว่า เฉดที่มีความผิดเพี้ยนไปนั้น มักเป็นเฉดที่มีช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย G และ B ในโหมด RGB และช่วง P_5 ถึง P_{95} ของค่าเฉลี่ย L^* และ b^* ในโหมด $L^*a^*b^*$ อยู่ใกล้ ๆ กันนั่นเอง

จากผลการปรับมาตรฐานโปรแกรมซอฟต์แวร์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Adobe Photoshop, Corel Draw และ Paint Shop Pro โดยการอ่านค่า RGB และ $L^*a^*b^*$ ในพื้นที่วงกลมสีแดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ฟ้ำ และสี D4 ดังกล่าว พบว่าโปรแกรมทั้งสามอ่านค่า RGB ได้เท่ากัน ทั้งนี้โปรแกรม Adobe Photoshop และ Corel Draw อ่านค่า $L^*a^*b^*$ ได้ใกล้เคียงกัน (จะต่างกันประมาณ 1-2 ในค่า a และ b* ในวงสีแดง เขียว เหลือง และน้ำเงิน) ขณะที่โปรแกรม Paint Shop Pro ไม่สามารถอ่านค่า $L^*a^*b^*$ ได้ น่าจะเนื่องมาจากโปรแกรมแต่ละชนิดที่ผลิตขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์การใช้งานที่ต่างกันไป โดย

โปรแกรม Corel Draw[50] เป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อการทำงานแบบเวกเตอร์ (vector) เป็นหลัก ใช้ในการจัดการและสร้างไฟล์งานกราฟิกโดยคำนวณประมวลผลและจัดรูปแบบของเวกเตอร์ทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถสร้างวัตถุในรูปทรงต่าง ๆ หรือสร้างตัวอักษรในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ภาพแบบเวกเตอร์นี้จะเป็นภาพลายเส้นที่วาดด้วยโปรแกรมในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยภาพลักษณะนี้จะไม่แตกตัวเมื่อทำการซูมเพื่อขยายภาพในระยะใกล้ เหมาะกับงานที่วาดรูปแบบต่าง ๆ สามารถทำงานกับไฟล์บิตแมพเพื่อตกแต่งภาพได้โดยการอิมพอร์ตไฟล์รูปภาพ (Import File) เพื่อเปิดรูป

โปรแกรม Adobe Photoshop[51] เป็นโปรแกรมตกแต่งภาพที่ออกแบบมาเพื่อการทำงานกับภาพแบบบิตแมพ (bitmap) เป็นหลัก ซึ่งเป็นภาพที่นิยมใช้กันมากในภาพถ่าย หรือภาพวาด เนื่องจากสามารถไล่โทนสีและแสงเงาได้เหมือนจริงที่สุด ลักษณะของภาพบิตแมพจึงเป็นภาพที่ประกอบจากจุดสีขนาดเล็กจำนวนมากที่ต่อเรียงไล่สีกันจนเป็นภาพ ๆ หนึ่ง ภาพแบบบิตแมพส่วนมากจะเป็นภาพที่ถ่ายมาจากของจริง ทำให้เวลาซูมขยายเพื่อดูส่วนที่เจาะจงในภาพนั้น ๆ จะแตกออกจนเห็นเป็นเม็ดสีเหลี่ยมจัตุรัสชัดเจน ทำให้ภาพที่ได้เบลอ ไม่มีความคมชัด

โปรแกรม Paint Shop Pro[52] มีฟังก์ชันหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างจากโปรแกรมตกแต่งภาพโดยทั่วไป คือสามารถรองรับการทำงานได้ทั้งในรูปแบบบิตแมพและเวกเตอร์ ทำให้สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบในโปรแกรมเพียงโปรแกรมเดียว

ด้วยการทำงานของโปรแกรม Adobe Photoshop ที่ใช้งานไม่ยุ่งยาก คนทั่วไปเข้าใจง่าย [51] ผู้วิจัยจึงแนะนำให้ใช้เป็นโปรแกรมเพื่อการอ่านสี โดยมีความคล่องกับการศึกษานี้ นอกจากนั้น โปรแกรมดังกล่าวยังมีคุณสมบัติในการอ่านค่าสี ณ จุดโคออดิเนตเดียวกันได้เท่าเดิมทุกครั้ง (ไม่ว่าจะขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงก็ตาม)

ในการศึกษาเรื่องสีของพอร์ซเลน พบว่า มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลให้สีของพอร์ซเลนมีความแตกต่างจากสีที่มีอยู่ในแผงเทียบสี[53] ได้แก่ ชนิดของพอร์ซเลน (porcelain type), โลหะที่อยู่ข้างใต้ (underlying metal), ยี่ห้อการผลิต (bath, manufacturer) และความหนา (thickness)

นอกจากนั้นสารที่ใช้แต่งสีภายนอก (extrinsic colorants) จะมีการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างก่อนและหลังเผาได้ ในทางตรงกันข้าม พบว่าเทคนิคในการควบแน่น (condensation), การเผาซ้ำ (repeated firings), อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และจำนวนครั้งในการเผา (firing cycles) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลน

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สร้างชิ้นงานพอร์ซเลนเนื้อฟันสีเดียว ขนาดความหนา 1.0 มม. (0.039 นิ้ว) ซึ่งเป็นความหนาในระดับพอเพียงที่จะได้เฉดสีตามที่ต้องการ[53] และเป็นความหนาในอุดมคติของส่วนกลางของครอบฟัน[1] และจากการศึกษางานวิจัยจำนวนมาก[54] พบว่า ความผิดพลาดของสีพอร์ซเลนเนื้อฟันเกิดจากโลหะที่อยู่ข้างใต้ (underlying metal) Stauridakis และคณะ[55] พบว่าความสว่างของพอร์ซเลนชั้นที่บดแสงลดลง เมื่อใช้โลหะจำพวกไฮแพลเลเดียม (high-palladium) Crispin และคณะ[56] พบว่า ไม่มีความแตกต่างของสีพอร์ซเลนชั้นที่บดแสงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อใช้กับโลหะพวกไฮโกลด์ (high-gold), โกลด์แพลเลเดียม (gold-palladium), นิกเกิลโครเมียม (nickel-chromium), แพลเลเดียมซิลเวอร์ (palladium-silver) และแพลเลเดียมคอปเปอร์แกดเลียมอัลลอยด์ (palladium-copper-gallium alloys) แม้ว่าในทางคลินิกจะใช้โลหะเป็นโครงสร้าง แต่ชนิดของโลหะที่เลือกใช้อาจมีอิทธิพลต่อการผิดเพี้ยนของสีของชิ้นงานพอร์ซเลนได้ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อกำจัดผลกระทบของโลหะที่อยู่ข้างใต้ ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของสีพอร์ซเลนเนื้อฟัน มาใช้ชิ้นพอร์ซเลนที่ไม่มีโลหะเป็นโครงสร้าง

สีของ shade tab มีความแตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นส่วนคอฟัน กลางฟัน หรือปลายฟัน ความหลากหลายของสีที่ปรากฏบน shade tab ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์สีพอร์ซเลนเบื้องต้นได้ ดังนั้น การทำชิ้นงานใหม่ให้มีการใช้ลักษณะของพื้นผิวและสีเดียวกันจะช่วยลดปัจจัยที่รบกวนด้านสีได้มากขึ้น

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ Vita-Lite[®] [57] ซึ่งมีคุณสมบัติ ได้แก่ การมีองค์ประกอบสเปกตรัมของสีที่ครบถ้วน ความเข้มแสงที่พอเพียง ปลอดภัยต่อสายตา ได้มาตรฐาน ให้ค่าแสงที่ต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นเวลากลางวันหรือกลางคืน ต่างฤดู หรือต่างสถานที่ นอกจากนั้น Vita-Lite[®] ยังให้ค่าอุณหภูมิสีที่เป็นมาตรฐานที่ 5,500 เคลวิน และยังให้ค่า CRI ในอุดมคติที่ 91 [26] ความเข้มแสง 1,360 ลักซ์ โดยประมาณ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มแสงที่แนะนำสำหรับการเทียบสีฟันในทางทันตกรรมที่ 1,200-1,500 ลักซ์[39]

ทั้งนี้ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงมีความสำคัญอย่างมากต่อการรับรู้และแยกความแตกต่างของสี Saleski[7] ได้อธิบายถึงคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงในอุดมคติที่เหมาะสมในการเทียบสีคือ สภาวะของแสงที่ใช้ควรมีองค์ประกอบของสีที่สมบูรณ์ มีความเข้มแสงพอเพียง ให้ความสบายแก่สายตา และมีมาตรฐานทางด้านคุณภาพและปริมาณ เพื่อประโยชน์ในการสื่อสารข้อมูล ซึ่ง

คุณภาพของแสงนั้นจะพิจารณาจากอุณหภูมิสี และการกระจายของแถบพลังงาน พบว่าอุณหภูมิสีของแสงที่ 5500 เคลวิน จะทำให้อ่านค่าสีถูกต้องแม่นยำที่สุด[8] นอกจากนี้ Preston และคณะ [26] กล่าวว่า ดัชนีเทียบสีเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของแสง กล่าวคือ ค่า CRI มากกว่าหรือเท่ากับ 90 จะให้ระดับค่าเทียบสีที่เหมาะสม

ในการศึกษาี้ ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์ไว้ 2 ข้าง ข้างละ 2 หลอด (bidirectionally fixed) ทำมุม 45 องศากับฉาก โดยมีระยะห่างประมาณ 43 ซม. สอดคล้องตามเงื่อนไข $d/0^\circ$ illuminating/viewing geometry ซึ่ง CIE ได้เสนอแนะแนวทางเพื่อการอ่านค่าสีดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น[12]

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำกระดาษสีเทากลางซึ่งจัดเป็นฉากหลังในอุดมคติ (ideal background)[46] มาใช้สำหรับการเทียบสี เนื่องจากกระดาษสีเทากลางจะให้ค่าการสะท้อนแสงที่เครื่องวัดแสงภายในตัวกล้องจะสะท้อนกลับออกมา 18 ส่วน ใน 100 ส่วน (สามารถอ่านค่าเฉลี่ยของสีได้ร้อยละ 18) ทำให้วัตถุได้สีที่ค่อนข้างแม่นยำ การวางวัตถุลงบนฉากแล้วถ่ายภาพเป็นวิธีที่ง่ายตาย สอดคล้อง แต่ผลที่ตามมาคือ อาจมีเงาของวัตถุซึ่งเป็นสิ่งไม่พึงปรารถนาเกิดขึ้น[27] นอกจากนี้วัตถุบางอย่างอาจสะท้อนเอาสีของฉากที่อยู่ด้านหลังออกมา ทำให้สีของวัตถุเกิดความผิดเพี้ยนได้ ดังนั้น ผู้วิจัยพิจารณาแล้วเห็นควรวางวัตถุบนกระจกใสที่อยู่สูงขึ้นมาจากฉาก เพื่อลดปัญหาดังกล่าว[58]

การที่ค่าสีในแต่ละตำแหน่งบนภาพเดียวกันไม่เท่ากัน เนื่องจากการทำงานของโปรแกรม Adobe Photoshop จะทำกับภาพแบบบิตแมพ (Bitmap) เป็นหลัก และภาพที่แสดงผลทางจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์นั้นแสดงความละเอียดในลักษณะของจุดสีขนาดเล็กจำนวนมาก ต่อเรียงไล่โทนสีและแสงเงาจนได้เป็นภาพรวมที่สมบูรณ์ขนาดใหญ่ในที่สุด[50] เนื่องจากตารางเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก ๆ จึงมองไม่เห็นในลักษณะของตาราง ต่อเมื่อขยายขนาดภาพให้ใหญ่ขึ้นจะสามารถมองเห็นเป็นตารางสีเหลี่ยมได้ ดังนั้นวัตถุที่เราเห็นเป็นสีเดียวเมื่อมองด้วยตาเปล่า แต่ในความเป็นจริงแล้ว ประกอบไปด้วยจุดสีขนาดเล็กจำนวนมากมาย ประกอบกับการอ่านค่าสีโดยใช้เครื่องมือ color sample ของโปรแกรม Adobe Photoshop นั้น เครื่องมือจะทำงานโดยการอ่านค่าสีจากพิกเซลตรงที่เมาส์เลือกเท่านั้นหรือได้จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากพื้นที่สี 5x5 พิกเซล ขึ้นกับการตั้งค่าการทำงาน

สรุปผลการวิจัย

1. จำนวนความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน เมื่ออ่านค่าด้วยโหมดสี RGB มากกว่าโหมด $L^*a^*b^*$ อย่างมีนัยสำคัญที่ $p < 0.05$ นอกจากนี้ ยังพบว่า การกำหนดสีโดยอิงจากค่า B เป็นแนวทางเริ่มต้น จะทำให้กำหนดเฉดสีถูกต้องเป็นจำนวนมาก

2. ก. เมื่อใช้โหมด RGB ความแตกต่างของระยะห่างและมุมระหว่างกล่องดิจิทัลอลกับชิ้นตัวอย่างไม่มีผลต่อความถูกต้องของการกำหนดสีพอร์ชเลน อย่างมีนัยสำคัญ

ข. เมื่อใช้โหมด $L^*a^*b^*$ ระยะห่างระหว่างกล่องดิจิทัลอลกับชิ้นตัวอย่างที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อการกำหนดเฉดสี อย่างมีนัยสำคัญ เช่นกัน แต่มุมที่ใช้ถ่ายมีผลต่อความถูกต้องของการกำหนดเฉดสีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือ

- ที่ระยะห่าง 10 ซม. มุมกล่อง 90 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องมากกว่ามุม 45 และ 60 องศา (ทั้งนี้ที่มุม 45 และ 60 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน)

- ที่ระยะห่าง 20 ซม. มุมกล่อง 90 องศา และ 45 องศา จะมีจำนวนภาพที่กำหนดเฉดสีได้ถูกต้องไม่แตกต่างกัน และดีกว่ามุม 60 องศา อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

รายการอ้างอิง

1. Seghi, RR.; Johnston, W.M; and O'Brien, W.J. 1986. Spectrophotometric Analysis of Color Differences Between Porcelain System. J.Prosthet.Dent. 56: 35-40.
2. Rosentiel,SF.; Land,MF.; and Fujimoto junhei. 2001. Contemporary fixed prosthodontics.3rd ed., USA:Mosby
3. Okubo, SR.; Kanawti, AM; Richards, MW.; and Childress, S. 1998. Evaluation of Visual and Instrument Shade Matching. J Prosthet Dent. 80: 642-648.
4. Call, E.; Sonugelen, M.; Guneri, P.; Kesercioglu, A.; and Kose, T. 2004. Application of a Digital Technique in Evaluating the Reliability of Shade Guide. J Oral Rehabil. 31: 483-491.
5. Seghi, RR.; Hewlett, E.R.; and Kim J. 1989. Visual and Instrumental Colorimeter Assessments of Small Color Differences on Translucent Dental Porcelain. J Dent Res. 68(12): 1760-1764
6. Russell, M.D.; Gulfraz, M.; and Moss, B.W. 2000. In Vivo Measurement of Color Changes in Natural Teeth. J Oral Rehabil. 27: 786-792
7. Saleski, CG. 1972. Color ,Light and Shade Matching. J Prosthet Dent. 27(3): 263-268.
8. Korson, D. 1990. The art of matching teeth to people. Natural Ceramics, pp.19-23. London:Quintessence
9. Barrett, AA.; Grimaudo, NJ.; Anusavice, KJ.; and Yang, M.C.K. 2002. Influence of Tab and Disk Design on Shade Matching of Dental Porcelain. J Prosthet Dent. 88: 591-597.
10. Van der Burget, T.P.; Ten Bosch, J.J.; Borsboon, P.C.F.; and Kortsmid, W.J. 1990. A Comparison of New and Conventional Methods for Quantification of Tooth Color. J.Prosthet Dent. 63: 155-62.
11. Haywood, VB.; Leonard, RH.; Nelson, CF.; and Brunson,WD. 1994. Effectiveness ,side effects and long – term status of nightguard vital bleaching. JADA. 125: 1219-1226.

12. Seghi, RR. 1990. Effects of instrument-measuring geometry on colorimetric assessments of dental porcelains. J Dent Res. 69(5) :1180-1183.
13. Bentley, C.; Leonard, RH.; Nelson,CF.; and Bentley, SA. 1999. Quantitation of Vital Bleaching by Computer Analysis of Photographic Images. JADA; 130: 809-816.
14. Dozic, A.; Kleveraam, CJ.; Aartman, I.H.A.; and Feilzer, AJ. 2004. Relation in Color of Three Regions of Vital Human Incisors. Dent Mater. 20: 832-838.
15. Culpepper, WD. 1970 A comparative study of shade-matching procedures. J Prosthet Dent. 24(2): 166-173.
16. Fondriest,JF. Fall 2003. Improving Photographic Strategies in Shade Communication. Journal of Cosmetic Dentistry. 19(3): 70-74
17. Dancy, WM.K.; Yaman, P.; Dennison, J.B.; O'Brien, WJ.; and Razzoog, ME. 2003. Color Measurements as Quality Criteria for Clinical Shade Matching of Porcelain Crowns. J Esthet Restor Dent. 15: 114-122.
18. Villar, A.;and others. 2003. Clinical Evaluation of a New Resilient Denture Liner . Part1 : Compliance and Color Evaluation. J Prothodont. 12: 82-89.
19. Sorensen, JA.; Torres, TJ. 1987. Improved color matching of metal-ceramic restorations.Part I:A systematic method for shade determination. J Prosthet Dent 58(2): 133-139.
20. Brewer, JD.; Wee, A.; and Seghi, R. 2004. Advances in Color Matching. Dent Clin N Am. 48: 341-358.
21. Burkinshaw, S.M. 2004. Color in Relation to Dentistry. Fundamentals of Colour Science. British Dent J. 196(1): 33-41.
22. เพ็ญศรี ทองนพคุณ, ธนญา ตรึงตราจิตกุล, และวินา คุณาวีวัฒน์. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ทฤษฎีการวัดสี ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม.
23. Burden, JW. 1980. Graphic Reproduction Photography. 1st ed., 73-93. London:Focal Press.
24. ประสิทธิ์ จันเสรีกร. 2539. เทคนิคการถ่ายภาพฉบับสมบูรณ์. Creative Photography. พิมพ์ครั้งที่ 1. อิมเมจโฟกัส.

25. Dagg, H.; O'Connell, B.; Claffey, N.; Byrne, and O.Gorman, C. 2004. The Influence of Some Different Factor on the Accuracy of Shade Selection. J Oral Rehabil. 31: 900-904.
26. Preston, JD. ;Ward, L.C.; and Bobrick, M. 1978. Light and Lighting in the Dental Office. Dent Clin North Am. 22: 435-445.
27. Bengel Wolfgang. 2002. Mastering dental photography. Belin:Quintessenz Verlags-GmbH.
28. ปิยานันท์ ประสารราชกิจ. 2541. ทฤษฎีสี และการออกแบบตกแต่งภายใน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. โครงการตำราคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาสถาปัตยกรรมภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
29. ทวีศักดิ์ กิจวิวัฒนาชัย. 2544. พื้นฐานการถ่ายภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. เพชรเกษมการพิมพ์.
30. Mclean, J.W. 1979. Aesthetics of dental porcelain. The Science and art of dental ceramic.vol 1: The nature of dental ceramics and their clinical use, pp.117-134 Chicago:Quintessence.
31. Obregon, A.; Goodkind, R.J.; Schwabacher, WB. 1981. Effects of Opaque and Porcelain Surface Texture on the Color of Ceramometal Restorations. J Prosthet Dent.46(3): 330-339.
32. Muia, P.J. 1982. Light and its role in dental ceramics. The Four Dimensional Tooth Color System, pp.91-104. Chicago:Quintessence.
33. Clarke,JJK. 1990. Dental Ceramics. Proceeding of the first international symposium on Ceramics. Ed.Mclean.JW., 463. Chicago:Quintessence.
34. Dozic, A.; Kleverlaan, C.J.; Meegdes, M.; Zel, J.V.D.; and Feilzer, A.J. 2003 The Influence of Porcelain Layer Thickness on the Final Shade of Ceramic Restorations. J Prosthet Dent. 90: 563-570.
35. Kuehni RG ; and Marcus RT. 1979. An experiment in visual scaling of small color differences. Color Res Appl. 4:83-91.
36. O'Brien, WJ.; Fan, PL.; and Groh, CL. 1994. Color Difference Coefficients of Body Opaque Double Layers. Int J Prosthodont. 7: 56-61.

37. Johnston, WM.; and Kao, EC. 1989. Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. J Dent Res 68(5): 819-822.
38. Barna, GJ.; Taylor, JW.; King, GE.; and Pelleu,GB. 1981. The Influence of Selected Light Intensities on Color Perception within the Color Range of Natural Teeth. J Prosthet Dent. 46(4): 450-453.
39. Paravina, RD.; Powers, JM.; and Fay, RM. 2002. Color Comparison of Two Shade Guides. Int. J Prosthodont. 15: 73-78.
40. Bergen, SF.; McCasland, J. 1977. Dental Operatory Lighting and Tooth Color Discrimination. JADA. 97: 130-134.
41. พิเศษฐ เพ็ชรเจริญ. 2545. การถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล. วารสารวิทยบริการ 13(3): 37-48.
42. Andrews,P. 2000. The Digital Photography Manual :an introduction to the equipment and creative techniques of digital photography. London:Carlton Books
43. วีรนิจ ทรรทรานนท์, จุฑามาศ จิระสังข์. 2547. Best Guide of Digital Camera เทคนิคการเลือกซื้อและถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:ซัคเซส มีเดีย.
44. Foveon, Inc Santa Clara Headquarters. 2004. X3 technology : Direct image sensors[Online]. Santa Clara, CA:. Available from: <http://www.foveon.com> [2005,Jan5]
45. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2005. บทความเกี่ยวกับกล้องดิจิตอล[Online]. Available from: <http://www.sc.chula.ac.th>[2005,Feb22]
46. สุรเดช วงศ์สินพลัง. 2545. เทคนิคการวัดแสง. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ Photo&Life.
47. Phelan, S. 2002. Use of photographs for comminating with the laboratory in indirect posterior restorations. J Can Dent Assoc. 68(4): 239-242.
48. Schwabacher, WB.; and Goodkind, RJ. 1990. Three dimensional colour coordinates of natural teeth compared with three shade guides. J Prosthet Dent. 64(4): 425-431:

49. วิทยา สงวนวรรณ. 2547. สร้างกราฟฟิกง่าย ๆ สไตล์ CorelDraw12. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์เอส.พี.ซี.พรีนติ้ง.
50. วงศ์ประชา จันทร์สมวงศ์ และ มานิตา เจริญปรุ. 2545. คัมภีร์ Photoshop 7&Image Ready7, พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โปรวิชั่น.
51. ภัททิรา เหลืองวิลาส. 2545. แต่งแต้มงานศิลป์ด้วย Paint Shop Pro. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น
52. Joiner, A. 2004. Tooth colour :a review of the literature. Journal of Dentistry. 32:3-12.
53. Douglas, RD. 1999. Predicting porcelain thickness required for dental shade matches. J Prosthet Dent. 82: 143-149.
54. Wee, AG.; Monaghan, P.; and Johnston, WM. 2002. Variation in color between intended matched shade and fabricated shade of dental porcelain. J Prosthet Dent. 87: 657-666.
55. Stavridakis, MM. ; Papazoglou, E.; Seghi, RR.;Johnston, WM.;Brantley, WA. 2000. Effect of different high-palladium metal-ceramic alloys on the color of opaque porcelain. J Prosthodont. 9: 71-76.
56. Crispin, BJ.;Hewlett, E.;Seghi, R. 1991. Relative color stability of ceramic stains subjected to glazing temperatures. J Prosthet Dent. 66: 20-23.
57. Duro-Test® Lighting Headquarters. 2006. Vita-Lite[Online]. Available from: www.duro-test.com[2006,Jan2]
58. Vargas, MA. 2002. Photographing objects : Backgrounds and techniques. J Prosthodont. 11(4): 301-301.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก แสดงปริมาณภาพที่คาดเดาสีได้ถูกต้อง เมื่อพิจารณาจากค่า R G B จากระยะ/มุมถ่ายภาพทั้งหมด

shade	จำนวนภาพทั้งหมด	จำนวนภาพที่คาดเดาถูก	ร้อยละ
A1	30	30	100
A2	30	28	93.33
A3	30	25	83.33
A3.5	30	25	83.33
A4	30	29	96.67
B1	30	30	100
B2	30	24	80
B3	30	29	96.67
B4	30	24	80
C1	30	27	90
C2	30	30	100
C3	30	27	90
C4	30	29	96.67
D2	30	26	86.67
D3	30	21	70
D4	30	19	63.33

ตาราง ข แสดงจำนวนเฉดสีที่คาดเดาไว้แล้วกลายเป็นเฉดอื่น เมื่อพิจารณาโดยค่า R G B จากระยะ/มุมถ่ายภาพทั้งหมด

เฉดที่คาดเดา	จำนวนภาพทั้งหมด	เดาถูก (N=30)	เดาไม่ได้	กลายเป็นเฉดอื่น	ได้แก่
A1	38	30	0	8	B2 (5) D2 (3)
A2	31	28	0	3	C1
A3	42	25	3	14	D4 (10) D3 (4)
A3.5	33	25	2	6	B4

เฉดที่คาดเดา	จำนวนภาพทั้งหมด	เดาถูก (N=30)	เดาไม่ได้	กลายเป็นเฉดอื่น	ได้แก่
A4	33	29	1	3	C3
B1	30	30	0	-	-
B2	30	24	2	4	D2
B3	31	29	0	2	A3.5
B4	26	24	0	2	A3.5
C1	30	27	3	-	-
C2	30	30	0	-	-
C3	29	27	2	-	-
C4	30	29	1	-	-
D2	31	26	4	1	B2
D3	30	21	6	3	D4 (2) B3 (1)
D4	32	19	4	9	D3 (4) A3 (5)

ตาราง ค แสดงปริมาณภาพที่คาดเดาสีได้ถูกต้อง เมื่อพิจารณาจากค่า $L^*a^*b^*$ จากระยะ/มุมถ่ายภาพทั้งหมด

shade	จำนวนภาพทั้งหมด	จำนวนภาพที่คาดเดาถูก	ร้อยละ
A1	30	21	70
A2	30	19	63.33
A3	30	19	63.33
A3.5	30	12	40
A4	30	15	50
B1	30	27	90
B2	30	17	56.67
B3	30	16	53.33
B4	30	22	73.33
C1	30	12	40
C2	30	19	63.33
C3	30	16	53.33

shade	จำนวนภาพทั้งหมด	จำนวนภาพที่ คาดเดาถูก	ร้อยละ
C4	30	17	56.67
D2	30	24	80
D3	30	16	53.33
D4	30	15	50

ตาราง แสดงจำนวนเฉดสีที่คาดเดาไว้แล้วกลายเป็นเฉดอื่น เมื่อพิจารณาโดยค่า $L^*a^*b^*$ จาก
ระยะ/มุม ถ่ายภาพทั้งหมด

เฉดที่คาดเดา	จำนวนภาพ ทั้งหมด	เดาถูก (N=30)	เดาไม่ได้	กลายเป็น เฉดอื่น	ได้แก่
A1	51	21	5	25	C1 (14) B2 (5) D2 (4) B1 (2)
A2	37	19	5	13	D3 (10) D4 (1) B2 (2)
A3	24	19	0	5	C2
A3.5	36	12	3	21	C4 (6) B3 (6) B4 (4) A4 (3) C3 (2)
A4	34	15	4	15	C4 (6) A3.5 (4) B4 (4) C3 (1)
B1	27	27	0	-	-
B2	32	17	9	6	A1 (3) C1 (3)

เจดที่คาดเดา	จำนวนภาพทั้งหมด	เดาถูก (N=30)	เดาไม่ได้	กลายเป็นเจดอื่น	ได้แก่
B3	42	16	9	23	A3.5 (13) C4 (5) B4 (2) A4 (2) D2 (1)
B4	29	22	2	5	B3 (3) A4 (1) C4 (1)
C1	22	12	4	6	B2
C2	34	19	3	12	A3 (6) C3 (5) B3 (1)
C3	31	16	3	12	C4 (5) A3.5 (2) B3 (2) A4 (2) C2 (1)
C4	29	17	3	9	A3.5 (1) A4 (7) B3 (1)
D2	38	24	1	13	A1 (6) B1 (1) B2 (1) C1 (3) C3 (2)
D3	44	16	9	19	A2 (10) B3 (1) D4 (8)
D4	23	15	0	8	A3 (6) D3 (2)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนุชนางค์ อนุชปรีดา เกิดวันที่ 8 ธันวาคม 2521 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) จากคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2543 เข้ารับราชการตำแหน่งทันตแพทย์ 4 ประจำโรงพยาบาลเชียงใหม่ อำเภอเชียงใหม่ จังหวัดมหาสารคาม ในปี พ.ศ. 2544 ก่อนย้ายมาประจำที่โรงพยาบาลโกสุมพิสัย อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม ในปี พ.ศ. 2545 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย