

การออกแบบมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



นายฉัตรชัย ชารีงาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# DESIGN OF MULTI-ANGLE SPECTROPHOTOMETER




Mr. Chatchai Charingam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2007  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การออกแบบมัลติแองเกิ้ลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์  
โดย                              นายฉัตรชัย ชารีงาม  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารา ชลปราณี


---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธารา ชลปราณี)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉัตรชัย ชาริงาม : การออกแบบมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (DESIGN OF MULTI-ANGLE SPECTROPHOTOMETER) อ.ที่ปรึกษา: ผศ. ดร.ธรา ชลปราชญ์ , 107 หน้า.

สีและสภาพปรากฏเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจซื้อสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ สีที่สวยงามน่าหลงใหลจะทำให้ถูกค่าสนใจในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากสีได้ถูกพัฒนาให้มีคุณภาพสูงและสวยงามยิ่งขึ้น ในปัจจุบันมีการใช้เม็ดสีที่ส่งผลต่อการมองเห็นในสีหลายชนิด ซึ่งได้แก่ เม็ดสีโลหะและเม็ดสีแบบแทรกสอด สีที่ผสมเม็ดสีทั้งสองประเภทนี้เมื่อเปลี่ยนมุมมอง สีที่สังเกตเห็นจะเปลี่ยนไป โดยกรณีของเม็ดสีโลหะและเม็ดสีทั่วไป เมื่อเปลี่ยนมุมมองความสว่างจะเปลี่ยน ส่วนเม็ดสีแบบแทรกสอด เมื่อเปลี่ยนมุมฉายแสงหรือมุมมองเจดสีและค่ารังสีจะเปลี่ยน ในปัจจุบันสีรถยนต์ส่วนใหญ่จะเป็นสีลูซิไต (Lucite) ซึ่งจะเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนมุมมอง ดังนั้นเพื่อที่จะจำแนกสีที่กล่าวมาแล้ว จึงต้องหาเครื่องมือที่สามารถวัดสีได้หลายมุม

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาระบบการวัดสี และแปรผลที่วัดได้เป็นค่ามาตรฐานของ CIE เพื่อนำไปออกแบบและสร้างมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องวัดสีที่สามารถวัดสีได้หลายมุมมอง ในกรณีของมุมแทรกสอดสีตัวอย่างจะถูกวัดที่มุมอะซิมุทควอเตอร์  $\pm 15^\circ$  โดยมีมุมฉายแสง 3 มุม ได้แก่  $25^\circ$   $45^\circ$  และ  $75^\circ$  สำหรับมุมเมทัลลิกมีมุมฉายแสงมุมเดียวที่  $45^\circ$  และวัดสีที่มุมอะซิมุทควอเตอร์  $+25^\circ$   $+45^\circ$   $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$  ด้วยมุมเหล่านี้มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์จึงสามารถระบุลักษณะ โดยเฉพาะของแต่ละสีได้อย่างแม่นยำ โดยค่าที่วัดได้จะถูกแปรผลไปเป็นค่าของตัวประกอบการสะท้อนแสง (reflectance factor) โดยเทียบกับเซรามิก จากนั้นนำไปแปรผลเป็นค่ามาตรฐาน CIE  $L^* a^* b^*$  ซึ่งช่วยให้เข้าใจง่ายยิ่งขึ้น โดย  $L^*$  จะบอกความสว่าง  $a^*$  บอกสีแดงและเขียว  $b^*$  บอกสีเหลืองและน้ำเงิน ดังตัวอย่างของสีที่ทดลอง เช่น สีตัวอย่างที่ 16 ที่มุมตกกระทบ  $45^\circ$  มุมมองที่อะซิมุทควอเตอร์  $+15^\circ$  ที่ผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน  $2^\circ$  โดย illuminant มาตรฐาน  $D_{65}$  ค่าที่ได้  $L^* = 44.39$   $a^* = -54.37$  และ  $b^* = 13.00$  ปรากฏว่าสีที่ได้คือสีเขียวออกเหลืองเล็กน้อย ค่าความสว่างปานกลาง เป็นต้น ระบบที่ได้พัฒนานี้สามารถเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับพัฒนาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสีรถยนต์ การซ่อมบำรุงอื่นๆ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศ.ดร.ธรา ชลปราชญ์  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร. S  
ปีการศึกษา.....2550.....

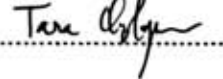
## 4770253721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING  
KEY WORD: MULTI-ANGLE /COLOR/ SPECTROPHOTOMETER/  
EFFECT PIGMENT

CHATCHAI CHARINGAM: DESIGN OF MULTI-ANGLE  
SPECTROPHOTOMETER. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.  
TARA CHOLAPRANEE, Ph.D., 107 pp.

Color and appearance are key factors in the purchase of a product. Eye-catching finishes draw the customer's attention to the product and add value to the product, since color has been developed to have higher quality and be more beautiful. Nowadays, effect pigments (metallic-flakes and interference pigments) are used in many coatings. Coatings containing effect pigments change appearance as the illuminating and viewing angles change. Formulations containing only metal-flakes and conventional pigments vary most noticeably in lightness, as the viewing angle changes. On the other hand, interference pigments selectively reflect light as the illuminating and viewing angles change. As a result, interference pigments vary most noticeably in hue and chroma. Nowadays, automotive coatings mostly use lucite colors containing effect pigments. Thus, the multi-angle spectrophotometer is required to categorize these pigments.

This thesis aims to study the color measurement system and to convert measured values to CIE standard values in order to design and construct the multi-angle spectrophotometer. In case of interference angles, color specimens are measured at aspecular angles  $\pm 15^\circ$ , with three illuminating angles at  $25^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $75^\circ$ . For metallic angles, there is one illuminating angle at  $45^\circ$  and the color is measured at aspecular angles  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $+75^\circ$ , and  $+110^\circ$ . With these angles, this spectrophotometer can exactly specify the characteristic of each color. Measure values are converted to reflectance factor compared with the ceramic. Then, these values are converted to easily understood CIE  $L^* a^* b^*$  standard values.  $L^*$  defines lightness,  $a^*$  denotes the red/green value, and  $b^*$  the yellow/blue value. For example, for the color sample number 16, at illuminating angle of  $45^\circ$ , viewing angles at aspecular angle  $+15^\circ$ , standard observer  $2^\circ$ , and standard illuminant  $D_{65}$ ,  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  are 44.39, -54.37, and 13.00, respectively. This means that the sample color is noticeably green, slightly yellow and moderate lightness. This developed system can be the prototype, suitably adapted for automotive industries and other maintenance.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.... 2007.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร. ชาราชลปราณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สละเวลาในการให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.บรียง โต้ประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาและให้คำแนะนำต่างๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าอย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ครูถาวร สุวรรณกิจ ซึ่งได้ให้คำแนะนำต่างๆจนสามารถทำงานวิจัยจนประสบผลสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัย OERL และ SDRL ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือ

ขอขอบคุณนิที่เป็นเพื่อน ซึ่งช่วยให้กำลังใจและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณท็อปที่ช่วยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือ

ขอขอบคุณเป๊ก ชิน และ ยันที่เป็นเพื่อนซึ่งช่วยให้กำลังใจ

และท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องชาย ลุง ป้า และ น้าทุกคน ที่ช่วยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีจนจบการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำและแนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขต.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 มาตรฐานของการวัดสี.....	4
2.1 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (Standard Illuminants and Sources).....	4
2.1.1 Illuminants มาตรฐานตาม CIE.....	6
2.1.1.1 Illuminant A.....	6
2.1.1.2 Illuminant B และ C.....	6
2.1.1.3 Illuminant D <sub>65</sub> .....	6
2.1.1.4 Illuminant D อื่นๆ.....	7
2.1.2 Sources มาตรฐานที่ CIE แนะนำให้ใช้แทน illuminants มาตรฐาน.....	10
2.1.2.1 Source A.....	10
2.1.2.2 Sources B และ C.....	10
2.1.2.3 Sources D.....	10
2.2 ตัวประกอบการสะท้อนแสง (Reflectance Factor).....	10
2.3 เงื่อนไขมาตรฐานของการฉายแสงและการรับแสง.....	11
2.3.1 45/มุมฉาก (45/0).....	11
2.3.2 มุมฉาก/45 (0/45).....	11
2.3.3 Diffuse/มุมฉาก (D/0).....	12
2.3.4 มุมฉาก/Diffuse (0/D).....	12

2.4 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน (Standard Colorimetric Observer).....	13
2.4.1 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931 .....	13
2.4.2 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานเสริม (Supplementary Standard Colorimetric Observer) ตาม CIE ปี 1964.....	18
บทที่ 3 เครื่องวัดสี .....	25
3.1 คัลเลอร์มิเตอร์ (Colorimeter) .....	25
3.1.1 คัลเลอร์มิเตอร์แบบบวก (Additive Colorimeters).....	25
3.1.2 คัลเลอร์มิเตอร์แบบลบ (Subtractive Colorimeters) .....	28
3.1.3 คัลเลอร์มิเตอร์แบบใช้เซลล์รับแสง (Photoelectric Colorimeter).....	29
3.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer).....	30
3.2.1 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์ (Integrating Sphere Spectrophotometer) .....	31
3.2.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 (หรือ 45/0).....	32
3.2.3 มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Multi-angle Spectrophotometer) .....	33
บทที่ 4 ชนิดของพื้นผิว .....	35
4.1 ผิวด้าน (Matte surface) .....	35
4.2 ผิวขรุขระ (Textured or irregular surface) .....	35
4.3 ผิวมันวาว (High gloss surface).....	36
บทที่ 5 ระบบสีมาตรฐานของ CIE.....	38
5.1 ระบบการจัดอันดับสีและปริภูมิสี (Color-order Systems และ Color Spaces) .....	38
5.1.1 ระบบการจัดอันดับสีของ Munsell (Munsell color-order system) .....	38
5.1.2 ปริภูมิสี xyY ตาม CIE (CIE xyY color space) .....	42
5.1.3 แผนภาพ UCS แบบสามเหลี่ยมของ Judd และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าของ MacAdam .....	43
5.1.4 ปริภูมิสี $L\alpha\beta$ ของ Hunter และ Lab .....	43
5.1.5 ปริภูมิสีของค่าทางสีของ Adams (Adams chromatic value color space) .....	45
5.1.6 ปริภูมิสี Lab ของ Hunter .....	45
5.1.7 ปริภูมิสีของ Adams – Nickerson (ANLAB) .....	46
5.1.8 ปริภูมิสีแบบรากที่สามในยุคแรกๆ (Early cube – root spaces).....	47
5.1.9 แผนภาพ UCS ปี 1960 และ ปริภูมิสี $U^*V^*W^*$ .....	47
5.1.10 แผนภาพ UCS ตาม CIE ปี 1976 และปริภูมิสี CIELUV และ CIELAB .....	47
5.2 การประเมินค่าความแตกต่างของสี (Color – difference Evaluation).....	50



5.2.1 หลักการการประเมินค่าความแตกต่างของสี .....	51
5.2.2 Single – number shade passing .....	54
5.2.3 ความแตกต่างของสีตาม CIELAB และ CIELUV .....	54
5.2.4 ความแตกต่างของสีของ CMC (1:c).....	57
5.2.4 ความแตกต่างของสีตาม CIE ปี 1994 ( $\Delta L^*$ $\Delta C^*_{ab}$ $\Delta H^*_{ab}$ ).....	60
บทที่ 6 การออกแบบมัลติเองเกิดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ .....	62
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดสี.....	63
6.3 วิธีการทดลอง.....	70
6.4 ผลการคำนวณ .....	73
6.4.1 การคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1931 โดยผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน ..	73
6.4.2 การคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1964 โดยผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน เสริม.....	73
บทที่ 7 ผลการทดลอง .....	75
บทที่ 8 บทสรุป.....	95
8.1 สรุปผลการทดลอง.....	95
8.2 ข้อเสนอแนะ .....	97
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก .....	99
ภาคผนวก ก .....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์  $S(\lambda)$  ตามมาตรฐาน CIE ของ Illuminants  
A C D<sub>50</sub> D<sub>55</sub> D<sub>65</sub> และ D<sub>75</sub> ในช่วง 380 ถึง 780 นาโนเมตรช่องละ 5 นาโนเมตร ..... 4

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแสงตอนกลางวันตาม CIE  $S_0(\lambda)$   $S_1(\lambda)$  และ  $S_2(\lambda)$  ..... 8

ตารางที่ 2.3 โคออร์ดิเนตของรงควัสดุ  $x_D$   $y_D$  และตัวคูณ  $M_1$   $M_2$  ของ CIE illuminants D  
ด้วยค่าอุณหภูมิสีเทียบเคียง  $T_C$  จาก 4000 ถึง 25000 K ตาม CIE ปี 1931 ..... 8

ตารางที่ 2.4 ค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัมหรือฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ..... 14

ตารางที่ 2.5 โคออร์ดิเนตของรงควัสดุของค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัมตาม CIE ปี 1931 ..... 17

ตารางที่ 2.6 ค่าสเปกตรัมของไตรสติมูลัสหรือฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  ..... 20

ตารางที่ 2.7 โคออร์ดิเนตของรงควัสดุของค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัมตาม CIE ปี 1964 ..... 22

ตารางที่ 7.1ก ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25°  
และรับแสงที่มุม 170° และ 140° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8,  
9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35 ..... 89

ตารางที่ 7.1ข ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45°  
และรับแสงที่มุม 150° และ 120° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8,  
9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35 ..... 90

ตารางที่ 7.1ค ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 75°  
และรับแสงที่มุม 120° และ 90° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8,  
9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35 ..... 91

ตารางที่ 7.1ง ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45°  
และรับแสงที่มุม 110° และ 90° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8,  
9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35 ..... 92

ตารางที่ 7.1จ ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45°  
และรับแสงที่มุม 60° และ 25° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8,  
9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35 ..... 93

ตารางที่ 7.2 ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่มุม 25°  
(มุมอะสเปกคิวลาร์ +110°) ( $C^*_{ab}$   $h_{ab}$   $C^*_{ab,10}$  และ  $h_{ab,10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> .. 94

ตารางที่ ก.1ก ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
(มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) (X Y และ Z) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ..... 101

ตารางที่ ก.1ข ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
(มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) ( $X_{10}$   $Y_{10}$  และ  $Z_{10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ..... 102

ตารางที่ ก.1ค ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
 (มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) ( $L^* a^*$  และ  $b^*$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ..... 103

ตารางที่ ก.1ง ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
 (มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) ( $L^*_{10} a^*_{10}$  และ  $b^*_{10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ..... 104

ตารางที่ ก.1จ ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
 (มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) ( $C^*_{ab}$   $h_{ab}$   $C^*_{ab,10}$  และ  $h_{ab,10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ... 105

ตารางที่ ก.1ฉ ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
 (มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) (ค่าสูงสุดของ  $\Delta E^*_{ab}$  และ  $\Delta E^*_{ab,10}$  และค่า MCDM และ MCDM<sub>10</sub>) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ..... 106



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1 แบบจำลองการสะท้อนแสงของเม็ดสีออลูมิเนียม ..... 1

รูปที่ 1.2 ก) โครงสร้างของเม็ดสีแบบแทรกสอด.....2

          ข) การเกิดการแทรกสอดของแสง .....2

รูปที่ 1.3 ระยะทางที่แสงเดินทางเมื่อเปลี่ยนมุมที่ฉายแสงและมุมมอง .....2

รูปที่ 2.1 การฉายแสงที่มุม 45 องศา รับแสงที่มุมฉาก..... 11

รูปที่ 2.2 การฉายแสงที่มุมฉาก รับแสงที่มุม 45 องศา..... 11

รูปที่ 2.3 การฉายแสงให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายในอินทิเกรตติ้งสเฟียร์  
          และรับแสงที่มุมฉาก ..... 12

รูปที่ 2.4 การฉายแสงแก่วัตถุที่มุมฉากให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายใน  
          อินทิเกรตติ้งสเฟียร์แล้วรับแสง ..... 12

รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันเทียบสี RGB ที่ขอบเขตมุมมอง 2° โดย Stiles และ Burch ..... 15

รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันเทียบสี XYZ ตาม CIE ปี 1931..... 15

รูปที่ 2.7 แผนภาพรงควัตถุตาม CIE ปี 1931 (x, y) ..... 18

รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันเทียบสี XYZ ตาม CIE ปี 1964..... 19

รูปที่ 2.9 แผนภาพรงควัตถุตาม CIE 1964 (x<sub>10</sub>, y<sub>10</sub>) ..... 21

รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของขอบเขตมุมมองกับค่าของระยะทางและขนาดของวัตถุ ..... 23

รูปที่ 2.11 ขอบเขตมุมมองที่ระยะห่างประมาณ 25 เซนติเมตร โดยทำมุมกับดวงตาของ  
          ผู้สังเกตการณ์ที่ 1, 2, 4 และ 10 องศาตามลำดับ ..... 23

รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของคัลเลอริมิเตอร์ ..... 25

รูปที่ 3.2 ระบบการผสมสีของคัลเลอริมิเตอร์แบบ Guild ..... 27

รูปที่ 3.3 ระบบการผสมสีของคัลเลอริมิเตอร์แบบ Donaldson ..... 27

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการทำงานของคัลเลอริมิเตอร์แบบลบ ..... 29

รูปที่ 3.5 หลักการของคัลเลอริมิเตอร์แบบใช้เซลล์รับแสง 3 เซลล์ ..... 30

รูปที่ 3.6 การทำงานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์แบบ D/8..... 31

รูปที่ 3.7 โครงสร้างพื้นฐานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 2 ลำแสง  
          (Dual-beam spectrophotometer) ..... 32

รูปที่ 3.8 การทำงานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 ..... 32

รูปที่ 3.9 การทำงานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์..... 33

รูปที่ 3.10 โครงสร้างพื้นฐานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบหนึ่งมุมฉายแสง ..... 33

รูปที่ 4.1 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวด้าน ..... 35

รูปที่ 4.2 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวขรุขระ .....	36
รูปที่ 4.3 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวมันวาว.....	36
รูปที่ 5.1 ระบบพิกัดฉากและเชิงขั้ว .....	39
รูปที่ 5.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก .....	40
รูปที่ 5.3 ระบบวงเฉดสีของ Munsell (H) .....	41
รูปที่ 5.4 แกนพิกัดฉากของปริภูมิสีคู่ตรงข้ามและปริภูมิ LAB ตาม CIE และความสัมพันธ์ของตำแหน่งของสีส้มและสีน้ำตาลที่ความสว่างเท่ากัน .....	44
รูปที่ 5.5 แผนภาพรงควภาวะตาม CIE 1931 ซึ่งแสดงข้อมูลปี 1942 ของ MacAdam .....	53
รูปที่ 5.6 การกำหนดวงรีของค่าที่ยอมรับได้ ในส่วนของแผนภาพรงควภาวะตาม CIE .....	53
รูปที่ 5.7 แผนภาพ LAB ตาม CIE $a^* b^*$ แสดงตำแหน่งของมาตรฐาน (S1 และ S2) ชิ้นงาน (B1a B1b B2a B2b และ B2c) และคุณสมบัติความแตกต่างของเฉดสีของมัน.....	56
รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนที่เป็น ฮาร์ดแวร์ .....	62
รูปที่ 6.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนที่เป็น ซอฟต์แวร์.....	63
รูปที่ 6.3 หลอดฮาโลเจนไฟนํารยนต์ที่อุณหภูมิสีเทียบเคียง 6000 K ที่กำลังงาน 60 W พร้อมชุดระบายความร้อน (พัดลมระบายอากาศ 2 ตัว).....	63
รูปที่ 6.4 ก) ชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านบน) โดยรับแสงจากโมโนโครเมเตอร์ (จากมุม 25° 45° และ 75°) และแยกแสงไปที่มุมอะสเปกทีวาร์ ( $\pm 15^\circ +25^\circ$ $+45^\circ +75^\circ$ และ $+110^\circ$ ).....	64
ข) ที่ใส่แผ่นสีของชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านหน้า).....	65
ค) ช่องที่ให้แสงผ่านไปตกกระทบบนแผ่นสี (ขนาดของช่อง 4x4 cm <sup>2</sup> ) ของชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านล่าง).....	65
รูปที่ 6.5 เส้นใยนำแสงขณะปลายหนึ่งติดกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ส่วนปลายอีกด้านติด ด้วยตั้งกะสี .....	66
รูปที่ 6.6 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (R3896).....	66
รูปที่ 6.7 เครื่องจ่ายกำลังไฟตรงแรงดันสูงโดยจ่ายให้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ที่แรงดัน 800 V .....	67
รูปที่ 6.8 แหล่งจ่ายกำลังไฟตรงสำหรับหลอดฮาโลเจน โดยมีแรงดันไฟตรง 12 V และกระแส 5 A.....	67
รูปที่ 6.9 เซรามิกที่ใช้ในการทดลองเทียบสี .....	68
รูปที่ 6.10 แผ่นสี 43 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง .....	68



รูปที่ 7.15 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 31 .....	83
รูปที่ 7.16 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 35 .....	84
รูปที่ 7.17 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 20 .....	86
รูปที่ 7.18 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 24 .....	86
รูปที่ 7.19 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 8 .....	87
รูปที่ 7.20 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 9 .....	88

# บทที่ 1

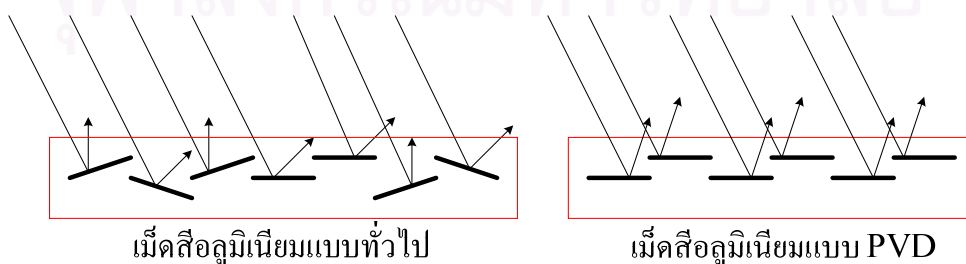
## บทนำ

### 1.1 บทนำและแนวเหตุผล

สีและสภาพปรากฏเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจซื้อสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ สีที่สวยงามน่าหลงใหลจะทำให้ลูกค้าสนใจในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มราคาของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

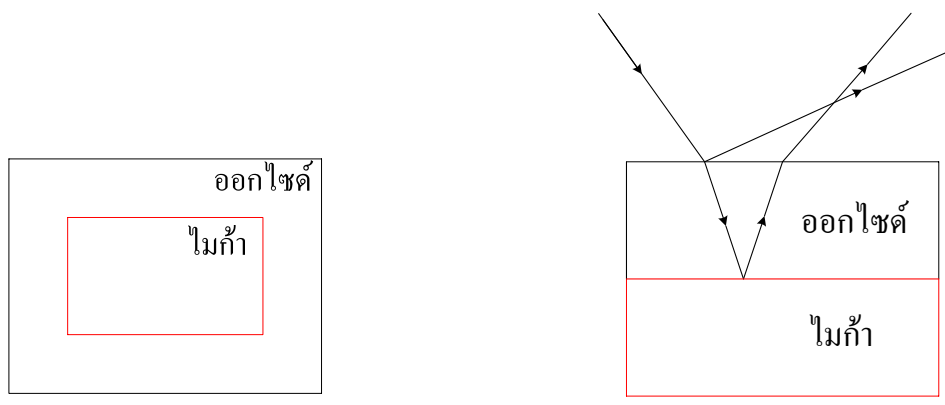
ผู้ผลิตรถยนต์เรียนรู้ถึงสิ่งนี้มายาวนาน และในปัจจุบันใช้เม็ดสีที่ส่งผลกับการมองเห็น (effect pigments) ซึ่งก็ได้แก่ เม็ดสีโลหะ (metallic pigments) และ เม็ดสีแบบแทรกสอด (interference or pearlescent pigments) ในสีหลายๆแบบ [1]

สีที่ใช้เม็ดสีเหล่านี้จะเปลี่ยนสภาพปรากฏขณะที่มุมมองและมุมมองเปลี่ยน โดยเม็ดสีโลหะมีคุณสมบัติคล้ายกับกระจกทึบ และส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเฉพาะความสว่างเมื่อเปลี่ยนมุมมอง ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งแสดงการสะท้อนแสงของเม็ดสีอลูมิเนียมแบบทั่วไปและแบบ PVD (Physical vapor deposition) [2] ซึ่งปรากฏว่ามีการกระเจิงแสงเป็นส่วนมากในกรณีอลูมิเนียมทั่วไป และการสะท้อนแสงแบบเสมือนกระจก (mirror-like) เป็นส่วนมากในกรณีของ PVD อลูมิเนียม โดยแบบหลังจะให้คุณสมบัติคือ เมื่อมุมมองเปลี่ยนความสว่างจะเปลี่ยนตาม (Flop effect) ส่วนในรูปที่ 1.2ก แสดงโครงสร้างของเม็ดสีแบบแทรกสอด [3,4] ซึ่งประกอบด้วยสารออกไซด์เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ที่มีค่าดัชนีหักเหสูงอยู่ชั้นนอก และกรณีที่ยกมาเป็นตัวอย่าง ชั้นในจะเป็นสารไมกา (mica) ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำกว่า ดังนั้นการแทรกสอดของแสงจะเกิดขึ้นระหว่างแสงที่สะท้อนจากผิวของออกไซด์กับแสงที่สะท้อนจากรอยต่อของออกไซด์กับไมกา ดังรูปที่ 1.2ข ระยะทางที่แสงเดินทางไม่เท่ากันในแต่ละมุมที่ฉายแสง จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดการแทรกสอดหลายค่าได้ ดังในรูปที่ 1.3 จากปรากฏการณ์นี้เอง ทำให้เม็ดสีชนิดนี้เปลี่ยนค่าของค่ารังสีและเฉดสีเมื่อเปลี่ยนมุมที่ฉายแสง เนื่องจากระยะทางที่แสงเดินทางเปลี่ยนนั่นเอง ดังนั้นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบทั่วไปนั้นไม่สามารถบอกถึงลักษณะเฉพาะของสีนั้นๆได้ ขณะที่นักออกแบบสีชอบผลเกี่ยวกับการมองเห็นที่เกิดจากเม็ดสีเหล่านี้ ดังนั้นจึงเป็นความท้าทายที่จะสร้างเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบและประเมินผลของเม็ดสีเหล่านี้ได้



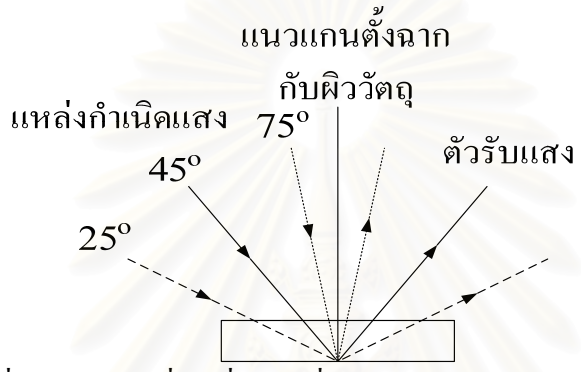
รูปที่ 1.1 แบบจำลองการสะท้อนแสงของเม็ดสีอลูมิเนียม





รูปที่ 1.2 ก) โครงสร้างของเม็คสีแบบแทรกสอด

ข) การเกิดการแทรกสอดของแสง



รูปที่ 1.3 ระยะทางที่แสงเดินทางเมื่อเปลี่ยนมุมที่ฉายแสงและมุมมองโดยเส้นประแสดงระยะทางสูงสุดที่แสงเดินทาง และเส้นจุดแสดงระยะทางสั้นสุดที่แสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังตัวรับแสง

มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (multi-angle spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปรียบเทียบสี ตรวจสอบและประเมินสีที่ประกอบด้วยเม็คสีเหล่านั้น ขณะที่เครื่องวัดสีโดยทั่วไปมักจะปรับมุมไม่ได้ เช่น คัลเลอร์มิเตอร์วัดได้เพียงมุมเดียว (45/0) และสเปียร์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ก็ไม่สามารถเลือกวัดหลายมุมได้ เนื่องจากแสงต้องผ่านไปอินทิเกรตติ้งสเฟียร์ (integrating sphere) แสงที่สะท้อนส่วนมากจะเป็นการสะท้อนแบบกระจายแสง (Diffused reflectance) ซึ่งทำให้ไม่สามารถวัดแสงที่สะท้อนแบบการสะท้อนเสมือนกระจก (Specular reflectance) ในแต่ละมุมได้ ทั้ง 2 ชนิดที่ยกตัวอย่างมานั้น โดยมากใช้ในการวัดวัตถุที่มีผิวด้านสำหรับพื้นผิวแบบมันวาวหรือแบบผิวขรุขระนั้น ถ้าใช้ 2 แบบข้างต้นก็ไม่สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะทางแสงของวัตถุที่ประกอบด้วยเม็คสีโลหะหรือเม็คสีแบบแทรกสอดได้อย่างถูกต้อง

มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถปรับมุมฉายแสงและมุมรับแสงได้หลายมุม เพื่อจะสามารถวัดสีที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละมุมของพื้นผิวที่ประกอบด้วยเม็คสีเหล่านั้นได้อย่างถูกต้องที่สุด จากที่กล่าวมาจะพบว่า นอกจากสีรถยนต์แล้ว มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สามารถใช้วัดสีประเภทอื่นได้ ทั้งที่เป็นผิวด้าน ผิวขรุขระ หรือผิวมันวาวได้ เนื่องจากคุณลักษณะที่สามารถวัดได้หลายมุมนั่นเอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการออกแบบมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และการแปรค่าออกมาเป็นค่าที่นักออกแบบสีเข้าใจ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการวัดสี
- 1.2.2 ศึกษากระบวนการแปรผลที่วัดได้เป็นค่ามาตรฐาน CIE
- 1.2.3 ออกแบบและสร้างมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## 1.3 ขอบเขต

- 1.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนแสง เมื่อเปลี่ยนมุมมองและมุมที่ฉายแสงในแต่ละพื้นผิว
- 1.3.2 ศึกษาการแปรค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้ไปเป็นค่าไตรสติมูลัส (Tristimulus Value) XYZ,  $L^* a^* b^*$  หรือ  $L^* C^* H^\circ$  ที่มุมผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน  $2^\circ$  และ  $10^\circ$
- 1.3.3 นำผลการศึกษามาใช้ในออกแบบและสร้างมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาการหาคุณสมบัติของเม็ดสีชนิดต่างๆ
- 1.4.2 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของแสงและสี
- 1.4.3 ศึกษาเครื่องมือการวัดสีชนิดต่างๆ
- 1.4.4 ศึกษากระบวนการวัดสีมาตรฐาน CIE
- 1.4.5 ออกแบบและสร้างมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 1.4.6 ทำการทดลองวัดค่าการสะท้อนแสงของสีชนิดต่างๆและหาค่าไตรสติมูลัส XYZ จากนั้นแปรค่าเป็น  $L^* a^* b^*$ ,  $L^* C^* H^\circ$
- 1.4.7 สรุปผลและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจหลักการของระบบมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และความหมายของค่าที่แปรผลออกมา เช่น  $L^* a^* b^*$  เป็นต้น
- 1.5.2 สามารถนำผลการทดลองที่ได้จำแนกสีรถยนต์ได้
- 1.5.3 เป็นเครื่องต้นแบบในการพัฒนาเพื่อใช้กับอุตสาหกรรมรถยนต์ และการซ่อมบำรุงในด้านอื่นๆ ต่อไป

**บทที่ 2**  
**มาตรฐานของการวัดสี**

**2.1 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (Standard Illuminants and Sources)**

CIE แยกแยะความแตกต่างระหว่าง illuminant กับ source ขณะที่ source กล่าวถึงแหล่งปล่อยพลังงานแสงทางกายภาพเช่น หลอดไฟหรือดวงอาทิตย์ ส่วน illuminant กล่าวถึงการกระจายทางกำลังแสงโดยเฉพาะที่ตกกระทบบนวัตถุซึ่งมองโดยผู้สังเกตการณ์ และสเปกตรัมการกระจายกำลังแสงที่ถูกกำหนดโดย illuminant ไม่จำเป็นต้องเหมือนกับ source โดย CIE แนะนำให้ใช้ illuminants ที่กำหนดค่าการกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ (relative spectral power distributions,  $S(\lambda)$ ) ดังในตารางที่ 2.1 [5, 6]

ตารางที่ 2.1 การกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์  $S(\lambda)$  ตามมาตรฐาน CIE ของ Illuminants A

C D<sub>50</sub> D<sub>55</sub> D<sub>65</sub> และ D<sub>75</sub> ในช่วง 380 ถึง 780 นาโนเมตรช่องละ 5 นาโนเมตร

$\lambda$ (nm)	A	C	D <sub>50</sub>	D <sub>55</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>75</sub>
	$S(\lambda)$	$S(\lambda)$	$S(\lambda)$	$S(\lambda)$	$S(\lambda)$	$S(\lambda)$
380	9.8	33	24.49	32.58	49.98	66.7
385	10.9	39.92	27.18	35.34	52.31	68.33
390	12.09	47.4	29.87	38.09	54.65	69.96
395	13.35	55.17	39.59	49.52	68.7	85.95
400	14.71	63.3	49.31	60.95	82.75	101.93
405	16.15	71.81	52.91	64.75	87.12	106.91
410	17.68	80.6	56.51	68.55	91.49	111.89
415	19.29	89.53	58.27	70.07	92.46	112.35
420	20.99	98.1	60.03	71.58	93.43	112.8
425	22.79	105.8	58.93	69.75	90.06	107.94
430	24.67	112.4	57.82	67.91	86.68	103.09
435	26.64	117.75	66.32	76.76	95.77	112.14
440	28.7	121.5	74.82	85.61	104.86	121.2
445	30.85	123.45	81.04	91.8	110.94	127.1
450	33.09	124	87.25	97.99	117.01	133.01
455	35.41	123.6	88.93	99.23	117.41	132.68
460	37.81	123.1	90.61	100.46	117.81	132.36
465	40.3	123.3	90.99	100.19	116.34	129.84
470	42.87	123.8	91.37	99.91	114.86	127.32
475	45.52	124.09	93.24	101.33	115.39	127.06
480	48.24	123.9	95.11	102.74	115.92	126.8
485	51.04	122.92	93.54	100.41	112.37	122.29
490	53.91	120.7	91.96	98.08	108.81	117.78
495	56.85	116.9	93.84	99.38	109.08	117.19
500	59.86	112.1	95.72	100.68	109.35	116.59
505	62.93	106.98	96.17	100.69	108.58	115.15
510	66.06	102.3	96.61	100.7	107.8	113.7
515	69.25	98.81	96.87	100.34	106.3	111.18
520	72.5	96.9	97.13	99.99	104.79	108.56
525	75.79	96.78	99.61	102.1	106.24	109.55
530	79.13	98	102.1	104.21	107.69	110.44

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	A	C	D <sub>50</sub>	D <sub>55</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>75</sub>
	$s(\lambda)$	$s(\lambda)$	$s(\lambda)$	$s(\lambda)$	$s(\lambda)$	$s(\lambda)$
535	82.52	99.94	101.43	103.16	106.05	108.37
540	85.95	102.1	100.75	102.1	104.41	106.29
545	89.41	103.95	101.54	102.53	104.23	105.6
550	92.91	105.2	102.32	102.97	104.05	104.9
555	96.44	105.67	101.16	101.48	102.02	102.45
560	100	105.3	100	100	100	100
565	103.58	104.11	98.87	98.61	98.17	97.81
570	107.18	102.3	97.74	97.22	96.33	95.62
575	110.8	100.15	98.33	97.48	96.06	94.91
580	114.44	97.8	98.92	97.75	95.79	94.21
585	118.08	95.43	96.21	94.59	92.24	90.6
590	121.73	93.2	93.5	91.43	88.69	87
595	125.39	91.22	95.59	92.93	89.35	87.11
600	129.04	89.7	97.69	94.42	90.01	87.23
605	132.7	88.83	98.48	94.78	89.8	86.68
610	136.35	88.4	99.27	95.14	89.6	86.14
615	139.99	88.19	99.16	94.68	88.65	84.86
620	143.62	88.1	99.04	94.22	87.7	83.58
625	147.24	88.06	97.38	92.33	85.49	81.16
630	150.84	88	95.72	90.45	83.29	78.75
635	154.42	87.86	97.29	91.39	83.49	78.59
640	157.98	87.8	98.86	92.33	83.7	78.43
645	161.52	87.99	97.26	90.59	81.86	76.61
650	165.03	88.2	95.67	88.85	80.03	74.8
655	168.51	88.2	96.93	89.59	80.12	74.56
660	171.96	87.9	98.19	90.32	80.21	74.32
665	175.38	87.22	100.6	92.13	81.25	74.87
670	178.77	86.3	103	93.95	82.28	75.42
675	182.12	85.3	101.07	91.95	80.28	73.5
680	185.43	84	99.13	89.96	78.28	71.58
685	188.7	82.21	93.26	84.82	74	67.71
690	191.93	80.2	87.38	79.68	69.72	63.85
695	195.12	78.24	89.49	81.26	70.67	64.46
700	198.26	76.3	91.6	82.84	71.61	65.08
705	201.36	74.36	92.25	83.84	72.98	66.57
710	204.41	72.4	92.89	84.84	74.35	68.07
715	207.41	70.4	84.87	77.54	67.98	62.26
720	210.36	68.3	76.85	70.24	61.6	56.44
725	213.27	66.3	81.68	74.77	65.74	60.34
730	216.12	64.4	86.51	79.3	69.89	64.24
735	218.92	62.8	89.55	82.15	72.49	66.7
740	221.67	61.5	92.58	84.99	75.09	69.15
745	224.36	60.2	85.4	78.44	69.34	63.89
750	227	59.2	78.23	71.88	63.59	58.63
755	229.59	58.5	67.96	62.34	55.01	50.62
760	232.12	58.1	57.69	52.79	46.42	42.62
765	234.59	58	70.31	64.36	56.61	51.98
770	237.01	58.2	82.92	75.93	66.81	61.35
775	239.37	58.5	80.6	73.87	65.09	59.84
780	241.68	59.1	78.27	71.82	63.38	58.32

### 2.1.1 Illuminants มาตรฐานตาม CIE

Illuminants มาตรฐานตาม CIE [6] แบ่งได้ดังนี้

#### 2.1.1.1 Illuminant A

Illuminant A แทนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงชนิด blackbody ที่อุณหภูมิ 2856 K สามารถให้การกระจายกำลังเชิงสเปกตรัม (spectral power distribution) ขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวโดยมีค่า radiance exitance ( $M_\lambda$ ) ดังนี้

$$M_\lambda = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} W \cdot m^{-3} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$c_1 = 3.74150 \times 10^{-16} W \cdot m^2$$

$$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$$

ค่าการกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมของ illuminant A สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 โดยใช้ค่าคงที่  $c_1$   $c_2$  และกำหนดให้ค่า  $T = 2856 K$  จากตารางที่ 2.1 ค่าที่ได้เป็นค่าที่ถูกระบุโดย (normalization) เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยใช้ค่าที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตรเท่ากับ 100 ที่ใช้ความยาวคลื่นนี้เป็นตัวเทียบ เพราะเป็นความยาวคลื่นที่ตาตอบสนองดีที่สุดในตอนกลางวัน เนื่องจากค่าของ  $c_2$  ส่งผลอย่างมากกับรูปร่างของ  $S(\lambda)$  ในปี 1931 มีการกำหนดค่าครั้งแรก  $c_2 = 1.4350 \times 10^{-2} m \cdot K$  และ  $T = 2848 K$  และค่าใหม่ที่ให้ไปข้างต้นทำให้ได้ค่า  $T = (1.4388/1.4350)2848 \cong 2856 K$  ซึ่งยังคงใช้มาจนปัจจุบัน

#### 2.1.1.2 Illuminant B และ C

Illuminant B แทนแสงที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งมีอุณหภูมิสีเทียบเคียง (correlated color temperature) ที่ 4870 K illuminant C แทนแสงอาทิตย์ตอนกลางวันโดยเฉลี่ย ซึ่งมีอุณหภูมิสีเทียบเคียงที่ 6770 K ทั้ง illuminant B และ C ไม่เพียงพอที่จะแสดงช่วงของแสงตอนกลางวัน (daylight) CIE จึงตัดสินใจตัด illuminants ทั้ง 2 ออกจาก illuminants มาตรฐานที่แนะนำ และมีเพียง illuminant  $D_{65}$  ที่นำไปใช้วัดสีในช่วงของแสงตอนกลางวัน โดยอุณหภูมิสีเทียบเคียงอ้างอิงถึงค่าที่ให้สี ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่แหล่งกำเนิดแสงที่เป็น Blackbody ปล่อยแสงออกมาที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ค่านั้น

#### 2.1.1.3 Illuminant $D_{65}$

Illuminant  $D_{65}$  แทนช่วงของแสงตอนกลางวัน โดยมีอุณหภูมิสีเทียบเคียงที่ 6500 K illuminant  $D_{65}$  ได้จากการวัดแสงตอนกลางวันในหลายๆที่ เช่น ในอเมริกา แคนาดา และอังกฤษ โดยวัดที่เวลาระหว่าง 2 ชั่วโมงหลังพระอาทิตย์ขึ้น ถึง 2 ชั่วโมงก่อนพระอาทิตย์ตกดิน และจากท้องฟ้าที่ถูกปกคลุมด้วยเมฆถึงท้องฟ้าที่โปร่งใส ช่วงของแสงตอนกลางวันโดยทั่วไป จะจำกัดอยู่ในช่วงอุณหภูมิสีเทียบเคียงตั้งแต่ 6000-7000 K โดยประมาณ 6500 K จึงเป็นการประมาณที่ดี

### 2.1.1.4 Illuminant D ชนิดอื่นๆ

เมื่อท้องฟ้าบางส่วนจากท้องฟ้าทั้งหมดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงบนผิววัตถุ จะพบว่าแสงจะแปรผันตามสถานที่และเมฆหมอก ขณะที่บางส่วนของท้องฟ้าโปร่งใสแต่บางส่วนของแสงจ้า ดังนั้น อุณหภูมิสีเทียบเคียงอาจสูงถึง 100,000 K หรือต่ำเพียงแค่ 4,000 K และแสงตอนกลางวันที่ผ่านมาท้องฟ้าส่วนต่างๆนี้อาจอยู่ในช่วงระหว่างนี้

ถึงแม้ว่าขอบเขตของอุณหภูมิสีเทียบเคียงของแสงตอนกลางวันอาจจะค่อนข้างกว้าง แต่ Judd [7] ได้หาความสัมพันธ์ออกมาเป็นฟังก์ชันระหว่างอุณหภูมิสีเทียบเคียง  $T_c$  ของแสงตอนกลางวันกับการกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์  $S(\lambda)$  ของมัน และพบว่าทุกๆช่วงของแสงตอนกลางวัน  $T_c$  ใดๆจะให้ค่า  $S(\lambda)$  เพียงค่าเดียว เพราะว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะทางด้านสีของมันเอง โดยการกระจายของ  $S(\lambda)$  จะกำหนดค่าที่ทุกๆ 10 นาโนเมตรในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 830 นาโนเมตร

ตาม CIE ปี 1931  $(x, y)$  ซึ่งเป็น โคออร์ดิเนตของรงกภาวะ (Chromaticity Coordinate) ของแสงตอนกลางวัน (D) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$y_D = -3.000x_D^2 + 2.870y_D^2 - 0.275 \quad (2.2)$$

กับค่า  $x_D$  ภายในช่วงระหว่าง 0.250 ถึง 0.380 อุณหภูมิสีเทียบเคียง  $T_c$  ของแสงตอนกลางวัน (D) สัมพันธ์กับ  $x_D$  ดังนี้

สำหรับอุณหภูมิสีเทียบเคียงจากประมาณ 4000 ถึง 7000 K

$$x_D = -4.6070 \frac{10^9}{T_c^3} + 2.9678 \frac{10^6}{T_c^2} + 0.09911 \frac{10^3}{T_c} + 0.244063 \quad (2.3)$$

สำหรับอุณหภูมิสีเทียบเคียงจาก 7000 ถึง ประมาณ 25,000 K

$$x_D = -2.0064 \frac{10^9}{T_c^3} + 1.9018 \frac{10^6}{T_c^2} + 0.24748 \frac{10^3}{T_c} + 0.237040 \quad (2.4)$$

การกระจายกำลังเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์  $S(\lambda)$  ของแสงตอนกลางวัน (D) คำนวณจาก

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (2.5)$$

โดยค่า  $S_0(\lambda)$   $S_1(\lambda)$  และ  $S_2(\lambda)$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นดังตารางที่ 2.2 ส่วนค่า  $M_1$  และ  $M_2$  คือตัวคูณของค่าที่สัมพันธ์กับโคออร์ดิเนตของรงกภาวะ  $x_D$  และ  $y_D$  ดังนี้

$$M_1 = \frac{-1.3515 - 1.7703x_D + 5.9114y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (2.6 ก)$$

$$M_2 = \frac{0.0300 - 31.4424x_D + 30.0717y_D}{0.0241 + 0.2562x_D - 0.7341y_D} \quad (2.6 ข)$$

เมื่อคำนวณค่าของ  $x_D$   $y_D$   $M_1$  และ  $M_2$  สำหรับอุณหภูมิสีเทียบเคียงในช่วง 4000 ถึง 25,000 K จะได้ค่าต่างๆดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแสงตอนกลางวันตาม CIE  $S_0(\lambda)$   $S_1(\lambda)$  และ  $S_2(\lambda)$  [6]

$\lambda(\text{nm})$	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$S_0(\lambda)$	$S_1(\lambda)$	$S_2(\lambda)$
300	0.04	0.02	0	570	96	-1.6	0.2
310	6	4.5	2	580	95.1	-3.5	0.5
320	29.6	22.4	4	590	89.1	-3.5	2.1
330	55.3	42	8.5	600	90.5	-5.8	3.2
340	57.3	40.6	7.8	610	90.3	-7.2	4.1
350	61.8	41.6	6.7	620	88.4	-8.6	4.7
360	61.5	38	5.3	630	84	-9.5	5.1
370	68.8	42.4	6.1	640	85.1	-10.9	6.7
380	63.4	38.5	2	650	81.9	-10.7	7.3
390	65.8	35	1.2	660	82.6	-12	8.6
400	94.8	43.4	-1.1	670	84.9	-14	9.8
410	104.8	46.3	-0.5	680	81.3	-13.6	10.2
420	105.9	43.9	-0.7	690	71.9	-12	8.3
430	96.8	37.1	-1.2	700	74.3	-13.3	9.6
440	113.9	36.7	-2.6	710	76.4	-12.9	8.5
450	125.6	35.9	-2.9	720	63.3	-10.6	7
460	125.5	32.6	-2.8	730	71.7	-11.6	7.6
470	121.3	27.9	-2.6	740	77	-12.2	8
480	121.3	24.3	-2.6	750	65.2	-10.2	6.7
490	113.5	20.1	-1.8	760	47.7	-7.8	5.2
500	113.1	16.2	-1.5	770	68.6	-11.2	7.4
510	110.8	13.2	-1.3	780	65	-10.4	6.8
520	106.5	8.6	-1.2	790	66	-10.6	7
530	108.8	6.1	-1	800	61	-9.7	6.4
540	105.3	4.2	-0.5	810	53.3	-8.3	5.5
550	104.4	1.9	-0.3	820	58.9	-9.3	6.1
560	100	0	0	830	61.9	-9.8	6.5

ตารางที่ 2.3 โคออร์ดิเนตของรงกภาวะ  $x_D$   $y_D$  และตัวคูณ  $M_1$   $M_2$  ของ CIE illuminants D ด้วยค่าอุณหภูมิสีเทียบเคียง  $T_c$  จาก 4000 ถึง 25000 K ตาม CIE ปี 1931 [6]

$T_c$ (K)	$x_D$	$y_D$	$M_1$	$M_2$
4000	0.3823	0.3838	-1.505	2.286
4100	0.3779	0.3812	-1.464	2.46
4200	0.3737	0.3786	-1.422	2.127
4300	0.3697	0.376	-1.378	1.825
4400	0.3658	0.3734	-1.333	1.55
4500	0.3621	0.3709	-1.286	1.302
4600	0.3585	0.3684	-1.238	1.076
4700	0.3551	0.3659	-1.19	0.871
4800	0.3519	0.3634	-1.14	0.686
4900	0.3487	0.361	-1.09	0.518
5000	0.3457	0.3587	-1.04	0.367
5100	0.3429	0.3564	-0.989	0.23
5200	0.3401	0.3541	-0.939	0.106
5300	0.3375	0.3519	-0.888	-0.005
5400	0.3349	0.3497	-0.837	-0.105
5500	0.3325	0.3476	-0.786	-0.195
5600	0.3302	0.3455	-0.736	-0.276
5700	0.3279	0.3435	-0.685	-0.348

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

$T_c$ (K)	$x_D$	$y_D$	$M_1$	$M_2$
5800	0.3258	0.3416	-0.635	-0.412
5900	0.3237	0.3397	-0.586	-0.469
6000	0.3217	0.3378	-0.536	-0.519
6100	0.3198	0.336	-0.487	-0.563
6200	0.3179	0.3342	-0.439	-0.602
6300	0.3161	0.3325	-0.391	-0.635
6400	0.3144	0.3308	-0.343	-0.664
6500	0.3128	0.3292	-0.296	-0.688
6600	0.3112	0.3276	-0.25	-0.709
6700	0.3097	0.326	-0.204	-0.726
6800	0.3082	0.3245	-0.159	-0.739
6900	0.3067	0.3231	-0.114	-0.749
7000	0.3054	0.3216	-0.07	-0.757
7100	0.304	0.3202	-0.026	-0.762
7200	0.3027	0.3189	0.017	-0.765
7300	0.3015	0.3176	0.06	-0.765
7400	0.3003	0.3163	0.102	-0.763
7500	0.2991	0.315	0.144	-0.76
7600	0.298	0.3138	0.184	-0.755
7700	0.2969	0.3126	0.225	-0.748
7800	0.2958	0.3115	0.264	-0.74
7900	0.2948	0.3103	0.303	-0.73
8000	0.2938	0.3092	0.342	-0.72
8100	0.2928	0.3081	0.38	-0.708
8200	0.2919	0.3071	0.417	-0.695
8300	0.291	0.3061	0.454	-0.682
8400	0.2901	0.3051	0.49	-0.667
8500	0.2892	0.3041	0.526	-0.652
9000	0.2853	0.2996	0.697	-0.566
9500	0.2818	0.2956	0.856	-0.471
10000	0.2788	0.292	1.003	-0.369
11000	0.2737	0.2858	1.266	-0.16
12000	0.2697	0.2808	1.495	0.045
13000	0.2664	0.2767	1.693	0.239
14000	0.2637	0.2732	1.868	0.419
15000	0.2614	0.2702	2.021	0.586
20000	0.2539	0.2603	2.571	1.231
25000	0.2499	0.2548	2.907	1.655
5503	0.3324	0.3475	-0.785	-0.198
6504	0.3127	0.3291	-0.295	-0.689
7504	0.299	0.315	0.145	-0.76

โดยที่ค่าอุณหภูมิสีเทียบเคียง  $T_c$  ของตารางที่ 2.3 ใช้ค่า  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$  ดังนั้น

Illuminant D<sub>55</sub> จะได้ค่า  $T_c = (1.4388/1.4380)5500 \cong 5503 K$

Illuminant D<sub>65</sub> จะได้ค่า  $T_c = (1.4388/1.4380)6500 \cong 6504 K$

Illuminant D<sub>75</sub> จะได้ค่า  $T_c = (1.4388/1.4380)7500 \cong 7504 K$

จะได้ค่าดังตาราง โดยค่า  $c_2$  ที่ใช้ในอดีตรณิกของ illuminants D คือ 1.4380



CIE แนะนำ illuminants D สำหรับแสงตอนกลางวัน ในขณะที่ก่อนหน้านี้ได้แนะนำ illuminants B และ C โดยเฉพาะอย่างยิ่ง illuminants D แทนสเปกตรัมในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ได้ดีกว่า illuminants B และ C สิ่งนี้สำคัญมากในการวิเคราะห์การวัดสี เพื่อดูพฤติกรรมของสารฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) ที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเล็ต

### 2.1.2 Sources มาตรฐานที่ CIE แนะนำให้ใช้แทน illuminants มาตรฐาน

Sources มาตรฐานที่ CIE แนะนำให้ใช้แทน illuminants มาตรฐาน [6, 8] มีดังนี้

#### 2.1.2.1 Source A

CIE illuminant มาตรฐาน A สร้างโดยใช้หลอดทั้งสแตนแบบเดิมก๊าซ และเป็นเส้นขดเล็กๆ โดยมีอุณหภูมิสีเทียบเคียงที่ 2856 K หลอดไฟควรถูกรอบด้วยที่ครอบซึ่งทำด้วยแร่ควอทซ์หลอม (fused-quartz envelope) ถ้าต้องการให้ได้การกระจายของแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตที่แม่นยำมากขึ้น

#### 2.1.2.2 Sources B และ C

CIE illuminants มาตรฐาน B and C สร้างเหมือน CIE source มาตรฐาน A ที่เพิ่มตัวกรองแสง โดยใช้ของเหลวที่มีส่วนผสมพิเศษ โดยตัวกรองที่ใช้แปลงให้ source A เป็น B และ C เรียกว่า ตัวกรองแสงแบบ Davis-Gibson [9]

#### 2.1.2.3 Sources D

CIE illuminants มาตรฐาน D ณ ปัจจุบันมีหลายวิธีที่จะสร้าง แต่ยังไม่วิธีที่ดีที่สุด โดยที่ใช้แพร่หลายได้แก่ หลอดซีนอนที่ถูกอัดด้วยความดันอากาศสูงและติดตัวกรองแสง (filtered high-pressure xenon-arc) หลอดทั้งสแตนที่ติดตัวกรองแสง (filtered tungsten-filament lamp) และหลอดฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescent lamp)

## 2.2 ตัวประกอบการสะท้อนแสง (Reflectance Factor) [6]

CIE แนะนำให้ใช้ตัวสะท้อนแบบกระจายแสง เพื่อวัดค่าตัวประกอบการสะท้อนแสง โดยตัวสะท้อนแสงแบบกระจายแสงอย่างสมบูรณ์คือ ตัวสะท้อนแสงแบบกระจายเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งไม่มีวัสดุใดที่มีคุณสมบัตินั้น แต่ด้วยวิธีการพิเศษทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะปรับค่ามาตรฐานสีขาว (white standards) ในรูปของตัวสะท้อนแบบกระจายแสงในอุดมคติ ในปัจจุบันแผ่นดิสก์ที่ถูกอัดมาจากผงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรือผงแบเรียมซัลเฟต (BaSO<sub>4</sub>) เหมาะกับการนำมาทำเป็นมาตรฐานสีขาว แทนผิวที่เคลือบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ที่ใช้มาก่อนหน้านี้ โดยค่าการสะท้อนแสงจะอยู่ในช่วง 0.970-0.985 ในช่วงแสงมองเห็นได้ วัสดุอื่นๆถูกใช้เป็นมาตรฐานสีขาวด้วยเหมือนกันเช่น เซรามิก (ceramic) หรือแก้วมุกทึบ (dense opal glasses) เป็นเรื่องยากที่จะแนะนำว่าวัสดุใดดีกว่า เพราะวัสดุทุกชนิดล้วนมีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะปัญหาของ

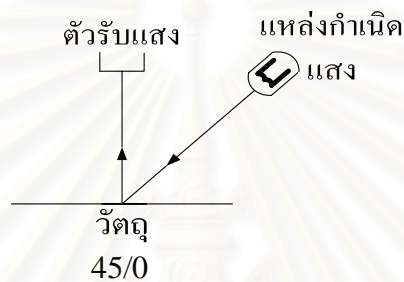
การเก็บรักษาคุณสมบัติการสะท้อนแสงของมาตรฐานสีขาวให้เท่าเดิมในระยะเวลาอันยาวนาน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ฝุ่น ความชื้น พลังงานอัลตราไวโอเล็ต และการใช้งานมากเกินไป เป็นต้น

### 2.3 เงื่อนไขมาตรฐานของการฉายแสงและการรับแสง

ตามมาตรฐานของ CIE แบ่งเงื่อนไขการฉายแสงและมุมมองการรับแสงได้ 4 วิธี [6, 8]

#### 2.3.1 45/0

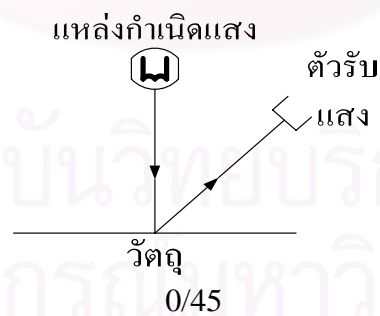
รูปที่ 2.1 แสดงการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่มุมฉาก โดยที่มาตรฐานนี้แกนที่ใช้ฉายแสงจะต้องอยู่ในช่วง  $45 \pm 2^\circ$  จากเส้นตั้งฉากกับผิวของวัตถุ และมุมระหว่างแกนที่ฉายแสงกับลำแสงไม่ควรเกิน  $8^\circ$  มุมที่รับแสงก็ไม่ควรเกิน  $10^\circ$  จากเส้นตั้งฉากกับผิวของวัตถุ



รูปที่ 2.1 การฉายแสงที่มุม 45 องศา รับแสงที่มุมฉาก

#### 2.3.2 0/45

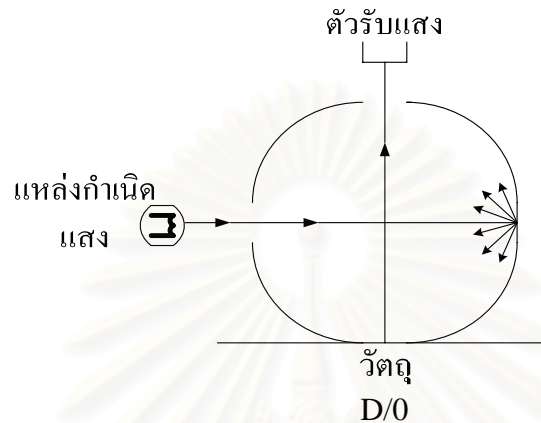
รูปที่ 2.2 แสดงการฉายแสงที่มุมฉากและรับแสงที่มุม  $45^\circ$  โดยที่มาตรฐานนี้วัตถุจะถูกฉายแสงที่มุมไม่เกิน  $10^\circ$  จากเส้นตั้งฉากกับผิวของวัตถุ ส่วนมุมที่รับแสงนั้นแกนที่ใช้รับแสงจะต้องอยู่ในช่วง  $45 \pm 2^\circ$  จากเส้นตั้งฉากกับผิวของวัตถุ และมุมระหว่างแกนที่รับแสงกับลำแสงไม่ควรเกิน  $8^\circ$



รูปที่ 2.2 การฉายแสงที่มุมฉาก รับแสงที่มุม 45 องศา

### 2.3.3 Diffuse/มุมฉาก (D/0)

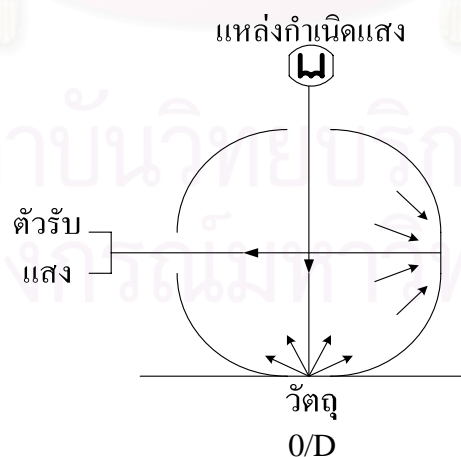
รูปที่ 2.3 แสดงการฉายแสงให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายในอินทิเกรตตั้งสเฟียร์ แล้วรับแสงที่มุมฉาก โดยมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับวัตถุและแกนที่รับแสงไม่ควรเกิน  $10^\circ$  พื้นที่ของช่องรับแสงและช่องฉายแสงรวมกันแล้ว จะต้องไม่เกิน 10% ของพื้นที่ทั้งหมดของอินทิเกรตตั้งสเฟียร์ และมุมระหว่างแกนที่รับแสงกับลำแสงไม่ควรเกิน  $5^\circ$



รูปที่ 2.3 การฉายแสงให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายในอินทิเกรตตั้งสเฟียร์ และรับแสงที่มุมฉาก

### 2.3.4 มุมฉาก/Diffuse (0/D)

รูปที่ 2.4 แสดงการฉายแสงแก่วัตถุที่มุมฉากให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายในอินทิเกรตตั้งสเฟียร์ แล้วรับแสงโดยมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับวัตถุและแกนที่ฉายแสงไม่ควรเกิน  $10^\circ$  และมุมระหว่างแกนที่ฉายแสงกับลำแสงไม่ควรเกิน  $5^\circ$  และทำนองเดียวกันพื้นที่ของช่องรับแสงและช่องฉายแสงรวมกันแล้วจะต้องไม่เกิน 10% ของพื้นที่ทั้งหมดของอินทิเกรตตั้งสเฟียร์



รูปที่ 2.4 การฉายแสงแก่วัตถุที่มุมฉากให้เกิดการสะท้อนแบบกระจายแสงภายในอินทิเกรตตั้งสเฟียร์แล้วรับแสง

## 2.4 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน (Standard Colorimetric Observer)

เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกผลิตขึ้นมา จะนำไปเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานที่มองเห็นโดยคนจำนวนหนึ่ง มีความเป็นไปได้ที่แต่ละคนมีการมองเห็นสีที่แตกต่างกัน โดยประมาณ 1 ใน 20 คนจะมีการมองเห็นที่ผิดปกติ ถ้าผลิตภัณฑ์ซึ่งคนที่มีสายตาผิดปกติสังเกตเปรียบเทียบกับมาตรฐาน จะได้ผลที่แตกต่างจากสายตาของคนปกติ ความแตกต่างด้านอื่นๆอาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของระดับของเม็ดสีของดวงตา (Ocular pigmentation) ในแต่ละคน หรือจากความคิดที่แตกต่างกันว่าองค์ประกอบใดเป็นการเปรียบเทียบสีที่ดี และจากความเข้าใจในสีที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากพื้นฐานและการฝึกฝนที่แตกต่างกัน ดังนั้น CIE ได้กำหนดผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานไว้ดังนี้

### 2.4.1 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931 [5, 6, 8, 10]

CIE แนะนำค่าจำเพาะของสติมูลัสสี (color stimulus) ต่างๆขึ้นกับค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัม (spectral tristimulus)  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ตารางที่ 2.4 แสดงค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัมในช่วงมุม 1 ถึง 4 องศาที่ดวงตาของผู้สังเกตการณ์

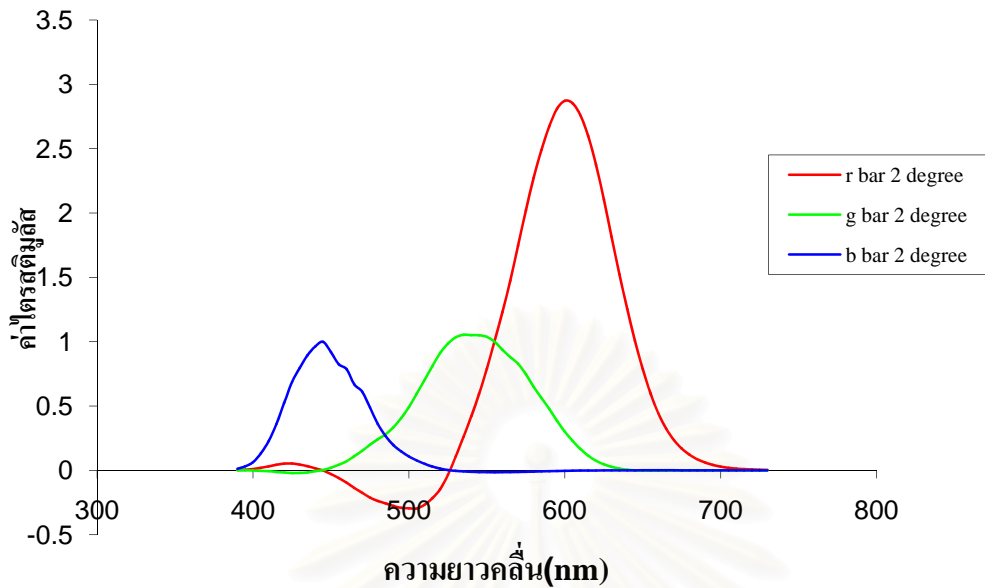
ค่าของไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัม  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ที่เรียกว่า ฟังก์ชันเทียบสี (color-matching function) ของผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931 โดยได้จากการวัดที่ขอบเขตของการมองเห็นที่ 2 องศา โดย Guild ใช้ผู้สังเกตการณ์ 7 คนสอดคล้องกับการวัดที่คล้ายกับ Wright ที่ใช้ผู้สังเกตการณ์ 10 คน และ Wright เพิ่มเติมการวัดโดยใช้ผู้สังเกตการณ์เพิ่มเป็น 35 คนเพื่อให้ได้ค่าที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

กระบวนการทดลองที่ Guild และ Wright ใช้ในการวิเคราะห์เรื่องการเปรียบเทียบสี และโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ใช้กับฟังก์ชันเทียบสี Guild และ Wright ได้วิเคราะห์เริ่มแรก โดยใช้สติมูลัสสีหลักที่ความยาวคลื่น 700.0, 546.1 และ 435.8 สำหรับ R (สีแดง) G (สีเขียว) และ B (สีน้ำเงิน) ตามลำดับ รูปที่ 2.5 แสดงค่าฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{r}(\lambda)$   $\bar{g}(\lambda)$  และ  $\bar{b}(\lambda)$  ของผู้สังเกตการณ์มาตรฐานที่มุม 2 องศาโดย Stiles และ Burch [11] ส่วนในรูปที่ 2.6 แสดงฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ตาม CIE ปี 1931

ตารางที่ 2.4 ค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัมหรือฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ในช่วง 380 ถึง 780 นาโนเมตรที่ทุกๆ 5 นาโนเมตร ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931

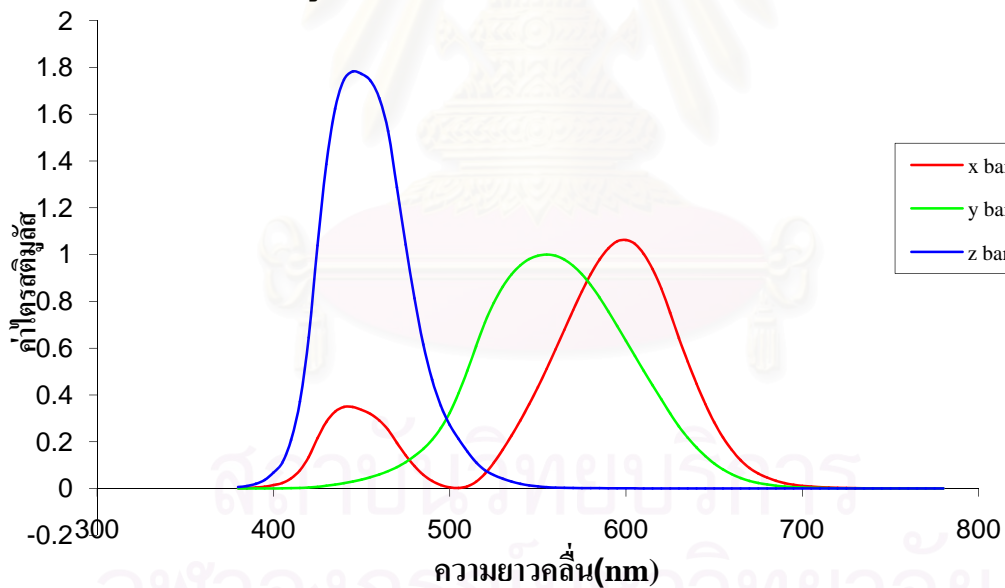
$\lambda(nm)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$\lambda(nm)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0.0014	0	0.0065	580	0.9163	0.87	0.0017
385	0.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	0.8163	0.0014
390	0.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	0.757	0.0011
395	0.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	0.6949	0.001
400	0.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	0.631	0.0008
405	0.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	0.5668	0.0006
410	0.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	0.503	0.0003
415	0.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	0.4412	0.0002
420	0.1344	0.004	0.6456	620	0.8544	0.381	0.0002
425	0.2148	0.0073	1.0391	625	0.7514	0.321	0.0001
430	0.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	0.265	0
435	0.3285	0.0168	1.623	635	0.5419	0.217	0
440	0.3483	0.023	1.7471	640	0.4479	0.175	0
445	0.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	0.1382	0
450	0.3362	0.038	1.7721	650	0.2835	0.107	0
455	0.3187	0.048	1.7441	655	0.2187	0.0816	0
460	0.2908	0.06	1.6692	660	0.1649	0.061	0
465	0.2511	0.0739	1.5281	665	0.1212	0.0446	0
470	0.1954	0.091	1.2876	670	0.0874	0.032	0
475	0.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	0.0232	0
480	0.0956	0.139	0.813	680	0.0468	0.017	0
485	0.058	0.1693	0.6162	685	0.0329	0.0119	0
490	0.032	0.208	0.4652	690	0.0227	0.0082	0
495	0.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	0.0057	0
500	0.0049	0.323	0.272	700	0.0114	0.0041	0
505	0.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	0.0029	0
510	0.0093	0.503	0.1582	710	0.0058	0.0021	0
515	0.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	0.0015	0
520	0.0633	0.71	0.0782	720	0.0029	0.001	0
525	0.1096	0.7932	0.0573	725	0.002	0.0007	0
530	0.1655	0.862	0.0422	730	0.0014	0.0005	0
535	0.2257	0.9149	0.0298	735	0.001	0.0004	0
540	0.2904	0.954	0.0203	740	0.0007	0.0002	0
545	0.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	0.0002	0
550	0.4334	0.995	0.0087	750	0.0003	0.0001	0
555	0.5121	1	0.0057	755	0.0002	0.0001	0
560	0.5945	0.995	0.0039	760	0.0002	0.0001	0
565	0.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	0	0
570	0.7621	0.952	0.0021	770	0.0001	0	0
575	0.8425	0.9154	0.0018	775	0.0001	0	0
580	0.9163	0.87	0.0017	780	0	0	0

### ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานที่มุม 2 องศาตาม RGB



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันเทียบสี RGB ที่ขอบเขตมุมมอง 2° โดย Stiles และ Burch [11]

### ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตาม CIE ปี 1931



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันเทียบสี XYZ ตาม CIE ปี 1931

ลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  คือ ฟังก์ชัน  $\bar{y}(\lambda)$  มีลักษณะเหมือนกับค่าประสิทธิภาพในการส่องสว่างมาตรฐาน (standard luminous efficiency)  $V(\lambda)$  ของการมองเห็น โดยเซลล์รูปกรวย (cone vision) ของผู้สังเกตการณ์ปกติ ค่า  $V(\lambda)$  ถูกกำหนดเป็นของผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1924 ดังนั้น CIE 1931 จึง

รวมเอามาตรฐานของพื้นฐานการวัดแสงเข้าไปด้วย Guild และ Wright ได้นำข้อเท็จจริงนี้มารวมในการออกแบบการทดลองด้วย ทั้งสองทดลองโดยวัดค่าโคออร์ดิเนตเชิงสเปกตรัมของรงควัตถุแทนค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัม แล้วนำค่าโคออร์ดิเนตเชิงสเปกตรัมของรงควัตถุที่วัดได้รวมกับค่า  $V(\lambda)$  ที่มีอยู่แล้ว ทั้งสองสามารถพิสูจน์โดยการคำนวณค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัม  $\bar{r}(\lambda)$   $\bar{g}(\lambda)$  และ  $\bar{b}(\lambda)$  Wyszecki และ Stiles [12] ได้เขียนสรุปไว้ในปี ค.ศ. 1967 โคออร์ดิเนตของรงควัตถุ  $x(\lambda)$   $y(\lambda)$  และ  $z(\lambda)$  ของสติมูลัสสีสามารถคำนวณได้จากค่าไตรสติมูลัสเชิงสเปกตรัม  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ดังสมการที่ 2.7 ก) - ค)

$$x(\lambda) = \frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \quad (2.7 \text{ ก})$$

$$y(\lambda) = \frac{\bar{y}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \quad (2.7 \text{ ข})$$

$$z(\lambda) = \frac{\bar{z}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \quad (2.7 \text{ ค})$$

โดย  $x(\lambda) + y(\lambda) + z(\lambda) = 1$

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพรงควัตถุ (Chromaticity Diagram)  $(x, y)$  ตาม CIE ปี 1931 พิจารณาความสัมพันธ์ของปริภูมิของไตรสติมูลัสสี (tristimulus-color space) ตาม CIE ปี 1931 โดยค่าสติมูลัสสี  $X$   $Y$  และ  $Z$  ในแผนภาพรงควัตถุมีเงื่อนไขคือ  $X + Y + Z = 1$  เวกเตอร์ของสติมูลัสสีตัดกับระนาบหนึ่งหน่วยที่ยอดของสามเหลี่ยมรงควัตถุ จุดยอดอยู่ตามพิสัยดังนี้

$$(X): x = 1, y = 0$$

$$(Y): x = 0, y = 1$$

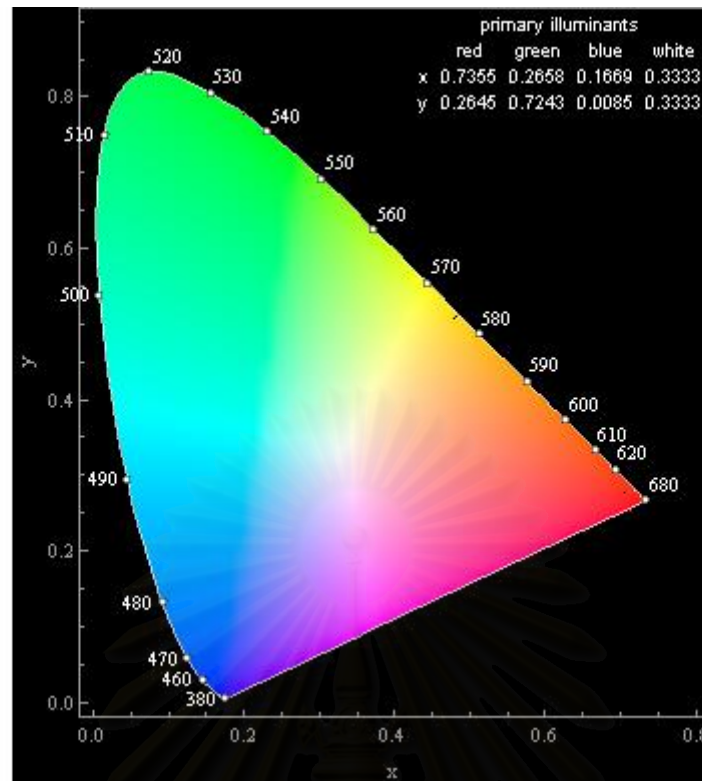
$$(Z): x = 0, y = 0$$

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าที่จุดต่างๆของรงควัตถุ  $(x, y)$  ตาม CIE ปี 1931 บนเส้นทางเดินของสเปกตรัม (spectral locus)

ตารางที่ 2.5 โคออร์ดิเนตของรงควัตถุของค่าไตรสตีมิลูตเชิงสเปกตรัมตาม CIE ปี 1931

$\lambda$ (nm)	Chromaticity coordinates			$\lambda$ (nm)	Chromaticity coordinates		
	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$		$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
380	0.1741	0.005	0.8209	580	0.5125	0.4866	0.0009
385	0.174	0.005	0.821	585	0.5448	0.4544	0.0008
390	0.1738	0.0049	0.8213	590	0.5752	0.4242	0.0006
395	0.1736	0.0049	0.8215	595	0.6029	0.3965	0.0006
400	0.1733	0.0048	0.8219	600	0.627	0.3725	0.0005
405	0.173	0.0048	0.8222	605	0.6482	0.3514	0.0004
410	0.1726	0.0048	0.8226	610	0.6658	0.334	0.0002
415	0.1721	0.0048	0.8231	615	0.6801	0.3197	0.0002
420	0.1714	0.0051	0.8235	620	0.6915	0.3083	0.0002
425	0.1703	0.0058	0.8239	625	0.7006	0.2993	0.0001
430	0.1689	0.0069	0.8242	630	0.7079	0.292	0.0001
435	0.1669	0.0086	0.8245	635	0.714	0.2859	0.0001
440	0.1644	0.0109	0.8247	640	0.719	0.2809	0.0001
445	0.1611	0.0138	0.8251	645	0.723	0.2769	0
450	0.1566	0.0177	0.8257	650	0.726	0.274	0
455	0.151	0.0227	0.8263	655	0.7283	0.2717	0
460	0.144	0.0297	0.8263	660	0.73	0.27	0
465	0.1355	0.0399	0.8246	665	0.7311	0.2689	0
470	0.1241	0.0578	0.8181	670	0.732	0.268	0
475	0.1096	0.0868	0.8036	675	0.7327	0.2673	0
480	0.0913	0.1327	0.776	680	0.7334	0.2666	0
485	0.0687	0.2007	0.7306	685	0.734	0.266	0
490	0.0454	0.295	0.6596	690	0.7344	0.2656	0
495	0.0235	0.4127	0.5638	695	0.7346	0.2654	0
500	0.0082	0.5384	0.4534	700	0.7347	0.2653	0
505	0.0039	0.6548	0.3413	705	0.7347	0.2653	0
510	0.0139	0.7502	0.2359	710	0.7347	0.2653	0
515	0.0389	0.812	0.1491	715	0.7345	0.2655	0
520	0.0743	0.8338	0.0919	720	0.7347	0.2653	0
525	0.1142	0.8262	0.0596	725	0.7347	0.2653	0
530	0.1547	0.8059	0.0394	730	0.7347	0.2653	0
535	0.1929	0.7816	0.0255	735	0.7347	0.2653	0
540	0.2296	0.7543	0.0161	740	0.7347	0.2653	0
545	0.2658	0.7243	0.0099	745	0.7347	0.2653	0
550	0.3016	0.6923	0.0061	750	0.7347	0.2653	0
555	0.3374	0.6588	0.0038	755	0.7347	0.2653	0
560	0.3731	0.6245	0.0024	760	0.7347	0.2653	0
565	0.4087	0.5896	0.0017	765	0.7347	0.2653	0
570	0.4441	0.5547	0.0012	770	0.7347	0.2653	0
575	0.4788	0.5202	0.001	775	0.7347	0.2653	0
580	0.5125	0.4866	0.0009	780	0.7347	0.2653	0





รูปที่ 2.7 แผนภาพรงคภาวะตาม CIE ปี 1931 ( $x, y$ )

รงคภาวะของการผสมกันของสติมูลส์ทั้งสอง แสดงเป็นจุดบนเส้นที่เชื่อมจุดต่างๆในแผนภาพรงคภาวะ เส้นที่เชื่อมจุดสองจุดแสดงรงคภาวะของสติมูลส์ทั้งสอง ดังนั้นเส้นที่เชื่อมจาก 380 นาโนเมตรไปถึง 770 นาโนเมตรบอกรังคภาวะที่สามารถทำได้ โดยการผสมสีในช่วงแสงที่มองเห็นได้ นอกจากนี้พื้นที่ที่ถูกปิดล้อมด้วยเส้นทางเดินของสเปกตรัมและเส้นตรงสีม่วง (purple line) คือบริเวณทั้งหมดที่สามารถทำได้ด้วยไตรสติมูลส์สี ( $X, Y$  และ  $Z$ ) ส่วนจุด ( $x, y$ ) ในแผนภาพรงคภาวะที่อยู่นอกพื้นที่นี้จะไม่สามารถทำได้

#### 2.4.2 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานเสริม (Supplementary Standard Colorimetric Observer) ตาม CIE ปี 1964 [5, 6, 8]

ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานและระบบพิกัดที่แนะนำในปี 1931 ได้รับการยอมรับโดยนานาชาติอย่างแพร่หลาย จุด ( $x, y$ ) ในแผนภาพรงคภาวะใช้บอกความหมายของสีในงานวิจัยทางอุตสาหกรรม และใช้เป็นแผนที่ของรงคภาวะของสติมูลส์สีได้

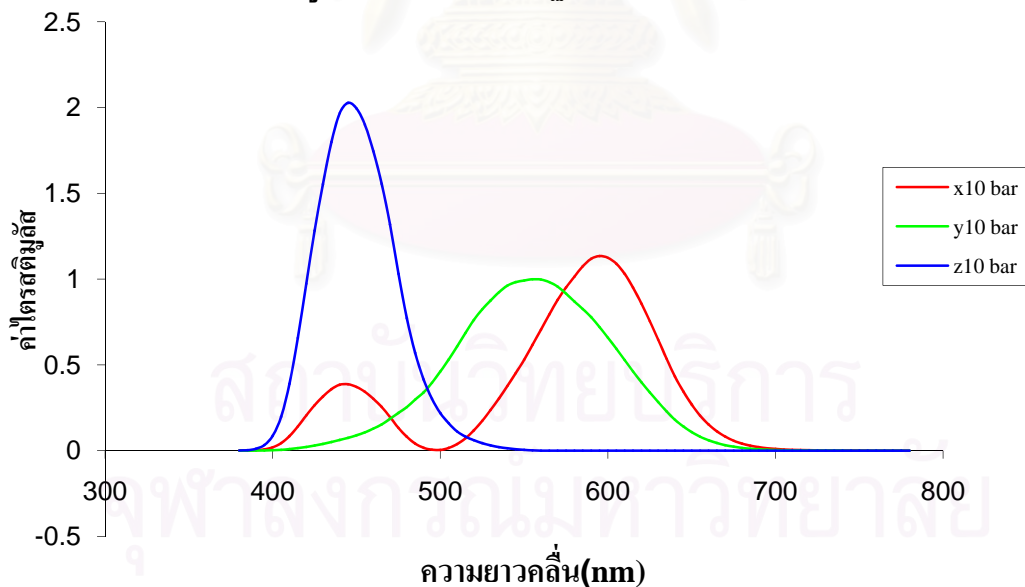
ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานและระบบพิกัดตาม CIE ปี 1931 ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ใช่เพราะได้พิสูจน์แล้วว่า เชื่อถือได้ทางสถิติสำหรับการมองเห็นสีโดยเฉลี่ย ไม่ใช่เพราะเชื่อว่าระบบนี้อยู่ระหว่างผู้สังเกตการณ์จริงกับการมองเห็นปกติ หลังจากผ่านมาหลายปีมีการเสนอแนะว่า ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตามระบบดังกล่าวล้มเหลวที่จะทำนายค่าไตรสติมูลส์สีที่

สังเกตโดยผู้สังเกตการณ์จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความยาวคลื่น 380 ถึง 460 นาโนเมตร ค่าของ  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  มีค่าต่ำเกินไป

หลังจากการศึกษารายละเอียดก็ได้ข้อสรุปคือ การตัดสินใจให้ยังคงผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931 ไว้ แต่มีการเสริมค่าฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  สำหรับการวัดที่ต้องการความแม่นยำในการเทียบสีของขอบเขตมุมมอง (angular subtense) ขนาดใหญ่ (มากกว่า 4 องศาที่ดวงตาของผู้สังเกตการณ์)

ค่าไตรสตีมูลัสเชิงสเปกตรัม  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานเสริมตาม CIE ปี 1964 แสดงในตารางที่ 2.6 และแสดงเป็นกราฟไว้ในรูปที่ 2.8 มีการทดลองการเทียบสีอย่างครอบคลุมโดย Stiles และ Burch [12] และ Speranskaya [13] ก่อนจะนำฟังก์ชันเทียบสีใหม่มาใช้ในปี 1964 การทดลองที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ เพื่อทดสอบทั้งฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  และฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  ถึงแม้ว่าผลของขอบเขตการทดลองนี้ยังไม่น่าพอใจทั้งหมด คณะกรรมการทางด้านการวัดสีของ CIE สรุปว่า สำหรับการวัดสีที่ขอบเขตมุมมองที่มีขนาดเล็ก (1 ถึง 4 องศา) ฟังก์ชันเทียบสีมาตรฐานตาม CIE ปี 1931 เพียงพอและไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันนี้ แต่สำหรับที่ขอบเขตมุมมองที่มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 4 องศา) ควรใช้ฟังก์ชัน  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$

### ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตาม CIE ปี 1964



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันเทียบสี XYZ ตาม CIE ปี 1964

ตารางที่ 2.6 ค่าสเปกตรัมของไตรสติมูลัสหรือฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$

ในช่วง 380 ถึง 780 นาโนเมตรที่ทุกๆ 5 นาโนเมตร ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน

เสริมตาม CIE ปี 1964

$\lambda(nm)$	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$	$\lambda(nm)$	$\bar{x}_{10}(\lambda)$	$\bar{y}_{10}(\lambda)$	$\bar{z}_{10}(\lambda)$
380	0.0002	0	0.0007	580	1.0142	0.8689	0
385	0.0007	0.0001	0.0029	585	1.0743	0.8256	0
390	0.0024	0.0003	0.0105	590	1.1185	0.7774	0
395	0.0072	0.0008	0.0323	595	1.1343	0.7204	0
400	0.0191	0.002	0.086	600	1.124	0.6583	0
405	0.0434	0.0045	0.1971	605	1.0891	0.5939	0
410	0.0847	0.0088	0.3894	610	1.0305	0.528	0
415	0.1406	0.0145	0.6568	615	0.9507	0.4618	0
420	0.2045	0.0214	0.9725	620	0.8563	0.3981	0
425	0.2647	0.0295	1.2825	625	0.7549	0.3396	0
430	0.3147	0.0387	1.5535	630	0.6475	0.2835	0
435	0.3577	0.0496	1.7985	635	0.5351	0.2283	0
440	0.3837	0.0621	1.9673	640	0.4316	0.1798	0
445	0.3867	0.0747	2.0273	645	0.3437	0.1402	0
450	0.3707	0.0895	1.9948	650	0.2683	0.1076	0
455	0.343	0.1063	1.9007	655	0.2043	0.0812	0
460	0.3023	0.1282	1.7454	660	0.1526	0.0603	0
465	0.2541	0.1528	1.5549	665	0.1122	0.0441	0
470	0.1956	0.1852	1.3176	670	0.0813	0.0318	0
475	0.1323	0.2199	1.0302	675	0.0579	0.0226	0
480	0.0805	0.2536	0.7721	680	0.0409	0.0159	0
485	0.0411	0.2977	0.5701	685	0.0286	0.0111	0
490	0.0162	0.3391	0.4153	690	0.0199	0.0077	0
495	0.0051	0.3954	0.3024	695	0.0138	0.0054	0
500	0.0038	0.4608	0.2185	700	0.0096	0.0037	0
505	0.0154	0.5314	0.1592	705	0.0066	0.0026	0
510	0.0375	0.6067	0.112	710	0.0046	0.0018	0
515	0.0714	0.6857	0.0822	715	0.0031	0.0012	0
520	0.1177	0.7618	0.0607	720	0.0022	0.0008	0
525	0.173	0.8233	0.0431	725	0.0015	0.0006	0
530	0.2365	0.8752	0.0305	730	0.001	0.0004	0
535	0.3042	0.9238	0.0206	735	0.0007	0.0003	0
540	0.3768	0.962	0.0137	740	0.0005	0.0002	0
545	0.4516	0.9822	0.0079	745	0.0004	0.0001	0
550	0.5298	0.9918	0.004	750	0.0003	0.0001	0
555	0.6161	0.9991	0.0011	755	0.0002	0.0001	0
560	0.7052	0.9973	0	760	0.0001	0	0
565	0.7938	0.9824	0	765	0.0001	0	0
570	0.8787	0.9556	0	770	0.0001	0	0
575	0.9512	0.9152	0	775	0	0	0
580	1.0142	0.8689	0	780	0	0	0

โคออร์ดิเนตของรงควัสดุ  $x_{10}(\lambda)$   $y_{10}(\lambda)$  และ  $z_{10}(\lambda)$  ของสเปกตรัมสีสามารถหาได้จากค่าไตรสติมูตัสเชิงสเปกตรัม  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  ดังสมการที่ 2.8 ก) - ค)

$$x_{10}(\lambda) = \frac{\bar{x}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)} \quad (2.8 \text{ ก)}$$

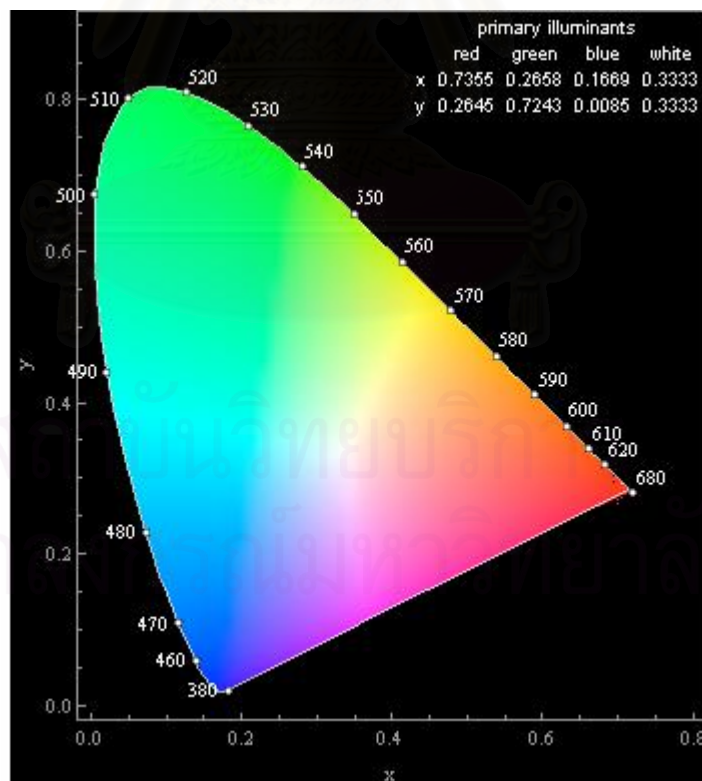
$$y_{10}(\lambda) = \frac{\bar{y}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)} \quad (2.8 \text{ ข)}$$

$$z_{10}(\lambda) = \frac{\bar{z}_{10}(\lambda)}{\bar{x}_{10}(\lambda) + \bar{y}_{10}(\lambda) + \bar{z}_{10}(\lambda)} \quad (2.8 \text{ ค)}$$

โดยที่  $x_{10}(\lambda) + y_{10}(\lambda) + z_{10}(\lambda) = 1$

ตารางที่ 2.7 ให้ค่า  $x_{10}(\lambda)$   $y_{10}(\lambda)$  และ  $z_{10}(\lambda)$  ที่คำนวณจากสมการ 2.8 ก) - ค) จากค่า  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  ในตารางที่ 2.6

แผนภาพรงควัสดุตาม CIE ปี 1964 ( $x_{10}, y_{10}$ ) แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งหาได้จากค่าไตรสติมูตัสของปริภูมิสี  $X_{10}$   $Y_{10}$  และ  $Z_{10}$  ด้วยกระบวนการเดียวกับกรณีของ CIE 1931 คุณสมบัติของแผนภาพรงควัสดุ ( $x_{10}, y_{10}$ ) ตาม CIE 1964 คล้ายกับแผนภาพของ CIE 1931 ยกเว้นการผสมแบบบวกของสเปกตรัมสีที่อ้างอิงขอบเขตการมองเห็นขนาดใหญ่ซึ่งมากกว่า 2 องศา



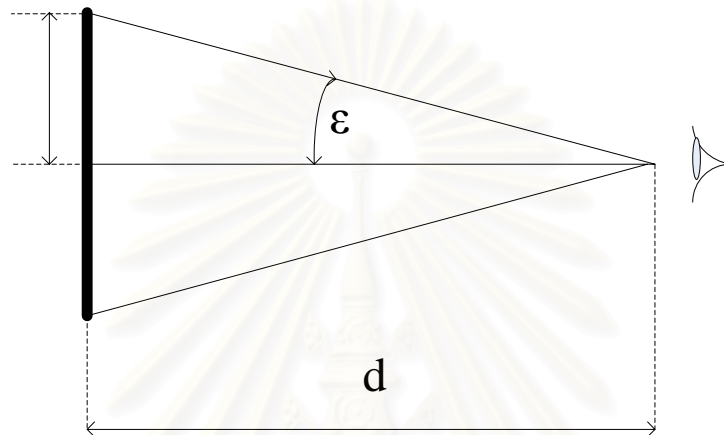
รูปที่ 2.9 แผนภาพรงควัสดุตาม CIE 1964 ( $x_{10}, y_{10}$ )

ตารางที่ 2.7 โคออร์ดิเนตของรงควัตถุของค่าไทรสตีมูลัสเชิงสเปกตรัมตาม CIE ปี 1964

$\lambda$ (nm)	Chromaticity coordinates			$\lambda$ (nm)	Chromaticity coordinates		
	$x_{10}(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$z_{10}(\lambda)$		$x_{10}(\lambda)$	$y_{10}(\lambda)$	$z_{10}(\lambda)$
380	0.1813	0.0197	0.799	580	0.5386	0.4614	0
385	0.1809	0.0195	0.7996	585	0.5654	0.4346	0
390	0.1803	0.0193	0.8003	590	0.59	0.41	0
395	0.1795	0.019	0.8015	595	0.6116	0.3884	0
400	0.1784	0.0187	0.8029	600	0.6306	0.3694	0
405	0.1771	0.0184	0.8045	605	0.6471	0.3529	0
410	0.1755	0.0181	0.8064	610	0.6612	0.3388	0
415	0.1732	0.0178	0.809	615	0.6731	0.3269	0
420	0.1706	0.0178	0.8115	620	0.6827	0.3173	0
425	0.1679	0.0187	0.8134	625	0.6898	0.3102	0
430	0.165	0.0203	0.8147	630	0.6955	0.3045	0
435	0.1622	0.0225	0.8153	635	0.701	0.299	0
440	0.159	0.0257	0.8153	640	0.7059	0.2941	0
445	0.1554	0.03	0.8146	645	0.7102	0.2898	0
450	0.151	0.0364	0.8126	650	0.7137	0.2863	0
455	0.1459	0.0452	0.8088	655	0.7156	0.2844	0
460	0.1389	0.0589	0.8022	660	0.7168	0.2832	0
465	0.1295	0.0779	0.7926	665	0.7179	0.2821	0
470	0.1152	0.109	0.7758	670	0.7187	0.2813	0
475	0.0957	0.1591	0.7452	675	0.7193	0.2807	0
480	0.0728	0.2292	0.698	680	0.7198	0.2802	0
485	0.0452	0.3273	0.6275	685	0.72	0.28	0
490	0.021	0.4401	0.5389	690	0.7202	0.2798	0
495	0.0073	0.5625	0.4302	695	0.7203	0.2797	0
500	0.0056	0.6745	0.3199	700	0.7204	0.2796	0
505	0.0219	0.7526	0.2255	705	0.7203	0.2797	0
510	0.0495	0.8023	0.1482	710	0.7202	0.2798	0
515	0.085	0.817	0.098	715	0.7201	0.2799	0
520	0.1252	0.8102	0.0646	720	0.7199	0.2801	0
525	0.1664	0.7922	0.0414	725	0.7197	0.2803	0
530	0.2071	0.7663	0.0267	730	0.7194	0.2806	0
535	0.2436	0.7399	0.0165	735	0.7192	0.2808	0
540	0.2786	0.7113	0.0101	740	0.7189	0.2811	0
545	0.3132	0.6813	0.0055	745	0.7186	0.2814	0
550	0.3473	0.6501	0.0026	750	0.7183	0.2817	0
555	0.3812	0.6182	0.0007	755	0.718	0.282	0
560	0.4142	0.5858	0	760	0.7176	0.2824	0
565	0.4469	0.5531	0	765	0.7172	0.2828	0
570	0.479	0.521	0	770	0.7169	0.2831	0
575	0.5096	0.4904	0	775	0.7165	0.2835	0
580	0.5386	0.4614	0	780	0.7161	0.2839	0

CIE แนะนำความจำเพาะในการวัดสีของสติมูลต์สี ตัวอย่างเช่น การกำหนดค่าไตรสติมูลต์ตาม CIE ปี 1931 ผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานอยู่ในรูปของฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  ในกรณีขอบเขตมุมมองอยู่ระหว่าง 1 ถึง 4 องศาที่ดวงตาของผู้สังเกตการณ์

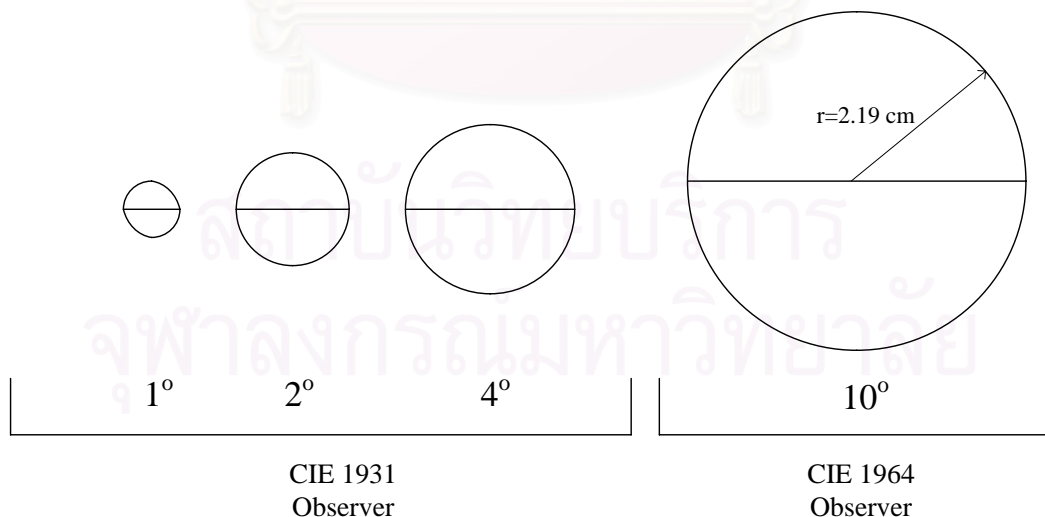
นอกจากนี้ CIE ยังแนะนำว่าเมื่อขอบเขตมุมมองมากกว่า 4 องศาที่ดวงตาของผู้สังเกตการณ์ให้ใช้ความจำเพาะในการวัดสีของสติมูลต์สีตามมาตรฐานเสริมของผู้สังเกตการณ์การวัดสีตาม CIE ปี 1964 ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชันเทียบสี  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของขอบเขตมุมมองกับค่าของระยะทางและขนาดของวัตถุ

ขอบเขตมุมมอง (Angular subtense) =  $2\varepsilon = 2\arctan(r/d)$  [6] เช่น ตัวอย่างรูปที่

2.11 สำหรับ  $d = 25$  เซนติเมตร และ  $2\varepsilon = 10^\circ$  จะได้  $r = 2.19$  เซนติเมตร



รูปที่ 2.11 ขอบเขตมุมมองที่ระยะห่างประมาณ 25 เซนติเมตร โดยทำมุมกับดวงตาของผู้สังเกตการณ์ที่ 1, 2, 4 และ 10 องศาตามลำดับ

รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของขอบเขตมุมมองกับค่าของระยะทางและขนาดของวัตถุ ส่วนรูปที่ 2.11 แสดงขอบเขตมุมมองที่มุมต่างๆ ได้แก่มุม 1, 2 และ 4 สำหรับผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตาม CIE 1931 และคิดว่าฟังก์ชัน  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  เป็นการเทียบสีที่ทำในขอบเขต 2 องศา ส่วนที่ขอบเขตขนาดใหญ่คือขอบเขต 10 องศา ใช้ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานเสริมตาม CIE ปี 1964 ดังนั้น ฟังก์ชัน  $\bar{x}_{10}(\lambda)$   $\bar{y}_{10}(\lambda)$  และ  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  เป็นการเทียบสีที่ทำในขอบเขต 10 องศา



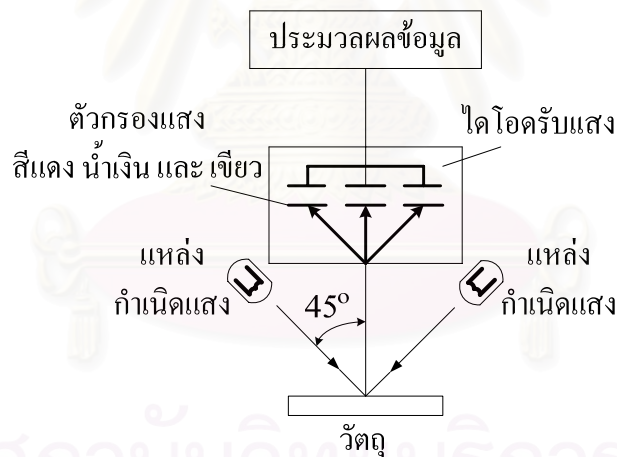
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 เครื่องวัดสี

เครื่องวัดสีทำหน้าที่ประเมินค่าสีที่ถูกวัดให้เป็นค่าที่เข้าใจ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ได้แก่ คัลเลอร์มิเตอร์ และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [6, 8, 14]

#### 3.1 คัลเลอร์มิเตอร์ (Colorimeter) [6, 8, 14]

คัลเลอร์มิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดสีที่ง่ายที่สุด คล้ายกับดวงตา ประกอบด้วยตัวรับแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน และวัดปริมาณของแต่ละสี แหล่งกำเนิดแสงจะฉายแสงที่มุม 45 องศา และตัวรับแสงจะรับที่มุมตั้งฉากกับสารที่วัด โดยตัวรับแสงประกอบด้วย ตัวกรองแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน และ ไดโอดรับแสง คัลเลอร์มิเตอร์มีองค์ประกอบดังรูปที่ 3.1 เป็นเครื่องมือวัดสีที่มีราคาถูกและเหมาะกับการวัดความแตกต่างของสีในกรณีที่เน้นเชิงปริมาณ เนื่องจากมีข้อจำกัดมากในด้านความแม่นยำ เพราะทั้งแหล่งกำเนิดแสง ตัวกรองแสง และตัวรับแสงจะต้องวัดเทียบกับมาตรฐาน CIE ทำให้ค่าที่วัดได้จะถูกต้องเฉพาะแค่กับอุปกรณ์นั้นๆ ถ้าเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์ก็จะทำให้ค่าที่วัดได้เปลี่ยนไปด้วย คัลเลอร์มิเตอร์หลักๆแบ่งเป็น 3 ประเภท



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเบื้องต้นของคัลเลอร์มิเตอร์

#### 3.1.1 คัลเลอร์มิเตอร์แบบบวก (Additive Colorimeters)

คัลเลอร์มิเตอร์แบบบวกเป็นเครื่องมือที่ใช้เทียบสีและวัด โดยใช้การผสมแบบบวก (additive mixture) ของสติมูลัสสี เครื่องมือเหล่านี้ออกแบบโดย Guild ดังในรูปที่ 3.2 ต่อมาที่ ถูกพัฒนาโดย Stiles คัลเลอร์มิเตอร์แบบบวกมีใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม และในภายหลัง ได้ถูกพัฒนาโดย Donaldson ดังรูปที่ 3.3 ขณะที่เครื่องมือของ Guild ตัวกรองสี (color filter) ใช้เพื่อเลือกการกระจายแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ขณะที่ปริมาณของแสงในแต่ละตัวกรองแสง ถูกควบคุมโดยปรับขนาดของพื้นที่ของตัวกรองสีซึ่งแสงสามารถผ่านได้ อย่างไรก็ตาม



วิธีการผสมต่างกันมาก เพราะคัลเลอริมิเตอร์แบบ Guild ผสมสีที่ออกจากตัวกรองด้วยการหมุน ปริซึมอย่างรวดเร็ว แต่คัลเลอริมิเตอร์แบบ Donaldson ใช้อินดิเกรตติ้งสเฟียร์เป็นตัวผสมสีดังนี้ เริ่มแรก หลังจากแสงจากแหล่งกำเนิดแสง S ผ่านตัวกรองสีจะถูกโฟกัสโดยเลนส์ L (Double condenser) ไปบนหน้าต่าง (W) ของอินดิเกรตติ้งสเฟียร์ ดังนั้นภาพเล็กๆที่ W ประกอบด้วย 3 สีที่แตกต่างกัน รวมกันที่ W แต่ภายในอินดิเกรตติ้งสเฟียร์ ทั้ง 3 ลำแสงได้สะท้อนแบบกระจายแสงไปมาภายใน นั้น ทำให้ได้สีที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันที่หน้าต่างที่สอง (F) ซึ่งเป็นทางที่แสงออกจากอินดิเกรตติ้ง สเฟียร์ และหักเหไปสู่ปริซึมรับแสงเพื่อการสังเกตการณ์

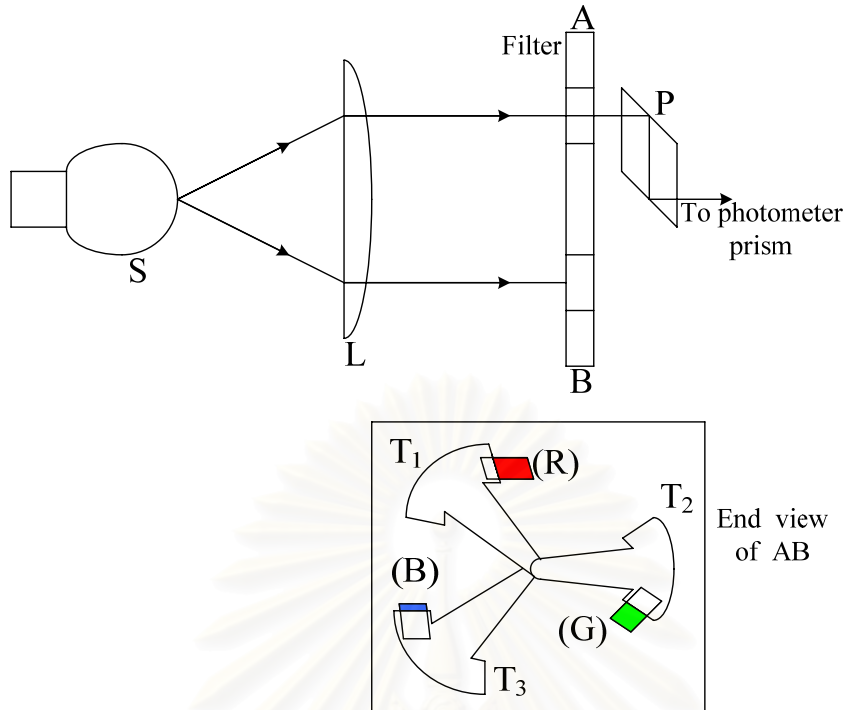
ปริมาณของแสงทั้ง 3 สีที่ผ่านเข้าไปที่ปริซึมรับแสง เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของตัวกรอง R G และ B และถูกปรับลดเพิ่มด้วยชุดเตอร์  $T_1$   $T_2$  และ  $T_3$  ตัวกรองสีที่เลือกใช้เพื่อความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อการวัดสี โดยทั่วไปมักใช้ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่อิ่มตัว (saturated red green and blue)

อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่ใช้สติมูลัสสี 3 สีมีข้อจำกัดที่ความแม่นยำ และมีการเปลี่ยนแปลง มากตามผู้สังเกตการณ์ Ives [15] แนะนำว่า สำหรับวัตถุประสงค์พิเศษเช่น การเทียบสีที่ใกล้เคียงสี ขาว โดยทั่วไปแล้วสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินสามารถทำได้โดยใช้สติมูลัสสีที่ไม่อิ่มตัว

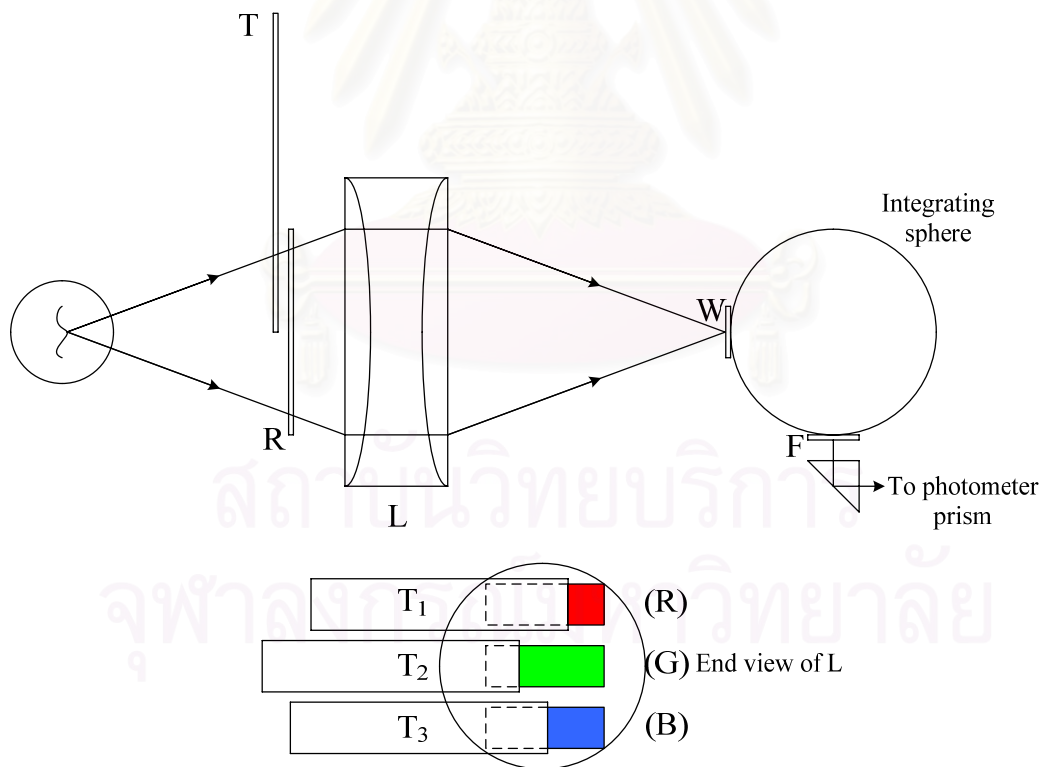
(desaturated stimuli) ซึ่งเปรียบเทียบตำแหน่งในแผนภาพรงควาสจะอยู่ใกล้กันมาก ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะแก้ปัญหาได้ แต่ก็เท่ากับว่า จำกัดขอบเขตของการวัด โดยใช้เครื่องมือชนิดนี้ แต่ยังมี ทางเลือกที่จะแก้ปัญหาคำวิธีอื่นๆ Donaldson แนะนำเครื่องมือที่ใช้สติมูลัสสี 6 สีด้วยหลักการ เดียวกัน แต่ใช้ 6 ตัวกรองสี ได้แก่ สีแดง สีส้ม สีเหลืองเขียว สีเขียว สีน้ำเงินเขียว และสีน้ำเงิน ไว้ หน้าเลนส์ L พร้อมด้วย 6 ชุดเตอร์ และสามารถควบคุมพื้นที่ของตัวกรองสีที่รับแสง

มีสองประโยชน์ที่สำคัญคือ จุด macula (macula spot) ในดวงตา ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการ กระตุ้นที่มากเกินไปจากสีน้ำเงิน จะไม่ถูกรบกวน และลดปัญหาการเทียบสีของผู้สังเกตการณ์ อย่างมาก เนื่องจากการผสมผสานกันของสติมูลัสสีเชิงสเปกตรัมที่คล้ายกันมากกว่า ทำให้ผู้ สังเกตการณ์เห็นสีใกล้เคียงมากกว่าเดิม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ระบบการผสมสีของคัลเลอริมิเตอร์แบบ Guild



รูปที่ 3.3 ระบบการผสมสีของคัลเลอริมิเตอร์แบบ Donaldson

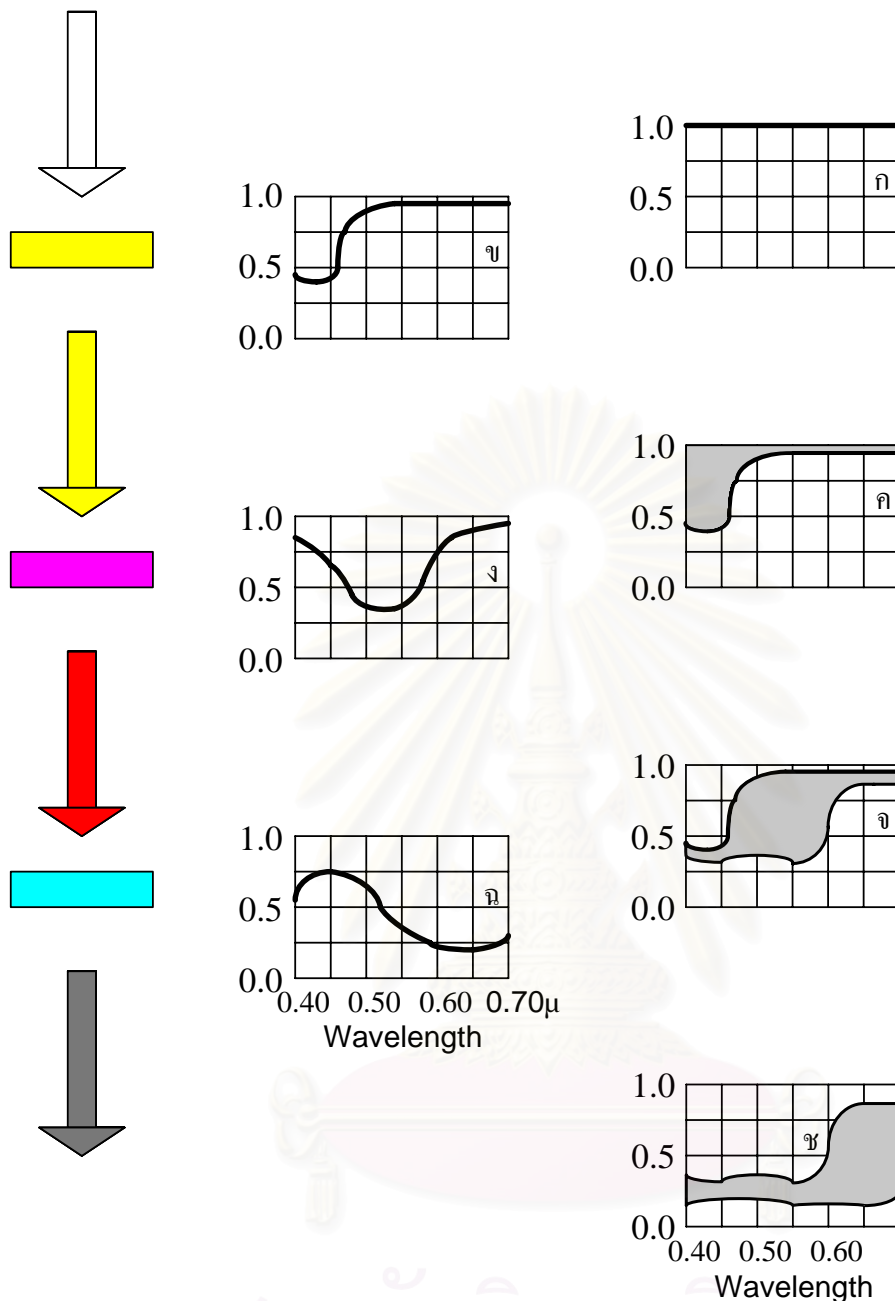
### 3.1.2 คัลเลอร์มิเตอร์แบบลบ (Subtractive Colorimeters)

คัลเลอร์มิเตอร์ที่ใช้หลักการของการลบ ทำงานโดยการดูดกลืนหรือลบแสงจากลำแสงขาว ตอนเริ่มตัวอย่างเครื่องมือชุดแรกๆ ที่เห็นได้ชัดคือ Lovibond Tintometer ซึ่งประกอบด้วยชุดแผ่นแก้วสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ทำให้ได้สีหลักแบบลบ (subtractive primaries) สิ่งที่น่าสนใจคือยังทำงานโดยใช้ 3 ตัวแปร เหมือนกับคัลเลอร์มิเตอร์แบบบวกที่ใช้ 3 สติมูลัสสี

ในระบบ Lovibond-Schofield เครื่องมือได้ถูกดัดแปลงให้การอ่านค่าของ Tintometer ในรูปแบบซึ่งสามารถแปลงเทียบเป็น CIE ได้ การใช้แผ่นแก้วมาซ้อนกันมีเหมือนใน Tintometer ทั่วไป แต่จะไม่ซ้อนกันเกิน 2 อันต่อครั้งเมื่อทำการวัดสี ดังนั้นการวัดวัตถุสีเขียวก็ใช้แผ่นแก้วสีเหลืองซ้อนกับแผ่นแก้วสีน้ำเงิน และสำหรับวัตถุสีส้มก็ใช้แผ่นแก้วสีแดงและสีเหลือง เป็นต้น การใช้ 2 แผ่นซ้อนกันทำให้วัตถุถูกเทียบสีทั้งเฉดสีและความอิ่มตัวของสี ขณะที่ความสว่างถูกเทียบจากแสงทั้งสองฝั่ง (ทางเข้าและทางออก) ซึ่งใช้ใบพัดควบคุมการฉายแสง

ส่วนในกรณีคัลเลอร์มิเตอร์แบบลบใช้สีม่วงแดง (magenta) สีเหลือง และสีน้ำเงินเขียว (cyan) สามารถเข้าใจหลักการได้จากรูปที่ 3.4 โดยสมมติว่า ตอนเริ่มต้นลำแสงขาวที่ตกกระทบมีค่าพลังงานกระจายเท่ากันทั้งสเปกตรัมดังเส้นโค้ง 3.4ก สมมติให้แสงผ่านตัวกรองสีเหลืองซึ่งมีการส่งผ่านดังเส้นโค้ง 3.4ข และได้ค่าพลังงานกระจายดังเส้นโค้ง 3.4ค ที่ได้มาจากการคูณกันของเส้นโค้ง 3.4ก และ 3.4ข พื้นที่ซึ่งแรเงาเหนือเส้นโค้ง 3.4ค แทนค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนด้วยตัวกรองสีเหลือง ลำแสงสีเหลืองแสดงโดยลูกศรซึ่งตกกระทบที่ตัวกรองสีม่วงแดง ซึ่งมีค่าการส่งผ่านดังเส้นโค้ง 3.4ง ค่าพลังงานกระจายดังเส้นโค้ง 3.4จ ได้มาจากเส้นโค้ง 3.4ค คูณกับ 3.4ง ปรากฏว่าขณะนี้ได้แสงสีแดง และพื้นที่แรเงาบนเส้นโค้ง 3.4จ คือพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกรองสีม่วงแดง จากตัวอย่างจะมีส่วนของแสงสีเขียวเป็นส่วนใหญ่ สุดท้ายเมื่อแสงกระทบตัวกรองสีน้ำเงินเขียว โดยตัวกรองแบบนี้จะดูดกลืนสีแดง ซึ่งทำให้ได้สีเทาดังเส้นโค้ง 3.4ซ ที่ได้มาจากการคูณระหว่างเส้นโค้ง 3.4จ และ 3.4ฉ ขณะที่บริเวณแรเงาข้างบนเส้นโค้ง 3.4ซ แทนค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนด้วยตัวกรองนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

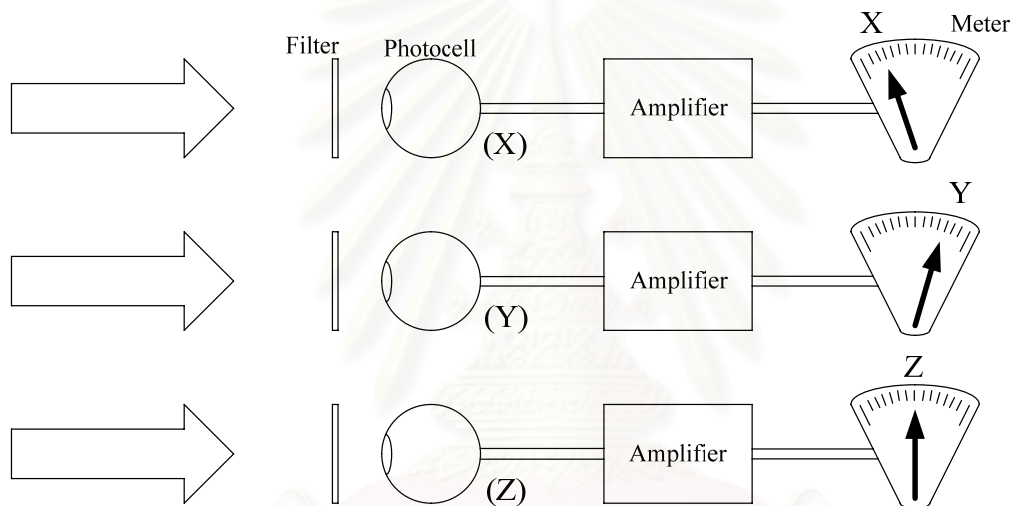


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการทำงานของคัลเลอร์มิเตอร์แบบลบ

### 3.1.3 คัลเลอร์มิเตอร์แบบใช้เซลล์รับแสง (Photoelectric Colorimeter)

คัลเลอร์มิเตอร์แบบใช้เซลล์รับแสงมีหลักการการทำงานที่ง่ายมาก โดยใช้เซลล์รับแสง 3 ตัว (X) (Y) และ (Z) ดังรูปที่ 3.5 ร่วมกับเส้นโค้งสเปกตรัมของความไวแสง (spectral sensitivity) ซึ่งคล้ายกับเส้นโค้งการกระจายพลังงานของ  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  กระแส (photo current) ที่ได้จากเซลล์รับแสง ซึ่งเกี่ยวข้องกับกันอย่างเชิงเส้นกับแสงที่เข้ามาที่เซลล์รับแสงทั้งสาม จะต้องถูกขยายและวัด เพื่อจะอ่านค่า X Y และ Z

ลักษณะเฉพาะของระบบนี้ ซึ่งสามารถพิสูจน์ว่าจะทำให้เป็นจริงได้ยากมากคือ การพัฒนาของ เซลล์รับแสงที่มีค่าสเปกตรัมที่แม่นยำ เซลล์รับแสงนี้มีทั้งเซลล์แบบปล่อยอิเล็กตรอน(photo-emissive) และเซลล์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic cell) ซึ่งไม่อาจให้ผลตอบสนองสเปกตรัมตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตาม การวางตัวกรองสีหน้าแต่ละเซลล์รับแสงในรูปที่ 3.5 ทำให้ค่าการตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแต่ละเซลล์กับตัวกรอง จำนวนมาจากการคูณการตอบสนองของแต่ละเซลล์กับการส่งผ่านของตัวกรอง การมีตัวกรองจะเพิ่มโอกาสได้การตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ต้องการ แต่ค่าการดูดกลืนของตัวกรองขึ้นกับระบบการสั้นที่ซับซ้อนภายใน โมเลกุลของวัสดุที่ดูดกลืน นักเคมีต้องประสบกับปัญหาที่ยุ่งยากในการผลิตตัวกรองที่มีค่าการดูดกลืนตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องคาดหวังว่าทั้งเซลล์รับแสงและตัวกรองที่รวมกันนั้น จะให้เพียงค่าประมาณของการตอบสนองเชิงสเปกตรัม  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$



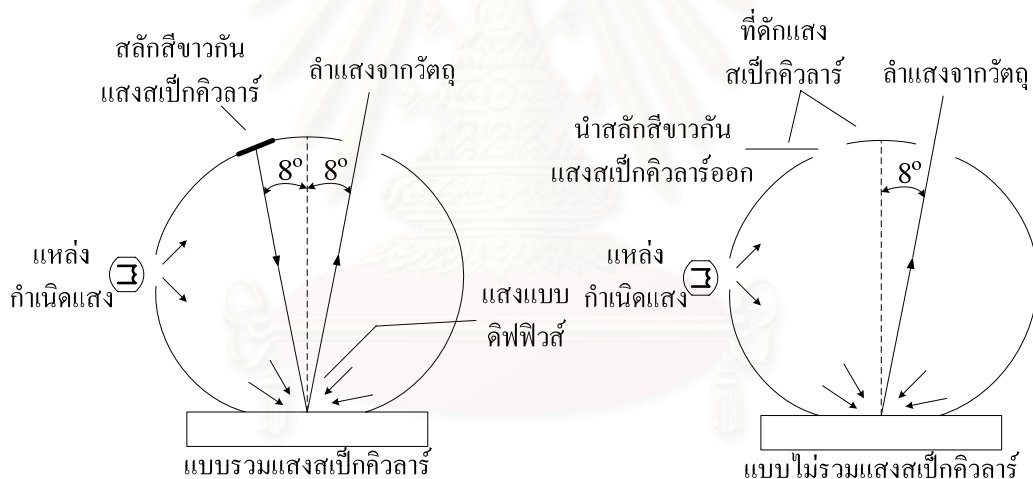
รูปที่ 3.5 หลักการของคัลเลอร์มิเตอร์แบบใช้เซลล์รับแสง 3 เซลล์

### 3.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) [6, 8, 15]

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดสีที่วัดอัตราส่วนของแสงสะท้อนต่อแสงตกกระทบ ที่ความยาวคลื่นที่มองเห็นได้หลายๆค่า โดยแสงที่สะท้อนจากสารที่วัดจะผ่านเข้าไปที่ตัววิเคราะห์สเปกตรัม ซึ่งจะเป็นตัวแยกแสงในช่วงที่มองเห็นได้ออกเป็นหลายๆแถบแสง ทำให้ตัวรับแสงสามารถทำการวัดได้หลายๆแถบแสง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์จึงเหมาะกับการเปรียบเทียบและคาดเดา สี สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ [16]

### 3.2.1 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์ (Integrating Sphere Spectrophotometer)

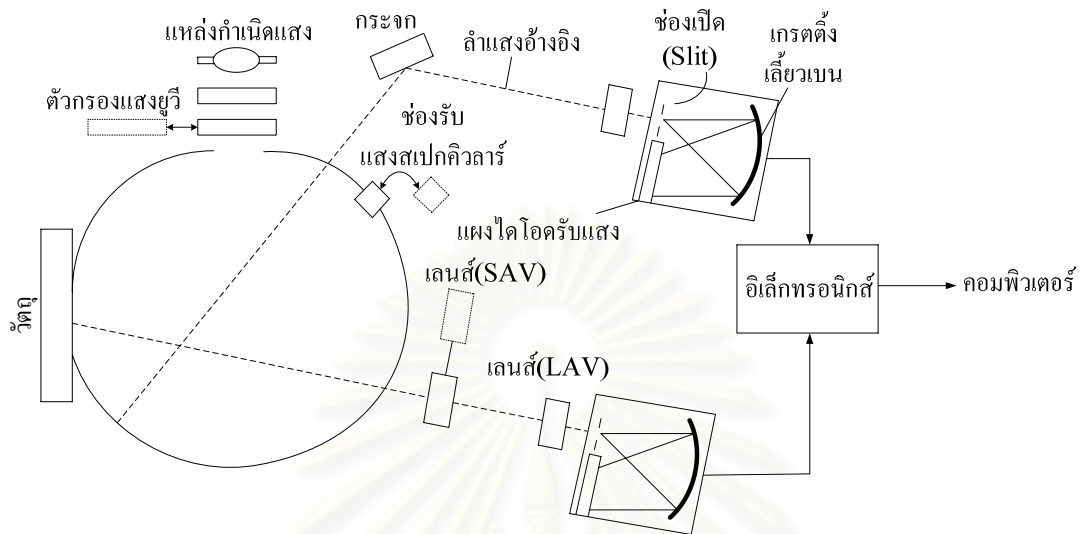
มีการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์มายาวนาน โดยส่วนมากมีความสามารถที่จะรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก (specular included) และไม่รวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก (specular excluded) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยในรูปแสดงอินทิเกรตติ้งสเฟียร์แบบ D/8 ซึ่งได้รับความนิยมมากกว่า D/0 เพราะสามารถแยกและรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้ตามมาตรฐาน CIE ช่องรับแสงจะต้องไม่เกิน  $10^\circ$  จากแนวตั้งฉากกับผิววัตถุตั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ภาพด้านซ้ายเป็นกรณีที่รวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกในการวัดเข้าไปด้วย ซึ่งทำได้โดยการใช้สลักสีขาว (White specular plug) ปิดช่องรับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกที่  $8^\circ$  ส่วนในรูปขวามือจะเห็นว่า เมื่อนำสลักออกแล้วเราก็สามารถรับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้โดยใช้ที่ดักแสง (specular trap) ส่วนค่าที่วัดได้ที่ช่องรับแสงเป็นค่าแสงสะท้อนแบบกระจายแสง ซึ่งไม่ได้รวมค่าของแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกไว้ ซึ่งจะมีข้อดีกว่าสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 หรือ 45/0 เนื่องจากการวัดพื้นผิวแบบขรุขระ โดยใช้อินทิเกรตติ้งสเฟียร์จะมีข้อผิดพลาดน้อยกว่า เพราะสามารถแยกและรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้



รูปที่ 3.6 การทำงานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์แบบ D/8

ทั้งนี้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบอินทิเกรตติ้งสเฟียร์โดยทั่วไป จะรับแสงเพียงลำแสงเดียว (Single-beam) มีข้อผิดพลาดมาก ในกรณีที่เกิดการแปรปรวนของแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าว จึงได้สร้างสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 2 ลำแสง (Dual-beam spectrophotometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งจะมีอีกลำแสงเพื่อเป็นตัวอ้างอิง โดยใช้ในการเปรียบเทียบกันระหว่างลำแสงจากวัตถุกับลำแสงอ้างอิง ทำให้ลดผลของข้อผิดพลาดต่างๆ ที่กล่าวมาได้อย่างมาก โดยลำแสงที่สะท้อนออกจากอินทิเกรตติ้งสเฟียร์จะผ่านเลนส์เพื่อรวมแสง จากนั้นผ่านไปช่องเปิด (slit) แล้วไปแยกแสงเป็นแถบสเปกตรัม

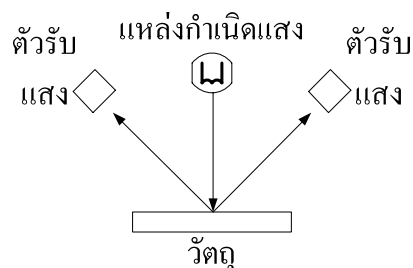
ด้วยเกรตติงเลี้ยวเบน ซึ่งจะวัดค่าที่ได้โดยใช้แผงไดโอดรับแสง (photodiode array) จากนั้นก็นำแสงที่ได้ทั้งส่วนที่สะท้อนจากวัตถุและแสงอ้างอิง นำมาเปรียบเทียบกันในระบบประมวลผลอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.7 โครงสร้างพื้นฐานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 2 ลำแสง (Dual-beam spectrophotometer)

### 3.2.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 (หรือ 45/0)

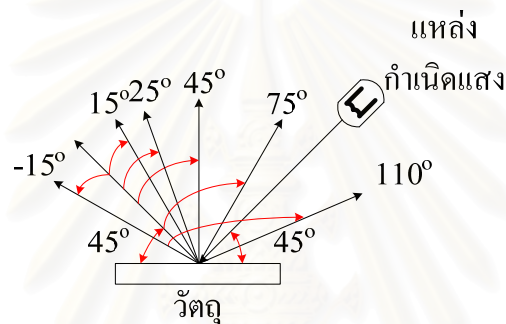
ไม่มีเครื่องมือวัดสีชนิดไหนจะเห็นสีเหมือนตามนุษย์ใกล้เคียงกว่าสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบนี้ ก็เพราะลักษณะการมองของคนนั้นจะเป็นลักษณะที่ไม่รับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก ซึ่งก็ตรงกับหลักการทำงานของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 คือจะวัดได้ดีเฉพาะแสงสะท้อนแบบกระจายแสง ตัวอย่างเช่น ถ้ามองภาพที่มันวาวในนิตยสาร ตาของมนุษย์จะปรับสภาพไม่ให้รับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกเข้าที่ตา ดังนั้นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดนี้จึงสามารถวัดสภาพเหมือนที่มนุษย์เห็นได้ แต่ก็ไม่สามารถทำงานได้ดีพอ เพราะตามนุษย์เรานั้นไม่สามารถแยกแยะสีได้ดีพอ ดังนั้นเครื่องมือชนิดนี้ไม่เหมาะกับวัตถุผิวขรุขระและผิวมันวาว จะเหมาะสมเพียงกับวัตถุผิวด้านเท่านั้น รูปที่ 3.8 แสดงการทำงานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45 โดยฉายแสงที่มุมตั้งฉากกับผิววัตถุและรับแสงที่มุม  $45^\circ$



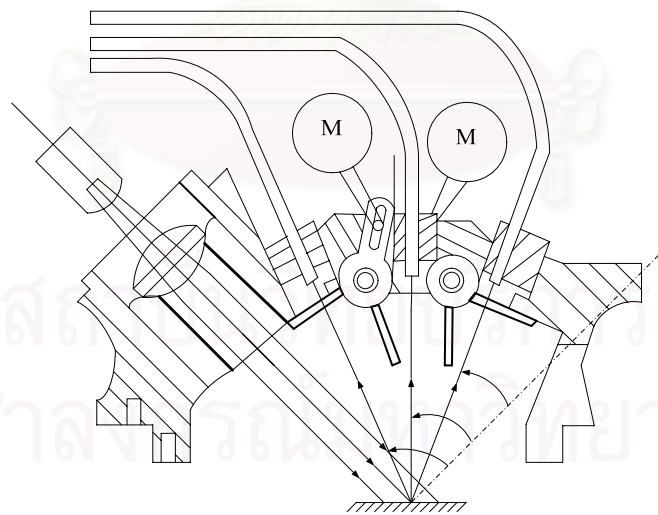
รูปที่ 3.8 การทำงานของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบ 0/45

### 3.2.3 มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Multi-angle Spectrophotometer) [1, 2, 17, 18]

มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มีจุดเด่นคือสามารถวัดได้หลายมุม นิยมแพร่หลายในการวัดสีรถยนต์หรือสีที่มีความมันวาว เนื่องจากว่าสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดนี้สามารถรับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้หลายมุม โดยมุมที่ใช้จะเป็นมุมมาตรฐานที่มุมอะสเปกคิวลาร์ (aspecular angle)  $+15^\circ$  และ  $-15^\circ$  สำหรับการวัดมุมแทรกสอด (interference angle) ส่วนมุมอะสเปกคิวลาร์ที่  $+25^\circ$   $+45^\circ$   $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$  สำหรับการวัดมุมเมทัลลิก (metallic angle) ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งแสดงการทำงานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีมุมฉายแสงเพียงมุมเดียวที่  $45^\circ$  โดยทั่วไป เครื่องมือแบบนี้มีในยุคต้นๆของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เนื่องจากวัดได้เพียงมุมเมทัลลิก แต่ในยุคต่อมาได้มีการพัฒนาให้ฉายแสงได้หลายมุม เพื่อสามารถวัดมุมแทรกสอดได้ด้วย



รูปที่ 3.9 การทำงานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



รูปที่ 3.10 โครงสร้างพื้นฐานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบหนึ่งมุมฉายแสง

รูปที่ 3.10 [18] แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$  และ  $+75^\circ$  จากรูปจะเห็นว่ามี M คือ



มอเตอร์คอยสั่งงานให้ชัตเตอร์ปิดและเปิด โดยแสงที่ผ่านชัตเตอร์ไปนั้นจะเข้าสู่เส้นใยนำแสง (optical fiber) และเข้าสู่ชุดแยกแสงต่อไปเหมือนกับกรณีของ รูปที่ 3.7



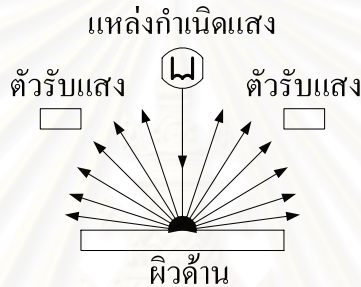
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4 ชนิดของพื้นผิว

พื้นผิวมีอิทธิพลต่อการสะท้อนแสงอย่างมาก จึงควรทำความเข้าใจเกี่ยวกับธรรมชาติของพื้นผิวชนิดต่างๆ พื้นผิวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ [17]

### 4.1 ผิวด้าน (Matte surface)

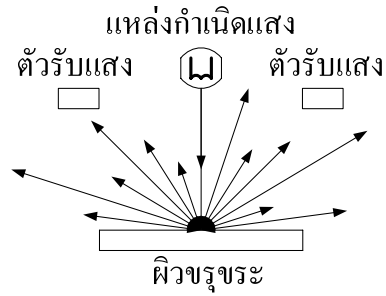
ผิวด้านเป็นลักษณะพื้นผิวที่ให้แสงสะท้อนแบบกระจายแสง การวัดแสงสะท้อนจากพื้นผิวนี้ใช้ได้ทั้งแบบ  $0/45$   $45/0$   $0/D$  และ  $D/0$  เนื่องจากแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวนี้กระจายตัวเท่าๆกันทุกทิศทางดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวด้าน

### 4.2 ผิวขรุขระ (Textured or irregular surface)

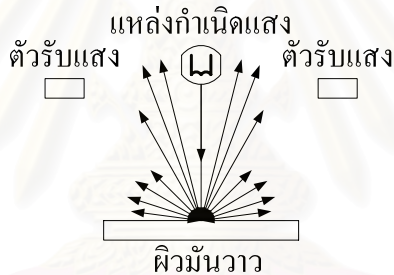
แสงที่สะท้อนจากพื้นผิวชนิดนี้จะแปรผันอย่างมากตามมุมที่ต่างกัน โดยแสงที่วัดได้จะเป็นทั้งแสงที่สะท้อนแบบเสมือนกระจกและแบบกระจายแสง โดยค่าส่วนมากจะเป็นการสะท้อนแบบกระจายแสงดังรูปที่ 4.2 ดังนั้น การวัดที่เหมาะสมมี 2 กรณีคือ กรณีแรกใช้อินติเกรตติ้งสเฟียร์แบบ  $D/0$  หรือ  $0/D$  ซึ่งจะช่วยลดข้อผิดพลาดของกรณี  $0/45$  หรือ  $45/0$  เนื่องจากความสูญเสียในมุมอื่นๆ นอกจากนั้น อินติเกรตติ้งสเฟียร์ยังสามารถวัดแสงสะท้อนแบบกระจายแสงได้ ทั้งกรณีที่รวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก และกรณีที่ไม่วรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก กรณีถัดมาใช้มัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโพลิมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดได้หลายมุม ทำให้สามารถบอกถึงลักษณะเฉพาะทางแสงได้ โดยทั้ง 2 กรณีแทบจะไม่ต่างกันมาก เนื่องจากพื้นผิวขรุขระหรือเป็นคลื่นนั้น แสงสะท้อนส่วนมากจะเป็นแสงสะท้อนแบบกระจายแสง เพราะฉะนั้น อินติเกรตติ้งสเฟียร์สามารถแยกลักษณะเฉพาะของพื้นผิวชนิดนี้ได้



รูปที่ 4.2 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวขรุขระ

### 4.3 ผิวมันวาว (High gloss surface)

แสงที่สะท้อนจากผิวที่มีความมันวาวสูง ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกระจก (mirror-like) ส่วนใหญ่จะสะท้อนที่มุมเสมือนกระจกหรือมุมใกล้เคียง ถ้าวัดแสงที่ได้จากพื้นผิวชนิดนี้โดยใช้แบบ 0/45 หรือ 45/0 จะพบว่าไม่สามารถวัดค่าที่มุมอื่นๆ ได้ และถ้าวัดด้วยอินทิเกรตติ้งสเฟียร์ พบว่าจะมีความแตกต่างอย่างมาก ระหว่างกรณีที่รวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก และกรณีที่ไม่รวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก อีกทั้งยังไม่สามารถวัดแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกในมุมต่างๆ ได้



รูปที่ 4.3 ลักษณะการสะท้อนของแสงจากวัตถุผิวมันวาว

ดังนั้น จากที่กล่าวมาข้างต้นสำหรับสปีรอนต์ในปัจจุบันที่ผสมทั้งเม็ดสีโลหะและเม็ดสีแบบแทรกสอดเข้าไปด้วยนั้น เม็ดสีโลหะมีคุณสมบัติคล้ายกับกระจกทึบ และส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเฉพาะความสว่างเมื่อเปลี่ยนมุมมอง โดยสำหรับรถยนต์แล้ว ส่วนมากมักใช้เม็ดสีออลูมิเนียม เนื่องจากมีคุณสมบัติการสะท้อนที่เด่นที่สุด เหมาะกับสปีรอนต์ในปัจจุบันที่ต้องการให้คุณสมบัติของสีเปลี่ยนเมื่อเปลี่ยนมุมมอง ดังนั้น จึงต้องมีตัวรับแสงหลายมุมมอง โดยมุมมาตรฐานที่สถาบันวิจัยในเยอรมัน (Deutsches Institut für Normung e. V.) และในอเมริกา (ASTM International) ได้กำหนดขึ้นมาคือ มุมอะสเปกคิวลาร์ที่  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$

สำหรับเม็ดสีแบบแทรกสอดนั้น โครงสร้างของเม็ดสีแบบแทรกสอดซึ่งประกอบด้วยชั้นบางๆ ของสารออกไซด์เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{Ti}_2\text{O}$ ) ที่มีค่าดัชนีหักเหสูง โดยแสงสามารถส่งผ่านได้บางส่วน (Semitransparent) อยู่ชั้นนอก ส่วนสารชั้นในกรณีที่ยกมาเป็นตัวอย่าง จะเป็นสารไมกา (mica) ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงต่ำกว่า และแสงสามารถส่งผ่านได้หมด ดังนั้นการ

แทรกสอดของแสงจะเกิดขึ้นระหว่างแสงที่สะท้อนจากผิวของออกไซด์ กับแสงที่สะท้อนจากรอยต่อของออกไซด์กับไมกา เนื่องจากการสะท้อนกลับหมดของแสงในบางมุมจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำ และพบว่าระยะทางที่แสงเดินทางก็จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดการแทรกสอด ความยาวคลื่นของแสงที่สะท้อนโดยเม็ดสีแบบนี้ จะขึ้นอยู่กับความหนาของเม็ดสีและระยะทางที่แสงเดินทาง ถ้าแสงส่วนที่สะท้อนจะวัดได้ที่ใหญ่กว่ามุมที่แสงสะท้อนแบบเสมือนกระจก โดยมุมมาตรฐานคือมุมอะสปেকคิวลาร์  $+15^\circ$  และ  $-15^\circ$  เมื่อเปลี่ยนมุมที่ฉายแสง ระยะทางที่แสงเดินทางจะเปลี่ยน โดยมุมฉายแสงมาตรฐานคือมุม  $25^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $75^\circ$  เมื่อใช้เม็ดสีชนิดนี้ ค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนอย่างเด่นชัดทั้งค่ารงค์และเฉดสี (chroma and hue)

ดังนั้น เมื่อรวมเม็ดสีทั้งสองชนิดเข้ากับสีต่างๆไปแล้ว การวัดสีเพื่อเปรียบเทียบและเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ จึงได้ใช้เครื่องมือเองเกิดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ระบบสีมาตรฐานของ CIE

#### 5.1 ระบบการจัดอันดับสีและปริภูมิสี (Color-order Systems และ Color Spaces) [8]

การอธิบายเกี่ยวกับสีต้องอิงอยู่บน โครงสร้างที่มีตรรกะ (Logical framework) ซึ่งทำให้ ความสัมพันธ์ของสีแสดงออกอย่างไม่คลุมเครือ โครงสร้างที่มีตรรกะนี้ก็คือระบบการจัดอันดับ สี ซึ่งช่วยในการสื่อสารการรับรู้สี

คณะกรรมการทางเทคนิคขององค์การมาตรฐานระหว่างชาติ (International Organization for Standardization, ISO) ได้กำหนดระบบการจัดอันดับสีเป็นกลุ่มของหลักการ สำหรับการจัดอันดับและสัญลักษณ์ของสีที่สอดคล้องกับมาตราส่วนที่กำหนด

จุดประสงค์ของระบบการจัดอันดับสีคือ เพื่อกำหนดจำนวนของคุณลักษณะที่ต้องพิจารณา โดยแต่ละคุณลักษณะจะกำหนด 1 มิติของระบบ เช่น ระบบ 1 มิติอาจเพียงพอต่อการออกแบบใน ระบบของแสง ซึ่งบางครั้งเพียงพอที่จะพิจารณาแค่คุณลักษณะเดียวของตัวประกอบการส่องสว่าง ตาม CIE ปี 1924 (CIE luminance factor, Y) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการสะท้อนทั้งหมดของแต่ละ พื้นผิวภายในปริมาณแสงที่ฉาย ส่วนปริภูมิสีคือการแสดงทางเรขาคณิตของสีใน 3 มิติ ดังนั้น ระบบการจัดอันดับสีที่เป็น 3 มิติก็คือปริภูมินั้นเอง

##### 5.1.1 ระบบการจัดอันดับสีของ Munsell (Munsell color-order system) [6, 8]

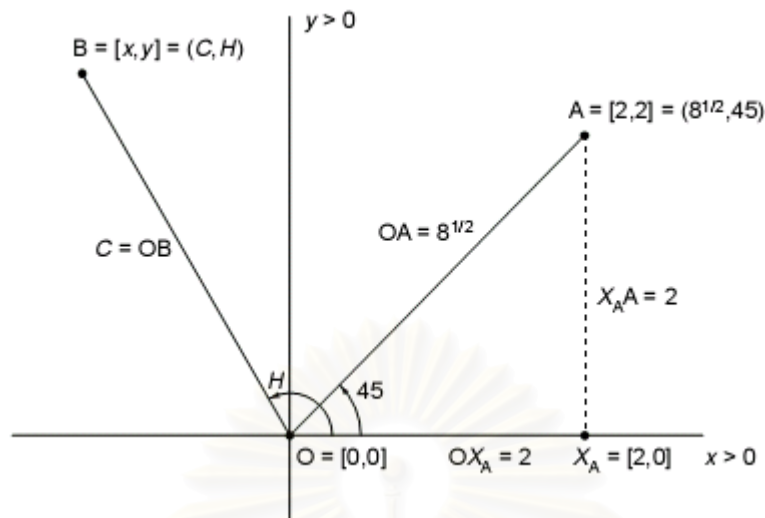
แบบจำลองของระบบสีของ Munsell มี 3 คุณลักษณะหลัก ได้แก่ Munsell value (V) Munsell chroma (C) และ Munsell hue (H) แต่ละคุณลักษณะถูกกำหนดขนาดให้สอดคล้อง กับการรับรู้ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงในการรับรู้ที่เท่ากันของแต่ละคุณลักษณะใดๆ จะให้ความ แตกต่างของการรับรู้ในสีที่เท่ากัน ไม่เหมือนกับระบบ xyY ตาม CIE ระบบของ Munsell ใช้ ระบบพิกัดทรงกระบอก

สำหรับระบบพิกัดฉากในกรณี 2 มิติ การแสดงเป็นกราฟของ y เทียบกับ x ซึ่งแทนด้วย แกน y และ x ตั้งฉากกัน ดังรูปที่ 5.1

จุด A = [2, 2] (หมายถึง  $x = y = 2$ ) สัมพันธ์กับจุดกำเนิด ( $O = [0, 0]$ ) โดยวัด 2 หน่วย จากแกน x ถึงจุด  $X_A$  และจากจุด  $X_A$  2 หน่วยขนานกับแกน y ตำแหน่งของ A อาจใช้พิกัดเชิงขั้ว โดยวัดตามมุมทวนเข็มนาฬิกาจากแกน x โดยระยะ  $OA = (2^2 + 2^2)^{1/2} = 8^{1/2}$  และมุมคือ  $45^\circ$  จะได้ ระบบเชิงขั้ว  $A = (8^{1/2}, 45)$  ในระบบของ Munsell เขียนระบบเชิงขั้วของจุดใดๆ ด้วย (C, H) โดย C คือระยะ OB และ H มุมที่ OB วัดทวนเข็มนาฬิกาจากแกน x โดย C และ H คำนวณได้จาก ระบบพิกัดฉาก x และ y ดังสมการที่ 5.1 ก) – ข)

$$C = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (5.1 \text{ ก})$$

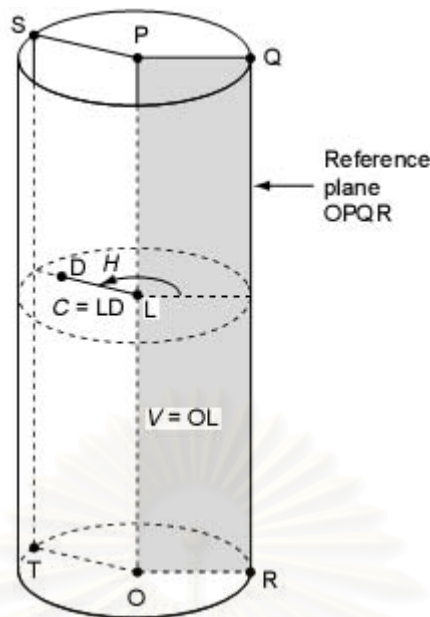
$$H = \arctan(y/x) \quad (5.1 \text{ ข})$$



รูปที่ 5.1 ระบบพิกัดฉากและเชิงขั้วโดยแสดงจุด  $A = [2, 2] = (8^{1/2}, 45)$  และ  $B = [x, y] = (C, H)$  เมื่อ  $C = OB$  และมุม  $H$  เป็นมุมวัดทวนเข็มนาฬิกาจากเส้นอ้างอิง  $OX_A$

อย่างไรก็ตาม ในระบบ 3 มิติ ระบบพิกัดฉากมิติที่ 3 มาจากการเพิ่มแกนที่ 3 ตั้งฉากกับ  $x$  และ  $y$  และผ่านจุด  $O$  ถ้าในระบบเชิงขั้วทำอย่างเดียวกัน มันจะกลายเป็นระบบพิกัดทรงกระบอก โดยทั่วไป แกน  $OP$  ของทรงกระบอกวางตัวในแนวตั้งดังรูปที่ 5.2 จุดทั่วไปคือ  $D = (V, C, H)$  ซึ่ง  $V$  คือระยะ  $OL$   $C$  คือระยะ  $LD$  และ  $H$  คือมุมทวนเข็มนาฬิกาจากระนาบอ้างอิง  $OPQR$

ในระบบของ Munsell แกนตั้งของทรงกระบอกคือแกน  $V$  ที่จุดต่ำสุด  $V=0$  บอกถึงสีดำ โดยสมบูรณ์ ซึ่งก็คือมีการสะท้อนที่ 0% ขณะที่จุดสูงสุดประมาณ  $V=10$  บอกถึงสีขาวของตัวสะท้อนแบบกระจายแสงโดยสมบูรณ์ (perfect reflecting diffuser) ในปัจจุบัน CIE กำหนดให้ อย่างหลังเป็นตัวกระจายแสงในอุดมคติ (การสะท้อนแสงจากวัตถุขนาดเท่ากันทุกทิศทาง) ด้วยการสะท้อนแสงที่ 100% จุดต่างๆบนแกน  $V$  แสดงจำนวนที่นับไม่ถ้วนของสีเทา(ซึ่งเกิดจากเฉพาขาวกับดำรวมกัน, achromatic colors) ที่มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่สม่ำเสมอ ( $0 < R < 100$ ) ซึ่งทั้งสีดำ ( $R \approx 0$ ) สีขาว ( $R \approx 100$ ) และสีเทาทุกๆเฉด ค่า  $V$  ที่ได้ไม่ว่าจะเป็นแบบที่ไม่มีสีหรือแบบที่มีสี (แบบที่มีสีบอกถึงสีของเฉดสี) อยู่บนระนาบแนวนอนที่ประกอบด้วยค่า  $V$  ต่างๆ พิกัด  $V$  ของพื้นผิวสีกำหนดให้เป็นความสว่าง ซึ่งคือ ฟังก์ชันของการสะท้อนทั้งหมดของผิว ที่สอดคล้องกับการตอบสนองของระบบการมองเห็นของมนุษย์ต่อสติมูลัสสีที่ความยาวคลื่นต่างกัน



รูปที่ 5.2 ระบบพิกัดทรงกระบอกแสดงจุด  $D = (V, C, H)$  โดยที่  $V = OL$  ( $L$  เป็นจุดตัดของแกนหลัก  $OP$  ของทรงกระบอกและระนาบที่ประกอบด้วย  $D$  ซึ่งตั้งฉากกับมัน)  $C = LD$  และ  $H$  คือมุมที่  $LD$  สร้างจากระนาบอ้างอิง  $OPQR$

$V$  สัมพันธ์กับค่า  $Y$  ตาม CIE ( $0 \leq Y \leq 100$ ) คือ  $V = Y^{1/2}$  หรือ  $0 \leq V \leq 10$  ใช้ครั้งแรกในปี 1834 โดย Weber และรู้จักในชื่อกฎของ Weber (Weber's law) ซึ่งอธิบายการรับรู้รูปแบบต่าง ๆ มากมายนอกเหนือจากความสว่าง ก็ยังรวมทั้งความยาวและน้ำหนัก และกล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วนที่เท่ากันของสติมุลัส จะสามารถรับรู้ได้เท่ากันตามกฎของ Weber การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจาก 1kg เป็น 2kg จะสามารถรับรู้ได้เท่ากับการเพิ่มจาก 2kg เป็น 4kg (ไม่ใช่ 3kg) สำหรับค่าสติมุลัส  $S$  ใดๆของการรับรู้ของสีตามกฎของ Weber จะเป็นดังสมการที่ 5.2

$$\frac{\Delta S}{S} = k \quad (5.2)$$

โดยที่  $\Delta S$  คือการเปลี่ยนแปลงในสติมุลัส และ  $k$  คือค่าคงที่

ในปี 1937 ได้มีการปรับปรุงขอบเขตการรับรู้ของระบบของ Munsell โดยกำหนดค่า  $V$  ใหม่ด้วยฟังก์ชันที่ชัดเจนขึ้นรู้จักกันในนาม พหุนามของ Judd (Judd polynomial) ดังสมการที่ 5.3

$$Y = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5 \quad (5.3)$$

ณ เวลานั้น  $Y$  ถูกกำหนดจากตัวประกอบการส่องสว่างของแมกนีเซียมออกไซด์  $Y$  ( $MgO$ ) ตั้งค่าที่ 100 สัมพันธ์กับตัวกระจายแสงแบบสมบูรณ์  $Y$  ( $MgO$ ) ตามความเป็นจริงมีค่าประมาณ 97.5 และ  $V=10$  สอดคล้องกับ CIE  $Y \approx 102.6$  พหุนามของ Judd ไม่สามารถหาค่าของ  $V$  ได้โดยตรง แต่สามารถหาได้ด้วยวิธีทำซ้ำ (iterative methods)

เมื่อพิจารณามิติเชิงมุม (H) ซึ่งถูกกำหนดด้วยเฉดสี Forcius และ Newton วาดวงเฉดสี (hue circle) ขึ้นมา ซึ่งบอกถึงวงปิด แต่ไม่จำเป็นต้องเป็นวงกลม แก้วโครงของแผนภาพทรงภาวะของ CIE ที่ไม่ได้เป็นวงกลม ซึ่งประกอบด้วยเส้นโค้งเปิดและปิด ล้อมด้วยเส้นตรงสีม่วง และพื้นที่ภายในวงปิดนี้บรรจุทุกเฉดสีที่เป็นไปได้

ก่อนจะกำหนดเฉดสี เริ่มแรกต้องกำหนดพจน์พื้นฐานของสี ซึ่งคือสีที่ถูกกำหนดโดยอ้างอิงกับตัวมันเอง มีหกสีได้แก่ สีขาว สีดำ สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน ดังนั้น จึงสามารถระบุได้ว่ามี 2 สีที่ไม่มีสี (achromatic color ได้แก่ สีขาวและสีดำ) และอีก 4 สีที่มีสี (chromatic color ได้แก่ สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน) เฉดสีถูกกำหนดให้เป็นคุณลักษณะของสีที่มีสี ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่มันปรากฏ อาจคล้ายกับสีพื้นฐานสีหนึ่งๆ หรือสีพื้นฐานสองสีรวมกัน เฉดสีของสีที่มีสีส่วนมากปรากฏเป็นการรวมกันของสีที่มีสีทั้งสองในวงเฉดสี ส่วนสีคู่ที่ตรงข้ามกัน (สีแดงกับสีเขียว สีเหลืองและสีน้ำเงิน) จะไม่เกิดขึ้น

ระบบของ Munsell มีคุณสมบัติคล้ายกับวงเฉดสี โดยมีแกนล้อมรอบแกนที่ไม่มีสี (achromatic axis) เป็นรูปวงกลม ซึ่งมีระยะห่างระหว่างเฉดสีเท่ากัน เช่น ระยะจาก 5R ถึง 10R เท่ากับระยะจาก 10R ถึง 5YR และสอดคล้องกับความแตกต่างทางการมองเห็นของแต่ละเฉดสี ทั้ง 5 เฉดสีถูกเรียกว่า หลักการเฉดสีของ Munsell ได้แก่ สีแดง (R) สีเหลือง (Y) สีเขียว (G) สีน้ำเงิน (B) และสีม่วง (P) ถูกวางห่างเท่าๆกัน จัดวางตามเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 5.3 ที่จุดกึ่งกลางของทั้ง 2 สี ใช้แทนสีหลัก 2 สีติดกัน (YR GY BG PB และ RP) ดังนั้นทั้งสีหลักและสีระหว่างกลางรวมเป็น 10 สีในระบบนี้ และแบ่งย่อยเป็น 10 ส่วนเท่าๆกันในแต่ละช่วง ทั้งนี้ภายในวงกลมทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น 100 ส่วน



รูปที่ 5.3 ระบบวงเฉดสีของ Munsell (H)



คุณลักษณะของเฉดสีของ Munsell (H) ถูกกำหนดด้วยขอบเขตเชิงมุม  $0 < H \leq 100$  โดยค่า 100 ซึ่งเทียบเท่ากับค่า 0 และอยู่ระหว่างกลางของเฉดสี RP กับ R โดย R อยู่ที่ตำแหน่ง  $H = 5$  ส่วน RP อยู่ที่ตำแหน่ง  $H = 95$  อย่างไรก็ตาม สีหลักในระบบถูกนำหน้าด้วยตัวเลข  $n$  ( $0 < n \leq 100$ ) ถ้า  $n = 5$  หมายถึงเป็นสีหลัก (5R แสดงสีหลักที่เป็นสีแดง) กรณีของ  $n > 5$  บอกลิงสีตามเข็มนาฬิกาจากสีหลัก (และ  $n < 5$  เป็นกรณีทวนเข็มนาฬิกา) ดังนั้นสำหรับตัวอย่าง 7R หมายถึงเฉดสีแดงที่มีสีเหลืองมากกว่า 5R

ในการกำหนดความสำคัญมิติของ C ของระบบ Munsell พิจารณาที่แผนภาพรงควาสะสีของเส้นทางเดินของสเปกตรัม และเส้นสีม่วงอาจคล้ายกับสีหลักที่มีสี (elementary chromatic color) สีใดสีหนึ่งก็ได้ อย่างไรก็ตาม สีส่วนมากอาจคล้ายกับสีที่ไม่มีสี เช่น ที่ความสว่างเท่ากัน สีส้มอาจบอกคุณลักษณะของสีแดงและสีเหลืองในอัตราส่วนที่กำหนด ขณะที่สีน้ำตาลซึ่งบอกคุณลักษณะของสีแดงและสีเหลืองเช่นกันแต่มีคุณลักษณะของสีเทา (grayness) สิ่งนี้นำไปสู่ 2 คำจำกัดความ

1. a full chromatic color คือสีที่เหมือนเพียงแคสีหลักและไม่เหมือนกับสีเทาเลย
2. ค่ารงค์ (chroma) คือคุณลักษณะของสีที่แสดงระดับ ซึ่งต่างจากสีที่ไม่มีสีที่ระดับความสว่างเท่ากัน

Munsell Chroma (C) ของสีบอกระยะทางจากแกนที่ไม่มีสีซึ่งตั้งอยู่ในระบบถึงสีนั้นๆ ที่ค่า V (ความสว่าง) เท่ากัน สีส้มที่บอกข้างต้นมีค่า C สูงกว่าสีน้ำตาล และอยู่ห่างจากแกนที่ไม่มีสีและทุกๆ สีที่ไม่มีสีอย่างแท้จริงจะมีค่า  $C = 0$

### 5.1.2 ปริภูมิสี xyY ตาม CIE (CIE xyY color space) [8]

ปัญหามากมายที่สัมพันธ์กับการใช้แผนที่ของสี (color atlases) สามารถทำให้เข้าใจได้ง่ายด้วยการใช้การวัดสีด้วยเครื่องวัด ซึ่งสามารถแปลงผลจากการวัดสี แล้วแสดงในรูปของพิกัดในระบบการจัดอันดับสี เช่น  $x$   $y$  และ  $Y$  ตาม CIE เป็นต้น

ปริภูมิสีของ xyY ตาม CIE ไม่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สี เนื่องจาก  $Y$  ซึ่งแทนการวัดความสว่าง แสดงด้วยสมการพหุนามของ Judd (สมการที่ 5.3) ไม่สามารถให้ค่าการรับรู้สีที่สม่ำเสมอได้ ตัวอย่างที่เข้าใจง่ายกว่าได้แก่ ความจริงที่ว่าสีเทาของ  $Y \approx 20$  (ไม่ใช่ 50) ให้การรับรู้ที่เท่ากันระหว่างจากสีดำโดยสมบูรณ์ ( $Y = 0$ ) และจากสีขาวโดยสมบูรณ์

ตั้งแต่แนะนำระบบ xyY ตาม CIE ปี 1931 ปรากฏว่ามีการพยายามที่จะหาสูตรที่ง่าย ซึ่งแปลงพิกัดหรือค่าไตรสติมูลัส ( $X$   $Y$  และ  $Z$ ) ไปเป็นระบบที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีมากกว่า แต่ไม่สามารถหาได้ โดยมีเพียงระบบ xyY ตาม CIE นี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอดีต และเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยพัฒนาระบบ CIE ต่อๆมา

### 5.1.3 แผนภาพ UCS แบบสามเหลี่ยมของ Judd และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าของ MacAdam (Judd triangular and MacAdam rectangular UCS diagrams) [8]

การพยายามมุ่งไปที่การแปลงเชิงเส้นของระบบ xy ตาม CIE ซึ่งได้ผล และเรียกว่า แผนภาพขนาดของมาตราส่วนรงค์ภาวะแบบสม่ำเสมอ (uniform chromaticity scale, UCS) แผนภาพนี้ยังคงคุณสมบัติบางประการของแผนภาพรงค์ภาวะ xy รวมทั้งยังเป็นเครื่องมือสำคัญในอุตสาหกรรม เช่น โททส์น Judd ได้เสนอการแปลงเชิงเส้นในปี 1935 ซึ่งได้ปรับปรุงความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีของแผนภาพรงค์ภาวะ แต่ใช้งานได้ยาก เนื่องจากต้องแสดงเป็นกราฟในพิกัดสามเหลี่ยม

ในปี 1937 MacAdam ได้นำประโยชน์ของระบบสามเหลี่ยมมาประดิษฐ์ระบบ 2 พิกัด ที่เกือบจะเหมือนเดิมแต่เป็นพิกัดฉาก ซึ่งก็คือแผนภาพ UCS สิ่งนี้นำไปสู่ระบบ LUV ตาม CIE โดยตรง โดยเป็น 1 ใน 2 ปริภูมิสีที่แนะนำโดย CIE พิกัดทั้ง 2 ได้แก่  $u$  (พิกัดแกน x) และ  $v$  (พิกัดแกน y) ดังในสมการที่ 5.4 ก) – ข)

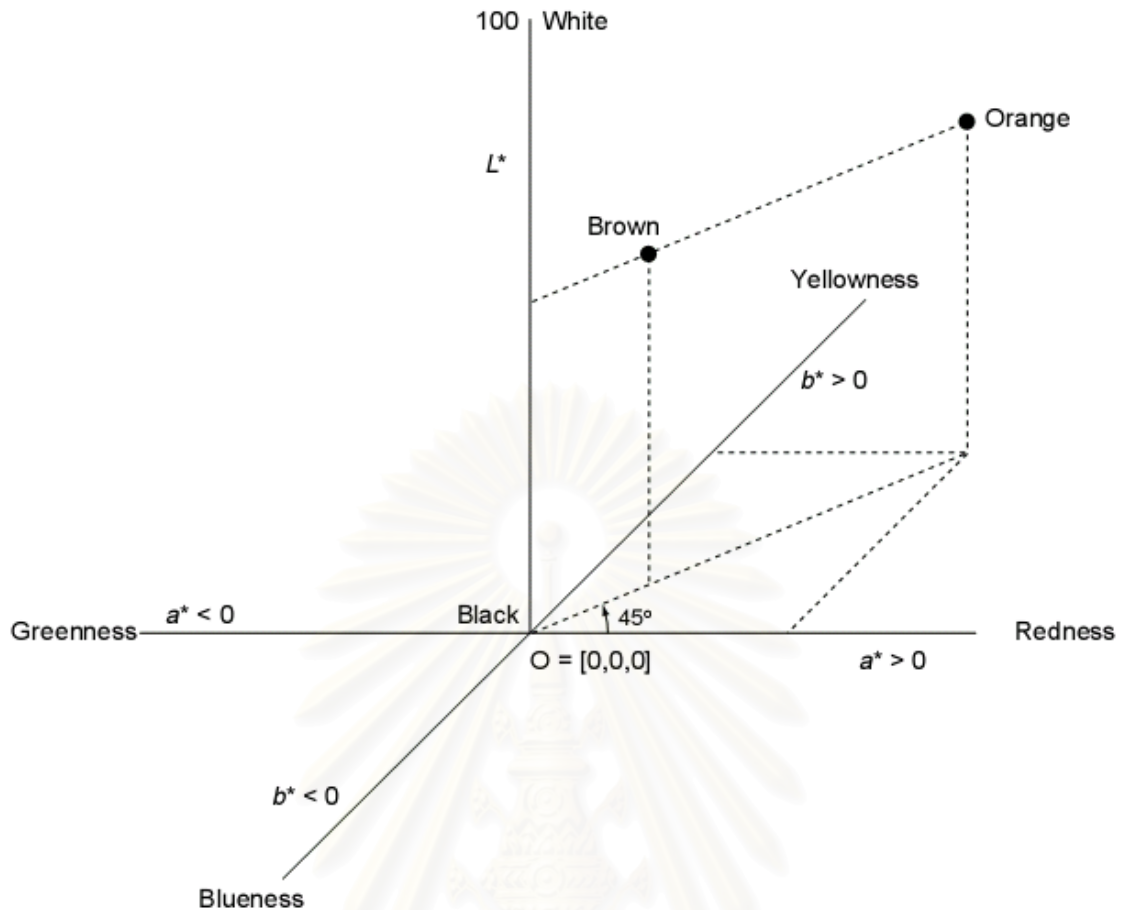
$$u = \frac{4x}{P} = \frac{4X}{Q} \quad (5.4 \text{ ก})$$

$$v = \frac{6y}{P} = \frac{6Y}{Q} \quad (5.4 \text{ ข})$$

โดย  $P = 3 - 2x + 12y$  และ  $Q = X + 15Y + 3Z$   $x$  และ  $y$  คือค่าโคออร์ดิเนตของรงค์ภาวะตาม CIE และ  $X$   $Y$  และ  $Z$  คือค่าไตรสติมูลัส

### 5.1.4 ปริภูมิสี $L\alpha\beta$ ของ Hunter และ Lab ของ Scofield [8]

ทฤษฎีคู่ตรงข้ามของการมองเห็นพัฒนาโดย Hering นำไปสู่สองการพัฒนาที่อิสระจากกัน ในปี 1942 ในทฤษฎีของ Hering สีหลัก 6 สีจัดเป็น 3 คู่ตรงข้ามกัน ได้แก่ สีขาวและสีดำ สีแดงและสีเขียว สีเหลืองและสีน้ำเงิน สีใดๆอาจระบุคุณลักษณะของความขาวหรือดำ ความแดงหรือเขียว และความเหลืองหรือน้ำเงิน ถ้านำผลของตัวแปรเหล่านี้มาจัดเป็น 3 แกนที่ตั้งฉากกัน โดยสีดำสมบูรณ์อยู่ที่  $[0, 0, 0]$  และผลที่ได้ก็คือปริภูมิสีคู่ตรงข้าม (opponent color space ที่เรียกเช่นนี้ เพราะกำหนดด้วยคุณลักษณะที่เป็นสีคู่ตรงข้ามกัน) คล้ายกับ  $xyY$  ตาม CIE และปริภูมิของ Munsell ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แกนพิกัดฉากของปริภูมิสีคู่ตรงข้ามและปริภูมิ LAB ตาม CIE และ ความสัมพันธ์ของตำแหน่งของสีส้มและสีน้ำตาลที่ความสว่างเท่ากัน

ณ เวลานั้น Hunter พยายามพัฒนาการอ่านค่าเลเซอร์โดยตรง และหาวิธีที่เหมาะสม สำหรับการแปลงทางอะนาล็อกของสัญญาณ ไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (photoelectric) ไปเป็นพิกัดของ ปริภูมิสี Hunter ได้เสนอสูตรของความสว่างที่มาจากฟังก์ชัน V ของ Munsell ( $Y^{1/2}$ ) และทั้ง ความแดง-ความเขียวและความเหลือง-ความน้ำเงินเป็นการแปลงที่ยังไม่เชิงเส้น ซึ่งเรียกว่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ นี่ก็เป็นการแปลงค่า  $x$   $y$  ตาม CIE ให้อยู่ในรูปของค่าไตรสติมูลัส Hunter เขียน ความแดงลบความเขียวเป็นฟังก์ชันของ  $X - Y$  และความเหลืองลบความน้ำเงินเป็นฟังก์ชันของ  $Y - Z$  ปรากฏว่าจำเป็นต้องปรับค่าของ  $Y - Z$  ด้วยตัวประกอบ 0.4 เพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอ ทางกรรับรู้สีที่สมเหตุผลในปริภูมิของเขา

สูตรนี้ถูกดัดแปลงในปีถัดมาโดย Scofield ทำให้ตัวแปรเหล่านี้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง จนทุกวันนี้ ได้แก่  $L = 10Y^{1/2}$  (สำหรับ  $0 \leq Y \leq 100$  นำไปช่วง  $0 \leq L \leq 100$  สำหรับความ สว่าง และ  $a$  กับ  $b$  คือฟังก์ชันของ  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ แต่ยังคงไม่เชิงเส้น และใช้ตัวประกอบ 0.4 ที่ใช้โดย Hunter)

### 5.1.5 ปริภูมิสีของค่าทางสีของ Adams (Adams chromatic value color space) [8]

ในการพัฒนาแนวทางอื่นๆ ในปี 1942 ผลที่แนะนำก่อนหน้านี้โดย Adams ได้เชื่อมโยงทฤษฎีคู่สีตรงข้ามของ Hering และหลักการ 3 สีของ Young-Helmholtz ผู้ซึ่งอธิบายการรับสี 3 ชนิดของตัวรับแสงในเรตินา ซึ่งตอบสนองต่อสเปกตรัมสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน Adams เสนอว่าคู่ตอบสนองตรงข้ามแดง-เขียวคือ ฟังก์ชันของความแตกต่างระหว่างการกระตุ้นของการตอบสนองต่อสีแดงและสีเขียวของตัวรับแสง และฟังก์ชันการตอบสนองเหลือง-น้ำเงินของความแตกต่างระหว่างการตอบสนองระหว่างสีเขียวและสีน้ำเงินในตัวรับแสง เขาจึงได้เขียนความแตกต่างเหล่านี้ในฟังก์ชันของ  $X - Y$  และ  $Z - Y$  ตามลำดับ ในกรณีของฟังก์ชัน  $Z - Y$  เขาใช้รูปแบบตรงข้ามกับของ Hunter เพราะ Adams ต้องการเลียนแบบโครงสร้างปริภูมิของ Munsell (วงเจดสีสัมพัทธ์ตรงข้ามกับแผนภาพทรงกลมของ CIE ซึ่ง Hunter ได้เลียนแบบ)

สูตรของ Adams รวม 2 สิ่งที่สำคัญ สิ่งแรก แต่ละค่าไตรสเปกตรัมของสีภายใต้ illuminant ที่กำหนด และผู้สังเกตการณ์ถูกนอร์มอลไลซ์ด้วยการหารด้วยค่าไตรสเปกตรัมของตัวสะท้อนแบบกระจายแสงโดยสมบูรณ์ ซึ่งใช้สัญลักษณ์  $n$  ที่เขียนข้างใต้โดยเขียนผลที่ได้ในรูปของอัตราส่วน เช่น  $X / X_n$  เป็นเหตุให้ทุกสีที่ไม่มีสีอยู่ที่จุดเดียวกันในแผนภาพ UCS โดยไม่คำนึงถึง illuminant และผู้สังเกตการณ์ ในกรณีที่จะสร้างปริภูมิสีที่สม่ำเสมอมากกว่านี้ Adams ใช้ฟังก์ชัน  $V$  ของ Munsell ( $Y^{1/2}$ ) กับค่าไตรสเปกตรัม  $X$  และ  $Z$  เขาจึงได้กำหนด 3 ฟังก์ชันในสมการที่ 5.5 ก) - ค)

$$V_x = (X / X_n)^{1/2} \quad (5.5 \text{ ก})$$

$$V_y = V = Y^{1/2} \quad (\text{โดยคำจำกัดความของ } Y_n = 100 \text{ สำหรับ } 0 \leq Y \leq 100) \quad (5.5 \text{ ข})$$

$$V_z = (Z / Z_n)^{1/2} \quad (5.5 \text{ ค})$$

Adams ออกแบบโดยให้ความสว่างคือ  $V_y$  ตัวแปรคู่ตรงข้ามของสีของความแดงลบความเขียวคือ  $V_x - V_y$  และความนำเงินลบความเหลืองคือ  $V_z - V_y$  และยังใช้ตัวประกอบเดียวกันคือ 0.4 ที่ใช้โดย Hunter เพื่อกำหนดสิ่งที่กลายเป็นที่รู้จักในนามของปริภูมิสีของค่าทางสีของ Adams

### 5.1.6 ปริภูมิสี Lab ของ Hunter [8]

ในปี 1958 Hunter นำความคิดบางอย่างมารวมในสูตรใหม่ และนำไปใช้อย่างแพร่หลายใน 20 ปีต่อมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหรัฐอเมริกา มันเป็นต้นกำเนิดของรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับ illuminant C มาตรฐาน และผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน CIE 1931 ( $2^\circ$ ) ดังสมการที่ 5.6 ก) - ค)

$$L_H = 100Y_R^{1/2} \quad (5.6 \text{ ก})$$

$$a_H = 175(X_R - Y_R) \left( \frac{0.0102 X_n}{Y_R} \right)^{1/2} \quad (5.6 \text{ ข})$$

$$b_H = 0.4 \times 175(Y_R - Z_R) \left( \frac{0.00847 Z_n}{Y_R} \right)^{1/2} \quad (5.6 \text{ ก})$$

โดย  $L_H$  คือค่าของความสว่าง ( $0 \leq L_H \leq 100$ )  $a_H$  และ  $b_H$  คือค่าของความแดงลบความเขียว และความเหลืองลบความน้ำเงินตามลำดับ (ตัวห้อย H บ่งบอกพิกัดของ Hunter) และ  $X_R$   $Y_R$  และ  $Z_R$  คือค่าอัตราส่วนของไตรสตีมูลัส  $X/X_n$   $Y/Y_n$  และ  $Z/Z_n$  ใช้ตัวประกอบ 0.0102 และ 0.00847 เพราะสำหรับ illuminant C และผู้สังเกตการณ์  $2^\circ$   $X(\text{MgO}) \approx 0.0102^{-1}$  และ  $Z(\text{MgO}) \approx 0.00847^{-1}$

### 5.1.7 ปรีกมิตีของ Adams – Nickerson (ANLAB) [8]

ในปี 1944 Nickerson และ Stultz เสนอการแทนที่การคำนวณของ Weber ซึ่งคือ  $V_x$   $V_y$  และ  $V_z$  ของปรีกมิตีของค่าทางสีของ Adams (สมการที่ 5.5) ด้วยพหุนาม Judd โดยแทนค่าในสมการที่ 4.3  $X_R$   $Y_R$  และ  $Z_R$  สำหรับ Y และ  $V_x$   $V_y$  และ  $V_z$  สำหรับ V พวกเขาแนะนำให้ปรับขนาดของพิกัดความสว่างด้วยตัวประกอบ 0.23 เพื่อให้ค่าความสว่างสอดคล้องกับขนาดของกลุ่มตรงข้ามสีอื่นๆ ในปี 1952 Glasser และ Troy เสนอรูปแบบที่ตรงข้ามสำหรับความน้ำเงินลบความเหลือง ดังนั้น อันดับของเจดสีในวงจรมันสอดคล้องกับปรีกมิตี xyY ตาม CIE และ  $L\alpha\beta$  ของ Hunter ขนาดของกลุ่มตรงข้ามแทนด้วย L A B ตามลำดับ โดย Scofield เป็นผู้เรียกชื่อระบบนี้ มีการใช้สูตรนี้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากการเผยแพร่โดย Nickerson ที่รู้จักกันในชื่อ ANLAB (LAB ของ Adams – Nickerson) ดังในสมการที่ 5.7 ก) – ค)

$$L_{AN} = 0.23SV_y \quad (5.7 \text{ ก})$$

$$A_{AN} = S(V_x - V_y) \quad (5.7 \text{ ข})$$

$$B_{AN} = 0.4(V_y - V_z) \quad (5.7 \text{ ค})$$

โดย  $V_x$   $V_y$  และ  $V_z$  คำนวณจากการวัดของ X Y และ Z สัมพันธ์กับ MgO

ตัวประกอบ S มีค่าเท่ากันทั้ง 3 คุณลักษณะ ทำให้ปรีกมิตีทั้งหมดมีขนาดที่สม่ำเสมอ ในระยะแรก Nickerson และ Stultz เสนอ  $S = 42$  ค่านี้กำหนดโดย Judd ในปี 1939 ความแตกต่างทางสีขนาดเล็กกว่าสามารถละเอียดได้ ในการเทียบสีของสีทอกับค่าที่ยอมรับได้ทางการค้าโดยเฉลี่ย อย่างไรก็ตาม ต่อมา Nickerson เสนอค่า  $S = 40$  ซึ่งกลายเป็นตัวประกอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลจากสูตร ANLAB จะคลุมเครือถ้าไม่กำหนดค่า S ที่ชัดเจน ดังนั้น สัญลักษณ์ที่ใช้ จะใช้ ANLAB(S) เช่น สำหรับ  $S = 40$  แทนด้วย ANLAB(40) โดยย่อเป็น AN(40) หรือ AN40 เป็นต้น

### 5.1.8 ปริภูมิสีแบบรากที่สามในยุคแรกๆ (Early cube – root spaces) [8]

ณ เวลานี้มีคนจำนวนมากเห็นว่า พหุนามของ Judd (สมการที่ 5.3) ไม่จำเป็นต้องซับซ้อน และเสนอการประมาณแบบรากที่สามเพื่อนำไปใช้สำหรับคุณลักษณะของความสว่าง ( $L$ ) มีรูปคือ  $L = k_1 Y^{1/3} - k_2$  โดยค่า  $k_1$  และ  $k_2$  เป็นค่าคงที่บวก ความหลากหลายระหว่างค่าคงที่ที่ได้เลือก โดยนักวิจัยหลายคน อาจเกิดจากข้อมูลที่หามาได้ของแต่ละคน ภายใต้สภาพการมองที่แตกต่างกัน ค่าที่นำมาใช้มากที่สุดคือ ค่าของ Glasser et al. รู้จักในชื่อสูตรของ Glasser cube – root ดังในสมการที่ 5.8 ก) – ค)

$$L_G = 25.29Y^{1/3} - 18.38 \quad (5.8 \text{ ก})$$

$$a_G = 106 [ (1.02X)^{1/3} - Y^{1/3} ] \quad (5.8 \text{ ข})$$

$$b_G = 106 \times 0.4 [ Y^{1/3} - (0.847Z)^{1/3} ] \quad (5.8 \text{ ค})$$

โดย  $L_G = 100$  สำหรับ  $Y(MgO) = 102.56$

### 5.1.9 แผนภาพ UCS ปี 1960 และ ปริภูมิสี $U^*V^*W^*$ ตาม CIE ปี 1964 [8]

ในปี 1960 CIE ได้พัฒนาความสัมพันธ์กับหลายๆสูตรที่นำมาใช้ เพื่อจะทำให้เป็นมาตรฐานจากหลายปริภูมิที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีที่คล้ายกันในปี 1937 แผนภาพ UCS ของระบบ uv ที่เป็นมุมฉากของ MacAdam ถูกเลือก เพราะว่าง่ายของการแปลงจากแผนภาพ xy ตาม CIE และก็เป็นที่ยอมรับกันในเรื่อง แผนภาพ UCS ตาม CIE ปี 1960 ในปี 1964 CIE ได้ขยายเป็น 3 มิติ โดยรวมสูตรรากที่สามสำหรับคุณลักษณะของความสว่าง ในสูตรนี้ใช้  $W^*$  แทนด้วยแกนที่ 3 ซึ่งตั้งฉากกับ  $U^*$  และ  $V^*$  (ซึ่งคือการแปลงแบบไม่เชิงเส้นของตัวแปร u และ v ในระบบ UCS ตาม CIE ปี 1960) ดังในสมการที่ 5.9 ก) – ค)

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (5.9 \text{ ก})$$

$$U^* = 13W^*(u - u_n) \quad (5.9 \text{ ข})$$

$$V^* = 13W^*(v - v_n) \quad (5.9 \text{ ค})$$

โดย  $1 \leq Y \leq 100$  สัมพันธ์กับตัวสะท้อนกระจายแสงโดยสมบูรณ์ และ  $u_n$  และ  $v_n$  แทนค่าของ  $u$  และ  $v$  สำหรับตัวสะท้อนกระจายแสงโดยสมบูรณ์นั้นตามลำดับ สำหรับทุกสีที่ไม่มีสี  $U^* = V^* = 0$

### 5.1.10 แผนภาพ UCS ตาม CIE ปี 1976 และปริภูมิสี CIELUV และ CIELAB [6,8]

ในปี 1973 CIE เห็นด้วยกับคำแนะนำของ MacAdam ว่า ให้นำปริภูมิสีแบบรากที่สามของ ANLAB มาใช้ อย่างไรก็ตาม ปริภูมิสี CIELAB ไม่สามารถมีแผนภาพ UCS ที่เชื่อมโยงกันมันได้ เพราะการหาตัวแปรสีคู่ตรงข้ามร่วมกับการแปลงแบบไม่เชิงเส้นของค่าไตรสติมูลัสของ CIE เนื่องจากความต้องการแผนภาพ UCS เพื่อใช้ในงานต่างๆ CIE เห็นด้วยกับการนำการตัดแปลงของแผนภาพ UCS ปี 1960 โดยการวิจัยของ Eastwood เพื่อที่จะขยายเป็น 3 มิติ

โดยรวมฟังก์ชันราก็สามของความสว่าง ซึ่งนำมาจากเวอร์ชันราก็สามของ ANLAB โดยข้อเสนอเหล่านี้เป็นการแนะนำของ CIE ในปี 1976 และยังใช้ในการกำหนดปริภูมิสีที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีโดยประมาณ

Eastwood แสดงให้เห็นว่า ปริภูมิของ Munsell ที่อยู่ในปริภูมิของ  $U^*V^*W^*$  ตาม CIE ปี 1964 สามารถทำให้มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีมากขึ้น โดยการเพิ่ม  $v$  ครั้งหนึ่ง การเสนอครั้งแรกกำหนดในสมการ 5.10 ก) – ข) คือ แผนภาพสีที่เหลื่อมพื้นผิวของ UCS ตาม CIE ปี 1976 ด้วยแกนแนวนอน  $u'=u$  และแกนแนวตั้ง  $v'=1.5v$  โดย  $u$  และ  $v$  เป็นพิกัดของแผนภาพ UCS ตาม CIE ปี 1960

$$u' = u = \frac{4x}{P} = \frac{4X}{Q} \quad (5.10 \text{ ก})$$

$$v' = 1.5v = \frac{9y}{P} = \frac{9Y}{Q} \quad (5.10 \text{ ข})$$

โดย  $P$  และ  $Q$  สอดคล้องกับสมการ 5.4

การเสนอครั้งที่ 2 เพื่อให้ได้ปริภูมิสีที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สี โดยสร้างมาจากแผนภาพ UCS โดยเพิ่มแกนของความสว่าง ( $L^*$ ) ตั้งฉากกับ  $u^*$  และ  $v^*$  (ซึ่งหามาจาก  $u'$  และ  $v'$  ตามลำดับ) รู้จักกันในชื่อปริภูมิสี  $L^*u^*v^*$  ตาม CIE ปี 1976 และชื่อย่อที่ใช้อย่างเป็นทางการคือ CIELUV ดังสมการที่ 5.11 ก) – ง)

$$L^* = 116(Y_R)^{1/3} - 16 \quad \text{ถ้า } Y_R > 0.008856 \quad (5.11 \text{ ก})$$

$$L^* = 903.3Y_R \quad \text{ถ้า } Y_R \leq 0.008856 \quad (5.11 \text{ ข})$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (5.11 \text{ ค})$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (5.11 \text{ ง})$$

โดย  $Y_R = Y/Y_n$  ( $0 \leq Y \leq 100$ ) และ  $Y_n$  คือค่าไตรสติมูลัสของวัตถุสีขาวที่จำเพาะเจาะจง (โดยทั่วไป ตัวสะท้อนแบบกระจายแสงโดยสมบูรณ์  $Y_n = 100$ ) และ  $u'_n$  และ  $v'_n$  คือค่าของ  $u'$  และ  $v'$  ตามลำดับ สำหรับตัวสะท้อนแบบกระจายแสงโดยสมบูรณ์

การเสนอครั้งที่ 3 คือ ปริภูมิสี  $L^*a^*b^*$  ตาม CIE 1976 โดยมีชื่อย่ออย่างเป็นทางการคือ CIELAB ทั้ง 3 แกนของคู่สีตรงข้ามที่ตั้งฉากกันคือ  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  โดย  $L^*$  มีนิพจน์เหมือนสมการที่ 5.11 ก) – ข) ทุกประการรวมทั้งกรณีที่  $Y_R \leq 0.008856$  เงื่อนไขที่ยกเว้นนั้นเสนอโดย Pauli (Pauli extension) เพื่อแก้ปัญหาค่าประมาณราก็สามสำหรับค่าที่น้อยมากของ  $Y_R$  แล้ว  $L^* < 0$  ส่วนค่าของคู่สีที่ตั้งฉากกันอยู่ในสมการที่ 5.12 ก) – ข)

$$a^* = 500[f(X_R) - f(Y_R)] \quad (5.12 \text{ ก})$$

$$b^* = 0.4 \times 500[f(Y_R) - f(Z_R)] \quad (5.12 \text{ ข})$$

โดยการเขียน  $T_R$  สำหรับแต่ละอัตราส่วนของไตรสติมูลัส  $X_R = X/X_n$ ,  $Y_R = Y/Y_n$  และ  $Z_R = Z/Z_n$  ( $X_n$ ,  $Y_n$  และ  $Z_n$  เป็นค่าไตรสติมูลัสของวัตถุสีขาวที่กำหนดไว้) ค่า  $T_R$  ที่เกี่ยวข้องเป็นดังสมการที่ 5.13 ก) – ข)

$$f(T_R) = (T_R)^{1/3} \quad \text{ถ้า } T_R > 0.008856 \quad (5.13 \text{ ก})$$

$$f(T_R) = 7.787T_R + \frac{16}{116} \quad \text{ถ้า } T_R \leq 0.008856 \quad (5.13 \text{ ข})$$

เครื่องหมายดอกจันบนแต่ละตัวแปรในสูตรของ CIELUV และ CIELAB เพื่อแยกแยะความแตกต่างจากสูตรอื่นๆที่คล้ายกัน ขอบเขตของค่าความสว่าง  $0 \leq Y \leq 100$  นำไปสู่  $0 \leq L^* \leq 100$  (ถึงแม้ว่าทั้งสองจะไม่เชื่อมโยงกันอย่างเชิงเส้น) ตัวสะท้อนแบบกระจายแสงโดยสมบูรณ์มี  $L^* = 100$  สีเทา มี  $u^* = v^* = a^* = b^* = 0$  และสีดำโดยสมบูรณ์มี  $L^* = 0$  ในปริภูมิของ CIELAB เมื่อ  $a^* > 0$  แสดงคุณลักษณะของความแดง  $a^* < 0$  แสดงคุณลักษณะของความเขียว  $b^* > 0$  แสดงคุณลักษณะของความเหลือง  $b^* < 0$  แสดงคุณลักษณะของความน้ำเงิน

หลังจากได้อธิบายทั้งสองปริภูมิสี CIELUV และ CIELAB ในรูปของ 3 แกนที่ตั้งฉากกัน แต่จะเข้าใจโครงสร้างของปริภูมิสีได้ง่ายกว่า ถ้านำระบบพิกัดทรงกระบอกมาใช้ ถึงแม้ก่อนปี 1976 จะมีบางส่วนที่ใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก ที่หามาจากพิกัดที่ตั้งฉากกันของปริภูมิสี และในปีนั้น CIE กำหนดความสัมพันธ์ของค่ารงค์ (chroma,  $C_{uv}^*$ ) และเฉดสี (hue,  $h_{uv}$ ) ในปริภูมิสี CIELUV ดังสมการที่ 5.14 ก) – ข)

$$C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2})^{1/2} \quad (5.14 \text{ ก})$$

$$h_{uv} = \arctan(v^* / u^*) \quad (5.14 \text{ ข})$$

ในปริภูมิสีของ CIELAB ทั้งค่ารงค์และเฉดสี ( $C_{ab}^*$  และ  $h_{ab}$ ) ก็เป็นดังในสมการที่ 5.14 ก) – ข) ด้วย โดยการแทนตัวแปร  $u^*$  ด้วย  $a^*$  และแทนตัวแปร  $v^*$  ด้วย  $b^*$  โดยค่าเฉดสีอยู่ในช่วง  $0 \leq h \leq 360$   $h = 0$  บอกลีบบนแกนฝั่งที่เป็นบวกของ  $u^*$  หรือ  $a^*$  ส่วนค่า  $h$  ที่ 90 องศาหมายถึงสีที่อยู่บนแกนบวกของ  $v^*$  หรือ  $b^*$  และค่าอื่นๆก็คล้ายๆกัน อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วสีที่อยู่บนแกนมักจะไม่ใช้สีเดียว (unitary color) ส่วนสีเดียนั้นทั้งสีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน ภายใต้อัตรา  $C/2$   $h_{ab} \approx 25, 85, 165$  และ  $260$  ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของค่ารงค์ ( $C_{uv}^*$  และ  $C_{ab}^*$  เรียกรวมเป็น  $C^*$ ) คือ เมื่อ  $C^* = 0$  บอความ เป็นสีที่ไม่มีสีอย่างแท้จริง และเมื่อ  $C^* > 0$  บอสีที่มีสี ในระบบ CIELAB สีส้มและสีน้ำตาลที่ความสว่างเท่ากัน และที่เคยกล่าวในปริภูมิสีของ Munsell พบว่า  $0 \leq h_{ab} \leq 90$  และมีค่า  $h_{ab} = 45$  ถ้าเป็นเช่นนี้ จะสามารถแยกความแตกต่างได้ โดยใช้เพียงตัวแปร  $C_{ab}^*$  (ดังรูปที่ 5.4) โดยทั่วไป สำหรับสีน้ำตาล  $C_{ab}^* \approx 10$  และสำหรับสีส้ม  $C_{ab}^* \approx 70$  สีส้มบางสีที่มีคุณสมบัติฟลูออเรสเซนต์จะมี  $C_{ab}^* > 100$



ใน CIELUV ยังมีอีกหนึ่งความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้ใน uv ตาม CIE ปี 1976 ค่าความอิ่มตัว (saturation,  $s_{uv}$ ) คือ

$$\begin{aligned} s_{uv} &= 13 \left[ (u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2 \right]^{1/2} \\ &= \frac{C_{uv}^*}{L^*} \end{aligned} \quad (5.15)$$

ค่าความอิ่มตัวสัมพันธ์กับค่ารงค์ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาทั้งความมีสีสัน (chromaticness) และความสดใส (brightness) จึงต้องให้ค่าจำกัดความดังนี้ สำหรับความมีสีสัน คือ การรับรู้สีของพื้นที่ปรากฏที่มีค่ารงค์มากหรือน้อยกว่า และสำหรับความสดใสคือ การรับรู้สีของพื้นที่ปรากฏที่ปล่อยแสงมากหรือน้อยกว่า CIE กำหนดความอิ่มตัวและค่ารงค์ โดยสำหรับความอิ่มตัวคือ สัดส่วนของความมีสีสันของพื้นที่ที่พิจารณากับความสดใสของมันเอง และสำหรับค่ารงค์คือ สัดส่วนของความมีสีสันของพื้นที่ที่พิจารณากับความสดใสของพื้นที่ที่คล้ายกันที่ถูกลายแสงแล้วปรากฏเป็นสีขาว สมการที่ 5.15 สอดคล้องกับค่าจำกัดความ เพราะว่า CIE จำกัดความสว่าง ( $L^*$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์โดยประมาณ) ว่าเป็น ความสดใสของพื้นที่ที่พิจารณา เทียบกับความสดใสของพื้นที่ที่คล้ายกันที่ปรากฏเป็นสีขาว

## 5.2 การประเมินค่าความแตกต่างของสี (Color – difference Evaluation)

การบอกความแตกต่างระหว่างสีของวัตถุ 2 ชิ้นเป็นเรื่องสำคัญในทุกการใช้งาน และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม เช่น การทำสีของสิ่งทอ สีของสารสีตัวอย่างชิ้นหนึ่ง ในกระบวนการผลิตอาจเพี้ยนไปจากมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยปกติแล้ว นี่ก็คือกระบวนการทำซ้ำ การประเมินมาจากปริมาณของแต่ละสารสีที่ต้องการ เพื่อนำมาทำให้ได้สีที่ต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของนักผสมสีหรือการทำนายเทียบผลโดยคอมพิวเตอร์ จำนวนของสารสีตัวอย่างเหล่านี้ถูกส่งไปยังกระบวนการผลิต และนำสีที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ถ้าไม่เหมือนกับมาตรฐาน การประเมินจะนำไปปรับและคำนวณขนาดของค่าที่แตกต่าง จำนวนที่ปรับใหม่ของสารสีถูกนำมาใช้ และก็ประเมินต่อไป จนกว่าจะได้สีที่เหมือนกับของมาตรฐาน

เวลาในการดำเนินการผลิตและราคาจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการทำซ้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีการเทียบสีในอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสม ถึงแม้ว่าลูกค้าพอใจถ้าได้สีเหมือนกับมาตรฐานจริงๆ แต่โดยปกติ ผู้ผลิตเตรียมค่าที่ยอมรับได้ (tolerance) สำหรับความแตกต่างของสีเพื่อลดจำนวนการทำซ้ำในกระบวนการผลิต งานของผู้ผลิตคือ ต้องผลิตให้สีที่ได้แตกต่างจากมาตรฐานน้อยเพียงพอภายในค่าที่ยอมรับได้นี้ ขนาดของค่าที่ยอมรับได้โดยทั่วไปแล้วกำหนดโดยลูกค้า ซึ่งเป็นผู้ตัดสินใจขั้นสุดท้ายว่า ค่าที่ยอมรับได้ควรเป็นเท่าไรที่จะให้ผ่านหรือไม่ผ่าน

### 5.2.1 หลักการการประเมินค่าความแตกต่างของสี [8]

หลักการพื้นฐานส่วนใหญ่ของทุกปริภูมิสี สร้างโดยการจัดการค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ซึ่งมี 3 แกนที่ตั้งฉากกัน ถ้าค่า  $X$   $Y$  และ  $Z$  ของกลุ่มชิ้นงาน (batch, B) เท่ากับของมาตรฐาน (standard, S) ตามการจำกัดความแล้ว จะได้ว่าทั้งสองเหมือนกันอย่างสมบูรณ์ภายใต้เงื่อนไขการวัดแบบเดียวกัน พวกมันจะปรากฏเป็นความเหมือนกันโดยสมบูรณ์ โดยผู้ประเมินที่มีการตอบสนองทางการมองเห็นที่แม่นยำจำลองมาจากผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน และให้เขามองภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน และเพื่อแปลงการวัด การมีค่าไตรสติมูลัสที่เหมือนกันได้นั้น ทั้ง B และ S จำเป็นที่จะต้องอยู่ตำแหน่งเดียวกันในปริภูมิสี XYZ

สมมติว่า B และ S อยู่ใกล้กันมาก แต่ไม่ถึงขั้นอยู่ตำแหน่งเดียวกัน เพราะว่าการแบ่งลำดับของคุณลักษณะจากปริภูมิ XYZ ที่สร้างขึ้น เป็นเหตุให้สติมูลัสสีของมันคล้ายกันแต่ไม่เหมือนกัน ขณะที่ B และ S ถูกแยกจากกัน จะเป็นเหตุให้สติมูลัสสีของทั้งสองคล้ายกันน้อยกว่าเดิม ระยะทางระหว่าง B และ S ในปริภูมิสี XYZ คือ การวัดความแตกต่างของสีระหว่างทั้งคู่ เนื่องจากปริภูมิสี XYZ เป็นแบบ Euclidean ดังนั้น ระยะทาง BS คำนวณได้จากทฤษฎีของพีทาโกรัส ใน 3 มิติ ดังสมการที่ 5.16

$$BS = [(X_B - X_S)^2 + (Y_B - Y_S)^2 + (Z_B - Z_S)^2]^{1/2} \quad (5.16)$$

โดยที่  $X_B$   $Y_B$  และ  $Z_B$  คือค่าไตรสติมูลัสของ B และ  $X_S$   $Y_S$  และ  $Z_S$  คือค่าไตรสติมูลัสของ S ปริภูมิของ Euclidean k คือ เซตของ k อันดับ  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$  เมื่อ  $x_i$  เป็นจำนวนจริงสำหรับทุกๆ  $1 \leq i \leq k$  (กล่าวคือ เซตของเวกเตอร์ที่มีทั้งหมด k ส่วนประกอบ และแต่ละส่วนประกอบเป็นจำนวนจริง) พร้อมด้วย operation (การดำเนินการ) ลืออย่าง คือ

- (1) + คือการบวกเวกเตอร์ธรรมดา
- (2) การคูณเวกเตอร์ด้วยจำนวนจริง (หรือการคูณด้วยสเกลาร์)
- (3) dot product
- (4) norm หรือการหาขนาดของเวกเตอร์ norm ของเวกเตอร์  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  เขียนแทนด้วย  $|x|$  และมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{x \cdot x}$

ความแตกต่างของสีแสดงโดยใช้สัญลักษณ์  $\Delta E_\sigma$  โดยตัวอักษรกรีก  $\Delta$  (delta) ใช้เพื่อบอกความแตกต่าง  $E$  คือตัวอักษรเริ่มแรกของคำในภาษาเยอรมัน Empfindung (หมายถึง ความรู้สึก) และ  $\sigma$  ที่เป็นตัวอักษรห้อยแทนสิ่งที่ใช้ และสามารถเขียนสมการที่ 5.16 เป็นสมการที่ 5.17

$$\Delta E_{XYZ} = [(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2]^{1/2} \quad (5.17)$$

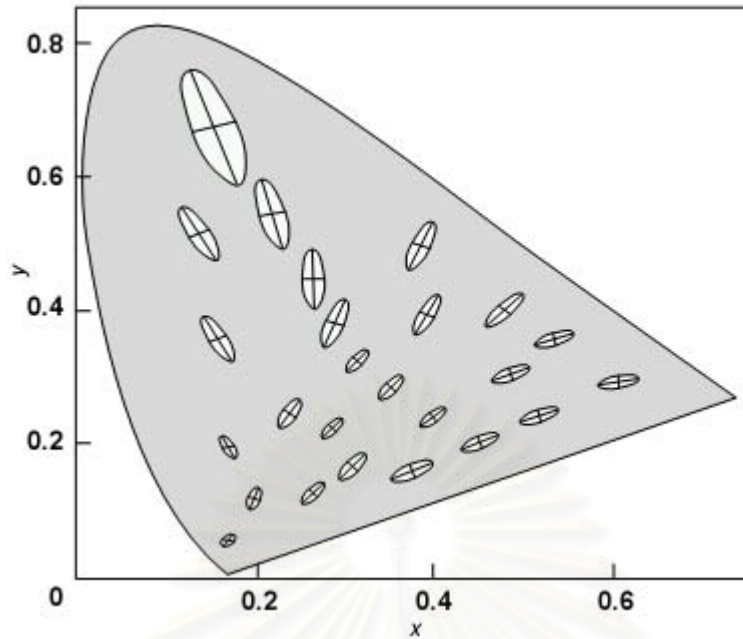
อย่างไรก็ตาม ในการประเมินค่าของความแตกต่างของสีในอุตสาหกรรมนั้น ปริภูมิสี XYZ มีข้อเสียอยู่ 2 ประการ ซึ่งหนึ่งในสองประการนี้เป็นเหตุให้ไม่ค่อยจะใช้ค่า  $\Delta E_{XYZ}$  ในการคำนวณสีขั้นสุดท้าย

ข้อเสียอย่างแรกคือ ความสำคัญของความแตกต่างของแต่ละส่วนประกอบ ( $\Delta X$   $\Delta Y$  และ  $\Delta Z$ ) ไม่สามารถอ่านค่าเชื่อมโยงเทียบกับธรรมชาติของสีนั้นๆ โดยผู้ประเมินค่าความแตกต่างของสีได้ อย่างเช่นนักผสมสีพยายามจะแก้ไขชิ้นงานที่ไม่ผ่านการทดสอบ แต่เขาไม่สามารถทำได้เพราะค่าความแตกต่างของแต่ละส่วนประกอบ ( $\Delta X$   $\Delta Y$  และ  $\Delta Z$ ) บอกความหมายทางสีไม่ได้ อย่างไรก็ตาม พื้นฐานของการแปลง (เป็นปริภูมิสี xyY ตาม CIE) และการคำนวณของ  $\Delta E_{xyY}$  แก้ปัญหานี้ได้บางส่วน

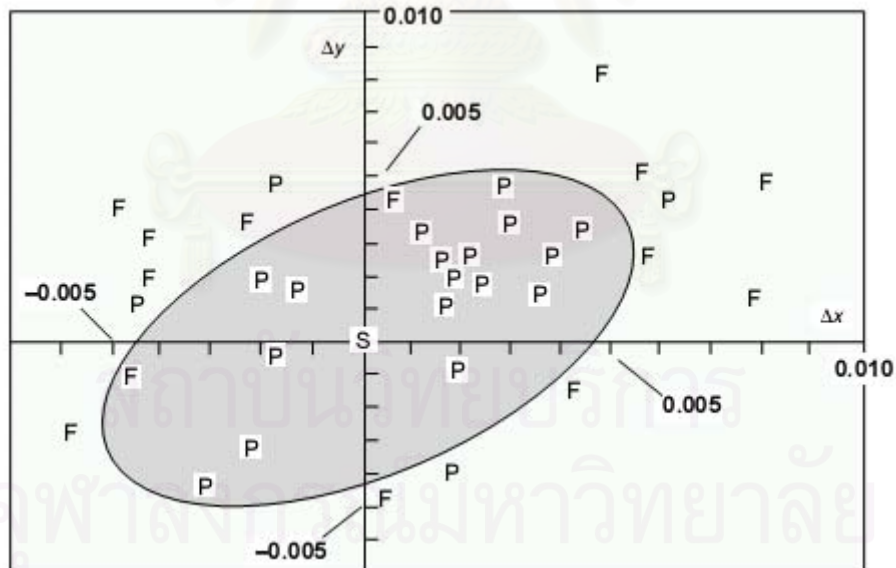
ข้อเสียที่ 2 ที่สำคัญกว่าของปริภูมิสี XYZ คือ ไม่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีกับขนาดของการประเมินทางการมองเห็นของความแตกต่างของสี สิ่งนี้แสดงให้เห็น 2 กรณี กรณีแรก ถ้า 2 ชิ้นงานถูกประเมินทางการมองเห็นว่า เหมือนกัน ในความแตกต่างของสีทั้งหมดจากมาตรฐานเดียวกัน แต่แตกต่างในธรรมชาติของชิ้นงาน (ปริมาณสารสีแตกต่างกันแต่ได้สีเหมือนกัน) เอง ค่า  $\Delta E_{XYZ}$  ของแต่ละชิ้นงานจะได้ผลที่ไม่เท่ากัน กรณีที่สอง ถ้าการประเมินทางการมองเห็นบอกถึงขนาดของความแตกต่างทางสีของกลุ่มชิ้นงานหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางหนึ่ง จากนั้นนำไปเทียบกับอีกจุดศูนย์กลางหนึ่ง ซึ่งทั้ง 2 จุดศูนย์กลางไม่ได้ใกล้กัน โดยทั่วไปค่าการวัดของ  $\Delta E_{XYZ}$  ของทั้ง 2 คู่จะไม่เท่ากัน ซึ่งความไม่สม่ำเสมอทางการรับรู้สีของปริภูมิสี XYZ ก็เหมือนกับปริภูมิสี xyY

ผลการทดลองบอกชิ้นงานที่ประเมินทางการมองเห็นว่า มีความแตกต่างทางสีที่เท่ากันจากมาตรฐาน แต่แตกต่างทิศทาง โดยชิ้นมาตรฐานจะอยู่ในปริภูมิ xyY บนจุดศูนย์กลางของรูปทรงรี ซึ่งสิ่งนี้อธิบายถึงกรณีแรก และเหตุผลสำหรับกรณีที่สองคือ รูปทรงรีซึ่งตอบสนองกับความแตกต่างของสีทางการมองเห็นที่เท่ากันจากมาตรฐานที่จุดศูนย์กลางที่ชัดเจน เปลี่ยนแปลงทั้งขนาดรูปร่างและตำแหน่ง หลักฐานแสดงเป็นรูป 2 มิติในรูปที่ 5.5 โดย MacAdam ความยาวของแกนที่ยาวที่สุดและสั้นที่สุดของรูปทรงรี แสดงความแตกต่างทางการรับรู้สีที่เท่ากัน อัตราส่วนของสองความยาวซึ่งประเมินโดย MacAdam ประมาณ 30 ต่อ 1 ดังนั้นเป็นการชี้ให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอทางการรับรู้สีของปริภูมิ xyY ต่อมา McLaren ได้ประเมินที่อัตราส่วนเดียวกันในปริภูมิสี XYZ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปริภูมิ XYZ ก็ไม่สม่ำเสมอทางการรับรู้สีเช่นเดียวกัน

ความไม่สม่ำเสมอทางการรับรู้สีในสูตรของความแตกต่างทางสี เป็นปัญหาใหญ่ในการกำหนดขอบเขตว่า ผ่านหรือไม่ผ่านในการเทียบสี เมื่อไม่สามารถเพิ่มขอบเขตความแตกต่างของสีกับมาตรฐานเพราะลูกค้า หรือไม่สามารถประเมินค่าโดยประมาณ โดยเทียบกับข้อมูลเดิมสำหรับสีที่คล้ายกัน นักผสมสีต้องกำหนดขนาดของค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถทำได้โดยผลทางเครื่องมือและการตัดสินใจทางการมองเห็นสำหรับชุดชิ้นงาน วิธีการแสดงทางภาพสามารถให้แผนภาพการกระจายดังรูปที่ 5.6 ซึ่งได้จากจำนวนชิ้นงานที่เพียงพอ แสดงวงรีของค่าที่ยอมรับได้ของสีที่อาจถูกกำหนดโดยลูกค้า



รูปที่ 5.5 แผนภาพรงควภาวะตาม CIE 1931 ซึ่งแสดงข้อมูลปี 1942 ของ MacAdam สำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเทียบสี โดยระยะระหว่างขอบของรูปทรงรี และจุดศูนย์กลางแทนความแตกต่างของสีที่รับรู้ในขนาดเท่ากัน



รูปที่ 5.6 การกำหนดวงรีของค่าที่ยอมรับได้ ในส่วนของแผนภาพรงควภาวะตาม CIE จากการกระจายของชิ้นงานที่ผ่าน (P) และไม่ผ่าน (F) เมื่อเทียบกับมาตรฐาน (S) โดยน้อยกว่าครึ่งของ 35 ชิ้นงานที่แสดงอยู่นอกขอบเขต และมีการตัดสินใจพลาด 6 ชิ้นงาน (17%) (4 P อยู่นอกวงรีและ 2 F อยู่ในวงรี)

### 5.2.2 Single – number shade passing [8]

จากการเสนอของ CIE ในปี 1931 ซึ่งใช้ความพยายามอย่างสูงในการพัฒนาสูตรของความแตกต่างของสี ในที่ซึ่งทุกค่าที่ยอมรับได้เท่ากัน โดยไม่คำนึงถึงมาตรฐานของสีและทิศทางของความแตกต่างของสีของชิ้นงาน ในปริภูมิสีใดๆของ Euclidean  $\sigma$  ความแตกต่างของสีทั้งหมด  $\Delta E_\sigma$  ระหว่าง B และ S ถูกคำนวณให้สอดคล้องกับในสมการที่ 5.17 คือ ผลรวมของปีทาโกรัสของความแตกต่าง ( $\Delta A_i$ ) ระหว่างชุดชิ้นงานกับมาตรฐานในแต่ละคุณลักษณะที่อิสระต่อกัน ( $A_i$  โดยที่  $i = 1, 2, 3$ ) ของปริภูมิดังสมการที่ 5.18

$$\Delta E_\sigma = \left[ \sum_{i=1}^3 (\Delta A_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5.18)$$

โดยที่  $\Delta A_i = A_{i,B} - A_{i,S}$

ในปริภูมิสีของ Euclidean ที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีโดยสมบูรณ์ ขอบเขตที่ผ่านหรือไม่ผ่านที่จุดศูนย์กลางสีจะมีวงกลมที่มีรัศมีเดียว รูปเฉพาะของสมการที่ 5.18 ในแต่ละปริภูมินั้นๆ โดยทางทฤษฎีแล้วสามารถทำการวัดสีได้เพียง 1 ชุดชิ้นงาน ซึ่งประเมินทางการมองเห็นเป็นเส้นขอบที่บอกว่าผ่านหรือไม่ผ่าน ที่จุดศูนย์กลางของสีใดๆ และโดยไม่คำนึงถึงทิศทางความแตกต่างของมันจากมาตรฐาน เพื่อสร้างค่าที่ยอมรับได้ที่สัมพันธ์กันในทุกทิศทางที่ทุกจุดศูนย์กลางของสี เป้าหมายที่อ้างถึงนี้คือ single – number shade passing (SNSP)

### 5.2.3 ความแตกต่างของสีตาม CIELAB และ CIELUV [8]

ในปี 1967 CIE กังวลเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดจากความหลากหลายของสูตร ที่ใช้ในการประเมินความแตกต่างของสี ดังนั้น สีสูตรถูกเลือกเพื่อเป็นการตรวจสอบเบื้องต้น และหลายปีถัดมามีผู้เชี่ยวชาญหลายคนได้ทำการศึกษาดูอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามไม่มีสูตรไหนที่น่าเชื่อถือได้ตามแบบผู้ประเมิน โดยเฉลี่ย

ในระหว่างนั้น ความต้องการมาตรฐานกดดันมากขึ้นแบบปีต่อปี ด้วยการให้การประเมินค่าความแตกต่างของสีด้วยเครื่องมือที่เพิ่มขึ้นในปี 1973 ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่าสิ่งสำคัญที่สุดที่คณะกรรมการควรทำคือ หาข้อสรุปของสูตรให้ได้ และความเห็นก็ตรงกันที่สูตรใหม่ของรากที่สามเสนอโดย MacAdam เนื่องจากสองปัจจัยที่สำคัญอย่างแรกคือ แนวโน้มของการศึกษาเปรียบเทียบซึ่งว่าค่าแรงค์ของ Adams ใกล้เคียงกับค่าที่น่าเชื่อถือที่สุด และอย่างที่สองคือความเข้าใจง่ายของสูตรรากที่สาม ซึ่งสัมพันธ์กับพหุนามของ Judd ที่ใช้ใน ANLAB ผลลัพธ์นี้ออกสู่สาธารณะในปี 1976 โดย CIE เสนอ 2 ระบบได้แก่ CIELAB และ CIELUV สำหรับปริภูมิสีที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้สีโดยประมาณ และการคำนวณค่าความแตกต่างของสี

สูตรที่ใช้ในการคำนวณพิกัดของจุดที่แทนสีในรูปแบบพิกัดฉากและทรงกระบอก ทั้งในปริภูมิสีตาม CIELAB และ CIELUV ความแตกต่างของสีระหว่างชุดชิ้นงาน (B) และมาตรฐาน (S) ถูกกำหนดในแต่ละปริภูมิ เป็นระยะทางของ Euclidean ระหว่างจุดนั้น (B และ S) แทนสีของ

มันในปริภูมิที่เกี่ยวข้อง สูตรการคำนวณความแตกต่างของสีและส่วนประกอบของมันในสองมิติ เหมือนกันทุกอย่าง ต่างกันเพียงตัวแปรที่ใช้ ดังนั้น การคำนวณความแตกต่างของสีที่ใช้ใน CIELAB จะสอดคล้องกับสูตรสำหรับ CIELUV โดยการแทนตัวแปรตั้งแต่สมการที่ 5.19 ถึง 5.26 ดังนี้  $\Delta E_{uv}^*$  สำหรับ  $\Delta E_{ab}^*$ ,  $\Delta u^*$  สำหรับ  $\Delta a^*$ ,  $\Delta v^*$  สำหรับ  $\Delta b^*$ ,  $\Delta C_{uv}^*$  สำหรับ  $\Delta C_{ab}^*$  และ  $\Delta H_{uv}^*$  สำหรับ  $\Delta H_{ab}^*$  โดยที่  $\Delta L^*$  ไม่ต่างกัน

ถ้า  $L_B^*$ ,  $a_B^*$  และ  $b_B^*$  คือ พิกัดฉากของ LAB ตาม CIE ของชุดชิ้นงาน และ  $L_S^*$ ,  $a_S^*$  และ  $b_S^*$  สำหรับมาตรฐานโดยแทนค่า  $\Delta L^* = L_B^* - L_S^*$ ,  $\Delta a^* = a_B^* - a_S^*$  และ  $\Delta b^* = b_B^* - b_S^*$  ในสมการที่ 5.18 จะได้สมการที่ 5.19

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (5.19)$$

โดย  $\Delta E_{ab}^*$  คือความแตกต่างของสีตาม CIE LAB ระหว่าง B และ S โดยที่  $L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  และ  $\Delta E_{ab}^*$  มีหน่วยเดียวกัน

ได้กล่าวถึงประโยชน์ของตัวแปรของระบบแบบทรงกระบอกแล้ว อย่างไรก็ตาม ถ้าแทนที่ผลต่างของสีด้วยการใช้ส่วนประกอบของระบบแบบทรงกระบอกจะพบกับปัญหาทันที ตัวแปร  $\Delta L^*$  เหมือนกับของแบบพิกัดฉากและแสดงในสมการที่ 5.20

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,B}^* - C_{ab,S}^* \quad (5.20)$$

โดยการจำกัดความตามสมการที่ 5.14 มีหน่วยเดียวกัน ความแตกต่างของมุมเฉดสี  $\Delta h_{ab}$  มีหน่วยเป็นองศา และไม่ได้มีหน่วยเดียวกับตัวแปรอื่น ดังนั้น การแทนค่าทางคณิตศาสตร์จึงผิดพลาด ดังสมการที่ 5.21

$$\Delta h_{ab} = h_{ab,B} - h_{ab,S} \quad (5.21)$$

การจำกัดความความแตกต่างของสีตาม CIE ใช้ร่วมกับสองวิธีที่จะเอาชนะปัญหา วิธีแรกใช้การวัดมุมเส้นโค้งของวงกลม (radian) เพื่อได้การประมาณที่ใกล้เคียงกับผลต่างของเฉดสี  $\Delta H_{ab}^*$  ในหน่วยที่เทียบเท่ากับตัวแปรอื่น ดังสมการที่ 5.22

$$\Delta H_{ab}^* = C_{ab}^* \Delta h_{ab} \frac{\pi}{180} \quad (5.22)$$

แต่การใช้นี้มีข้อจำกัดในกรณีความแตกต่างของสีขนาดเล็อกจากแกนที่ไม่มีสี (achromatic axis) จึงไม่เป็นที่นิยม เพราะทั้งข้อจำกัดและวิธีที่ 2 เป็นวิธีที่ดีกว่าด้วย

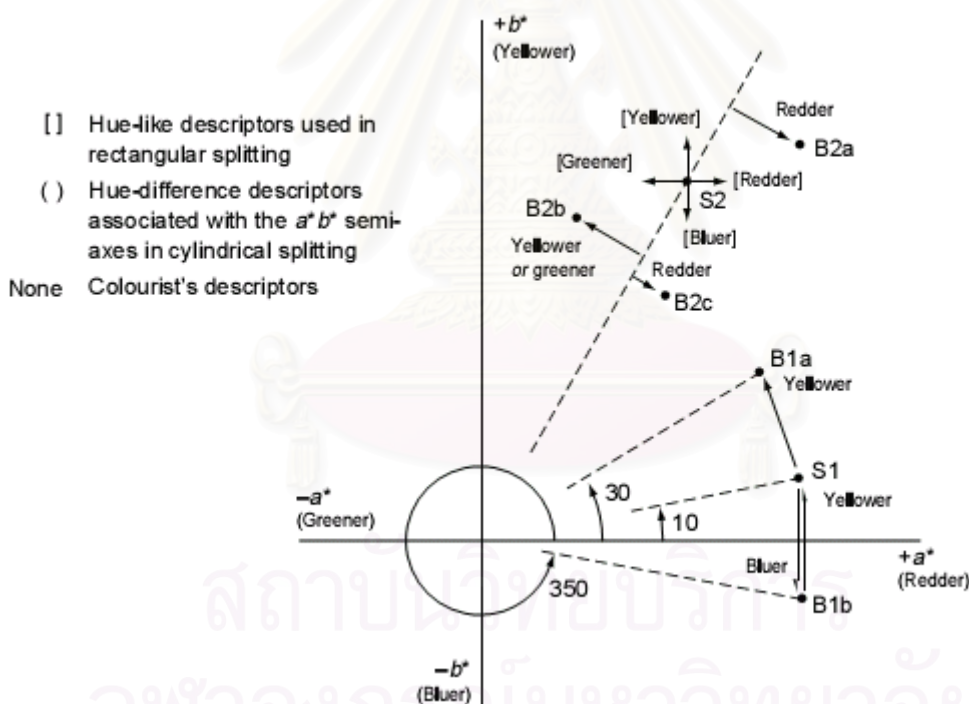
สมมติให้  $\Delta H_{ab}^*$  มีหน่วยแบบเดียวกับตัวแปรอื่นๆของความแตกต่างตาม CIE LAB ความแตกต่างของเฉดสีระหว่างชุดชิ้นงานและมาตรฐาน และมันเป็นอิสระจากทั้ง  $\Delta L^*$  และ  $\Delta C_{ab}^*$  โดย  $\Delta E_{ab}^*$  ต้องเป็นผลรวมของพีทาโกรัสของผลต่างของสามส่วนประกอบ ดังสมการที่ 5.23

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad (5.23)$$

โดยการจัดตัวแปรใหม่ในสมการที่ 5.23 สามารถหาค่า  $\Delta H_{ab}^*$  ได้ดังสมการที่ 5.24

$$\Delta H_{ab}^* = [(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad (5.24)$$

แต่น่าเสียดาย วิธีนี้ยังมีปัญหาสำหรับตัวอย่าง  $\Delta L^* > 0$  ถ้า  $L_B^* > L_S^*$  แต่  $\Delta L^* > 0$  ถ้า  $L_B^* < L_S^*$  ขณะที่  $\Delta H_{ab}^*$  ดังในสมการ 5.24 คำนวณจากค่ารากที่ 2 เครื่องหมายของ  $\Delta H_{ab}^*$  ไม่ได้ถูกกำหนด CIE ระบุว่า  $\Delta H_{ab}^*$  ต้องมีค่าเป็นบวกถ้า  $h_{ab}$  เพิ่มขึ้น และเป็นลบถ้า  $h_{ab}$  ลดลง สิ่งนี้บอกเครื่องหมายของ  $\Delta H_{ab}^*$  เหมือนกับของ  $\Delta h_{ab}$  ดังนั้น  $\Delta H_{ab}^* > 0$  ถ้าชุดชิ้นงานมีค่ามุม  $h_{ab}$  ทวนเข็มนาฬิกาจากมาตรฐาน และ  $\Delta H_{ab}^* < 0$  ถ้าตามเข็มนาฬิกา ดังตัวอย่างสำหรับชิ้นงาน B1a และมาตรฐาน S1 ดังรูปที่ 5.7 ซึ่ง  $h_{ab,B1a} = 30$  และสำหรับ  $h_{ab,S1} = 10$  ดังนั้น  $\Delta h_{ab} = 30 - 10 = 20$  (มากกว่า 0) จะได้เครื่องหมายของ  $\Delta H_{ab}^*$  เป็นบวก เนื่องจาก B1a ทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเทียบกับ S1 จึงสมเหตุผล และเมื่อพิจารณาชิ้นงาน B1b ( $h_{ab,B1b} = 350$ ) และที่มาตรฐานเดียวกัน จะได้  $\Delta h_{ab} = 350 - 10 = 340$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 0 ดังนั้น  $\Delta H_{ab}^*$  เป็นบวก เวกเตอร์เจดสีจาก S1 ไปยัง B1b ต้องพิจารณาตามเข็มนาฬิกา และค่า  $\Delta H_{ab}^*$  ควรเป็นลบ ปัญหานี้เกิดขึ้นเมื่อ  $\Delta h_{ab} > 180$  ดังนั้น การหาค่าแบบนี้ยังมีปัญหา แต่ได้ใช้เพียงวิธีนี้คำนวณค่า  $\Delta H_{ab}^*$  มาเป็นเวลาหลายปีแล้ว



รูปที่ 5.7 แผนภาพ LAB ตาม CIE  $a^* b^*$  แสดงตำแหน่งของมาตรฐาน (S1 และ S2) ชิ้นงาน (B1a B1b B2a B2b และ B2c) และคุณสมบัติความแตกต่างของเจดสีของมัน

อีกวิธีคิดโดย Huntsman คือทำให้สมการที่ 5.19 ถึง 5.23 ทางฝั่งขวามือเท่ากันและจัดรูป จะได้สมการที่ 5.25

$$\Delta H_{ab}^* = 2(C_{ab,B}^* C_{ab,S}^*)^{1/2} \sin\left(\frac{\Delta h_{ab}}{2}\right) \quad (5.25)$$

ถึงแม้สมการที่ 5.25 เป็นวิธีการง่ายๆ ในการคำนวณค่า  $\Delta H_{ab}^*$  มันยังมีข้อเสียคือ ได้เครื่องหมายผิดไปเมื่อ  $\Delta h_{ab} > 180$  อย่างไรก็ตาม เครื่องหมายที่ต้องการถูกกำหนดโดยการทดสอบขนาดสัมพัทธ์ของสองพื้นที่โดยตรง  $a_B^*b_S^*$  และ  $a_S^*b_B^*$  ดังสมการที่ 5.26

$$\Delta H_{ab}^* = s[2(C_{ab,B}^*C_{ab,S}^* - a_B^*a_S^* - b_B^*b_S^*)]^{1/2} \quad (5.26)$$

$$s = 1 \quad \text{ถ้า } a_B^*b_S^* < a_S^*b_B^*$$

$$s = -1 \quad \text{ถ้า } a_B^*b_S^* > a_S^*b_B^*$$

จากการเสนอ 2 สูตร (CIELAB และ CIELUV) CIE ยอมรับความล้มเหลวของมัน แต่ทั้ง 2 สูตรนี้ยังมีความจำเป็นอยู่ CIELAB ถูกเลือกเพราะมันมีความน่าเชื่อถือมากกว่าสูตรอื่นๆ สำหรับผิวสี ส่วน CIELUV เพราะมันเชื่อมโยงกับแผนภาพ UCS ยังไม่เคยมีการศึกษาการใช้ CIELUV กับกรณีผิวสี ถึงแม้การศึกษานี้ค่อนข้างน้อยอาจทำให้มันประสบความสำเร็จเหมือน CIELAB ที่เป็นมาตรฐาน สิ่งที่น่าประหลาดใจเพียงมาตรฐานเดียว การตรวจสอบภายหลังส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่า ไม่ค่อยมีความแตกต่างในเรื่องความน่าเชื่อถือของทั้งสองวิธีการประเมินค่าของความแตกต่างของผิวสี และทั้ง 2 สูตรมีความผิดพลาดมากกว่าผู้ประเมินทางการมองเห็น โดยเฉลี่ย มันจึงไม่ใช่เรื่องแปลก ที่การหาสูตรที่เหมาะสมกว่ายังมีต่อไป ที่จริงแล้ว ในการเสนอวิธีทั้ง 2 ในปี 1976 CIE ยอมรับความเป็นไปได้ของการพัฒนาของวิธีที่ดีกว่า โดยการเปิดประเด็นไว้เพื่อรอการพัฒนาการปรับปรุงระบบพิกัด

#### 5.2.4 ความแตกต่างของสีของ CMC (l:c) [8]

สูตร CMC (l:c) คำนวณมาจากสูตรความแตกต่างสีของ JPC79 ที่พัฒนาโดย J&P Coats (ตอนนี้เป็นส่วนหนึ่งของ Coats Viyella plc) การทดลองของ JPC79 ให้ผลที่น่าประทับใจ โดยมันมีการตัดสินใจผิดพลาดน้อยกว่าการตัดสินใจที่น่าเชื่อถือที่สุดของนักประเมินสีของ Coats เล็กน้อย

เริ่มตั้งแต่ข้อมูลในปี 1963 Color Measurement Committee of the Society of Dyers and Colorists ที่ได้ร่างวลชนะเลิศ เพราะการเป็นมาตรฐานในด้านเครื่องมือการประเมินความแตกต่างของสี AN(42) ถูกเสนอในปี 1970 และเปลี่ยนเป็น AN(40) ในปี 1972 หลังจากนั้นเป็น CIELAB ในปี 1976 และงานของ JPC79 มีความเป็นไปได้ที่จะเสนอการปรับปรุงสูตร โดยเริ่มพัฒนามาจากปริภูมิ AN(50) ในกรณีที่จะทำให้เป็นที่ยอมรับมากกว่านี้ คณะกรรมการเสนอให้หลักสำคัญของมันแปลงไปเป็น CIELAB ถึงแม้การคำนวณนี้ยังใช้การไม่ได้จริง และถูกเปลี่ยนมาอยู่ในปริภูมิ AN (43.909) 43.909 เป็นตัวประกอบที่มีการโต้แย้งว่าใกล้เคียงกับการประมาณ ANLAB ไปเป็น CIELAB สูตรตอนเริ่มต้นถูกเปลี่ยนขนาด เพื่อให้ความแตกต่างของหน่วยสีสอดคล้องกับข้อจำกัดทางการมองเห็นว่าผ่านหรือไม่ผ่าน โดยเฉลี่ยของผู้ประเมิน J&P Coats สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการการเทียบสีด้วยคุณภาพสูงสุด จากการเสนอแนะของคณะกรรมการ มันถูกปรับขนาดอีก เพื่อให้ความแตกต่างของหน่วยสีแทนค่าเฉลี่ยของข้อจำกัด



ทางการมองเห็นว่าผ่านหรือไม่ผ่านของผู้ประเมิน ที่เชื่อว่าการเทียบสีว่าผ่านหรือไม่ผ่าน  
คุณภาพสูงที่สุดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ดังสมการที่ 5.27 ก) – ง)

$$\Delta E_{JPC79} = \left[ \left( \frac{\Delta L}{S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C}{S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H}{S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.27 \text{ ก})$$

โดยที่  $\Delta L$   $\Delta C$  และ  $\Delta H$  คือความสว่างของปริภูมิสี AN (43.909) ผลต่างของค่ารังค์และเฉดสี  
ระหว่างชิ้นงานกับมาตรฐานตามลำดับ (คำนวณกับส่วนประกอบของ LAB ตาม CIE  $\Delta L^*$   $\Delta C_{ab}^*$   
และ  $\Delta H_{ab}^*$ ) และ

$$S_L = \frac{0.08195L_S}{1+0.01765L_S} \quad (5.27 \text{ ข})$$

$$S_C = 0.638 + \frac{0.0638C_S}{1+0.0131C_S} \quad (5.27 \text{ ค})$$

$$S_H = S_C T \quad (5.27 \text{ ง})$$

โดย  $T = 1$  ถ้า  $C_S < 0.638$  (5.27 จ)

$$T = k_1 + |k_2 \cos(H_S + k_3)| \quad \text{ถ้า } C_S \geq 0.638 \quad (5.27 \text{ ฉ})$$

โดย  $k_1 = 0.36$   $k_2 = 0.4$  และ  $k_3 = 35$  ถ้า  $H_S \leq 164$  หรือ  $H_S > 345$  (5.27 ช)

$$k_1 = 0.56$$
  $k_2 = 0.2$  และ  $k_3 = 168$  ถ้า  $164 < H_S < 345$  (5.27 ซ)

$L_S$   $C_S$  และ  $H_S$  เป็นค่าความสว่างของปริภูมิสี AN (43.909) ค่ารังค์ และมุมของเฉดสี (หน่วย  
องศา) ของมาตรฐานตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม การใช้สูตร JPC79 แสดงความผิดปกติสองเรื่อง เรื่องแรกคือ ความล้มเหลว  
ในการประเมินความแตกต่างของความสว่างระหว่างคู่ชิ้นงานที่มีความสว่างต่ำ และเรื่องที่สอง  
เกิดขึ้นในกรณีคู่ชิ้นงานที่เกือบไม่มีสี (neutral) ความไม่ต่อเนื่องนำไปสู่การกำหนดค่า  $T$  ใน  
สมการที่ 5.27 ง) บางครั้งให้ความแตกต่างที่สำคัญใน  $\Delta E_{JPC79}$  (สำหรับคู่ชิ้นงานภายในขอบเขต  
ของ  $C_S < 0.638$  และสำหรับคู่ชิ้นงานที่มีทั้งขนาดและทิศทางของความแตกต่างทางการมองเห็น  
คล้ายกัน แต่มีชิ้นหนึ่งอยู่นอกขอบเขตที่ยอมรับได้) ความผิดปกติแรกแก้ปัญหาโดยตั้งค่า  $S_L$  เป็น  
ค่าคงที่สำหรับชิ้นงานที่มีความสว่างต่ำ และความผิดปกติเรื่องที่สองแก้โดยการเปลี่ยนฟังก์ชันไม่  
ต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่อเนื่อง มีการเสนอการเปลี่ยนอื่นๆอีก 4 อย่าง เพื่อเพิ่มขอบเขตของสูตร และ  
ทำให้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น

อย่างแรก ในกรณีที่จะให้การใช้งานเป็นที่ยอมรับในการตัดสินใจว่าผ่านหรือไม่ผ่านใน  
อุตสาหกรรมที่แตกต่าง และเพื่อการประเมินค่าที่สามารถรับรู้ได้ (แล้วแต่อุตสาหกรรม) มันจึงถูก  
ดัดแปลงเพื่อให้ค่าความยอมรับได้สัมพัทธ์ (relative tolerances) กับความแตกต่างของความสว่าง  
ค่ารังค์ และเฉดสีเพื่อจะปรับได้อย่างอิสระ นักผสมสีแยกแยะอย่างเป็นระบบสอดคล้องกับ  
อุตสาหกรรมที่พวกเขาทำงาน โดยค่าที่ยอมรับได้มีความแตกต่างกัน (ในการทดสอบว่าผ่านหรือไม่  
ผ่าน) กับตัวแปรพิศกัทรงกระบอกทั้ง 3 ตัวของสี (เป็นการเน้นว่านี่เป็นการบอกค่าที่ยอมรับได้

สัมพันธ์กับส่วนประกอบของความแตกต่างของสี เพื่อจะได้ไม่สับสนกับการตัดสินใจยอมรับค่าว่าผ่านหรือไม่ผ่านของค่าที่ยอมรับได้โดยสมบูรณ์) ค่าที่ยอมรับได้สัมพันธ์ให้ขนาดของส่วนประกอบพิกัดทรงกระบอกของความแตกต่างของสี เพื่อปรับให้สอดคล้องกับสัดส่วนของผู้ประเมินว่าผ่านหรือไม่ผ่านในอุตสาหกรรมนั้นๆ และเพื่อให้ได้ความแตกต่างในแต่ละส่วนประกอบเป็นค่าที่ยอมรับได้ ค่าที่ยอมรับได้ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างในเจดสี ( $h$ ) ถูกตั้งค่าเป็น 1 และค่าที่ยอมรับได้ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของความสว่างและค่ารงค์แสดงด้วย  $l$  และ  $c$  ตามลำดับ เนื่องจาก  $h = 1$  เสมอ ดังนั้นค่าที่ยอมรับได้ที่สัมพันธ์ของทั้ง 3 องค์ประกอบจึงถูกระบุโดยใช้ค่าของ  $l$  และ  $c$  เท่านั้น

ในการตัดสินใจความสามารถทางการรับรู้ (perceptibility) (โดยทั่วไปคือการกำหนดผลของ fastness – test) ความแตกต่างที่สามารถรับรู้ได้เท่ากันในแต่ละส่วนประกอบมีความสำคัญเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ในการตัดสินใจความสามารถในการยอมรับได้ (acceptability) ทางการมองเห็นใช้เพื่อคำนวณค่า JPC79 ในกรณีของสิ่งทอ ผู้ประเมินยอมรับว่า 2 เท่าของความแตกต่างของความสว่างเท่ากับความแตกต่างในค่ารงค์หรือเจดสี ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอย่างที่สองคือ ค่าของ JPC79  $S_L$  (สมการที่ 5.27 ก) – ข) เพื่อให้การคัดแปลงสูตรบอกปริมาณความสามารถทางการรับรู้เมื่อ  $l = c (= h) = 1$  และการประเมินค่าความสามารถในการยอมรับได้ของสิ่งทอ สูตรคัดแปลงเป็น  $l = 2$  ขณะที่  $c (= h) = 1$

อย่างที่สาม ขณะนั้นคณะกรรมการพร้อมที่จะตีพิมพ์สูตรที่ปรับปรุงใหม่ CIELAB เพื่อเอาชนะ ANLAB ในการใช้งานทางอุตสาหกรรม และดังนั้น มันจึงถูกปรับฐานในปริญญ์ LAB ตาม CIE ด้วยสมมติฐานง่ายๆว่า ความแตกต่างระหว่าง CIELAB กับ AN (43.909) สามารถละลายได้ในสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่างสีต่ำ

สุดท้าย คณะกรรมการรู้สึกว่าการสูตรที่ปรับปรุงนี้ต้องจำแนกออกจากต้นกำเนิดของมัน โดยสูตรที่ปรับปรุงนี้ตีพิมพ์ในปี 1984 ภายใต้ชื่อ CMC ( $l:c$ ) CMC เป็นชื่อย่อโดยทั่วไปที่ใช้กันสำหรับ Color Measurement Committee ดังในสมการที่ 5.28 ก) – ข)

$$\Delta E_{CMC(l:c)} = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{l S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{c S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.28 \text{ ก})$$

โดยที่  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C_{ab}^*$  และ  $\Delta H_{ab}^*$  ตามลำดับคือ ผลต่างของความสว่าง ค่ารงค์ และเจดสีของ CIE ระหว่างชิ้นงานกับมาตรฐาน  $l$  และ  $c$  คือค่าที่ยอมรับได้ที่ใช้กับความแตกต่างในด้านความสว่างและค่ารงค์ตามลำดับ เทียบกับค่าที่ยอมรับได้ที่ใช้กับความแตกต่างในด้านเจดสี (ค่าตัวเลขที่ใช้ในสถานการณ์ที่กำหนดถูกแทนสำหรับตัวอักษร  $l$  และ  $c$  เช่น CMC (2:1) อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความคลุมเครือ)

$$S_L = \frac{0.040975 L_s^*}{1 + 0.01765 L_s^*} \quad \text{ถ้า } L_s^* \geq 16 \quad (5.28 \text{ ข})$$

$$S_L = 0.511 \quad \text{ถ้า } L_S^* < 16 \quad (5.28 \text{ ค})$$

$$S_C = 0.638 + \frac{0.0638C_{ab,S}^*}{1 + 0.0131C_{ab,S}^*} \quad (5.28 \text{ ง})$$

$$S_H = S_C(TF + 1 - F) \quad (5.28 \text{ จ})$$

โดย  $F = \left[ \frac{(C_{ab,S}^*)^4}{(C_{ab,S}^*)^4 + 1900} \right]^{1/2} \quad (5.28 \text{ ฉ})$

$$T = k_1 + |k_2 \cos(h_{ab,S} + k_3)| \quad (5.28 \text{ ช})$$

โดย  $k_i$  ( $i = 1, 2$  และ  $3$ ) ถูกกำหนดในสมการที่ 5.27 ช) – ช) และ  $L_S^*$ ,  $C_{ab,S}^*$  และ  $h_{ab,S}$  คือความสว่าง ค่ารังค์ และมุมของเฉดสี (หน่วยเป็นองศา) ตามระบบ CIE ของมาตรฐาน (S) ตามลำดับ

#### 5.2.4 ความแตกต่างของสีตาม CIE ปี 1994 ( $\Delta L^*$ , $\Delta C^*_{ab}$ , $\Delta H^*_{ab}$ ) [8]

ในปี 1989 CIE เห็นด้วยกับการตั้งคณะกรรมการทางเทคนิคศึกษาขอบเขตที่ให้อยู่ในอุตสาหกรรม เพื่อประเมินค่าความแตกต่างระหว่างสีของวัตถุในการฉายแสงตอนกลางวัน และเพื่อพัฒนาการรับรองหัวข้อนี้ ในปี 1992 มีการเสนอเนื้อหา 2 ส่วนที่ยังไม่มีข้อยุติ ส่วนแรกออกรายละเอียดของสูตรความแตกต่างของสีใหม่ และอย่างที่สองสรุปวิธีการสำหรับการรวมการปรับปรุงในอนาคตเข้าด้วยกัน ข้อมูลในอดีตจะถูกใช้ในการพัฒนาสูตรใหม่ ดังนั้น ส่วนนี้ของข้อเสนอทำนายได้ว่า การสร้าง พัฒนาและการแทนที่ของแบบจำลองจะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักร ข้อเสนอนี้ได้ตีพิมพ์เป็นรายงานทางเทคนิคของ CIE ในปี 1995

สูตรส่วนใหญ่ของความแตกต่างของสีมีสมมติฐานว่า ปัจจัยที่สำคัญคือ จุดศูนย์กลางของสี ขนาด และทิศทางของความแตกต่างของสี อย่างไรก็ตาม อิทธิพลอื่นๆมากมายส่งผลต่อการประเมินทางการมองเห็น เช่น ธรรมชาติของสารสีตัวอย่าง และเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการวัด เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ได้รับการยอมรับอย่างเต็มที่ที่เป็นครั้งแรก และปัจจัยที่รวมในสูตรใหม่ถูกนำมาคำนวณด้วย ถึงแม้การยอมรับว่า มันเป็นไปได้ที่จะรวมทุกผลกระทบ เงื่อนไขพื้นฐานต่างๆถูกระบุอยู่ในสูตรใหม่ การกำหนดค่าภายใต้เงื่อนไขอื่นๆคาดว่า จะเป็นส่วนของวิธีการการปรับปรุงสูตรในอนาคต เงื่อนไขพื้นฐานโดยทั่วไปที่เกี่ยวข้องในการประเมินความแตกต่างของสีในอุตสาหกรรมได้แก่

- (1) ชิ้นงานที่มีสีเหมือนกันทั้งชิ้นงาน (homogeneous in color)
- (2) ความแตกต่างของสีอยู่ที่  $\Delta E_{ab}^* \leq 5$
- (3) ชิ้นงานถูกวางให้ขอบสัมผัสโดยตรง
- (4) ขอบเขตมุมมองของผู้ประเมินที่มุมมากกว่า  $4^\circ$
- (5) การมองเห็นสีของผู้ประเมินปกติ
- (6) ใช้การฉายแสงที่ 1000 lux ไปที่วัตถุ ขณะที่สภาพแวดล้อมเป็นสีเทาที่มีความสม่ำเสมอที่  $L^* = 50$  ภายใต้ illuminant  $D_{65}$

พื้นฐานของสูตรใหม่คือ สูตรความแตกต่างของ CIELAB คณะกรรมการคำนึงถึงความสำคัญของทั้งการยอมรับอย่างกว้างขวางของสูตรเหล่านี้ และการรวมความสัมพันธ์ทางการรับรู้ของความแตกต่างของความสว่าง ค่ารงค์ และเฉดสี สูตรนี้เป็นสูตรสำหรับการประเมินค่าความแตกต่างของสีเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถแทนที่ CIELAB และ CIELUV ที่เป็นปริภูมิของสีที่มีความสม่ำเสมอทางการรับรู้ทางสีโดยประมาณ มีชื่อย่ออย่างเป็นทางการคือ CIE94 และสัญลักษณ์ของความแตกต่างของสี  $\Delta E_{94}^*$  โดยรวมตัวแปรใหม่ ( $\Delta V$ ) ซึ่งคือขนาดการรับรู้ทางการมองเห็นของความแตกต่างทางสี (visually perceived magnitude of a color difference) ดังสมการที่ 5.29

$$\Delta V = k_E^{-1} \Delta E_{94}^* \quad (5.29)$$

โดย  $k_E$  คือตัวประกอบความไวในการมองเห็น (visual sensitivity factor) ทำให้  $\Delta V = \Delta E_{94}^*$  ภายใต้เงื่อนไขโดยทั่วไปที่ใช้ในการประเมินทางอุตสาหกรรม  $\Delta E_{94}^*$  ในสมการที่ 5.30

$$\Delta E_{94}^* = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.30)$$

โดย  $\Delta L^*$   $\Delta C_{ab}^*$  และ  $\Delta H_{ab}^*$  ตามลำดับคือ ผลต่างของความสว่าง ค่ารงค์ และเฉดสีตาม CIE ระหว่างชิ้นงานกับมาตรฐาน

ตัวแปร  $k_L$   $k_C$  และ  $k_H$  คล้ายกับ  $l$   $c$  และ  $h$  ตามลำดับของสูตร CMC ( $l:c$ ) มีชื่อว่าเป็นตัวประกอบพารามตริก (parametric factor) ภายใต้เงื่อนไขพื้นฐาน  $k_L = k_C = k_H = 1$  ส่วนค่าอื่นๆสามารถปรับเพื่อเป็นส่วนประกอบของแต่ละความแตกต่างของสีที่เป็นอิสระต่อกัน กับการคำนวณความเบี่ยงเบนจากเงื่อนไขพื้นฐาน เช่น การลดลงของความไวต่อความสว่างเมื่อประเมินสีในสิ่งทอด้วยค่า  $k_L = 2$  ( $k_C = k_H = 1$ ) ซึ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าตาม CIE94

ความยาวของแกนของรูปทรงรี ( $S_L$   $S_C$  และ  $S_H$ ) เป็นฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก ทำให้สามารถปรับส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องให้สอดคล้องกับสถานที่ของมาตรฐานในปริภูมิ LAB ตาม CIE แต่มีการกำหนดแตกต่างจาก CMC ( $l:c$ ) ดังในสมการที่ 5.31 ก) – ค)

$$S_L = 1 \quad (5.31 \text{ ก})$$

$$S_C = 1 + 0.045 C_{ab,X}^* \quad (5.31 \text{ ข})$$

$$S_H = 1 + 0.015 C_{ab,X}^* \quad (5.31 \text{ ค})$$

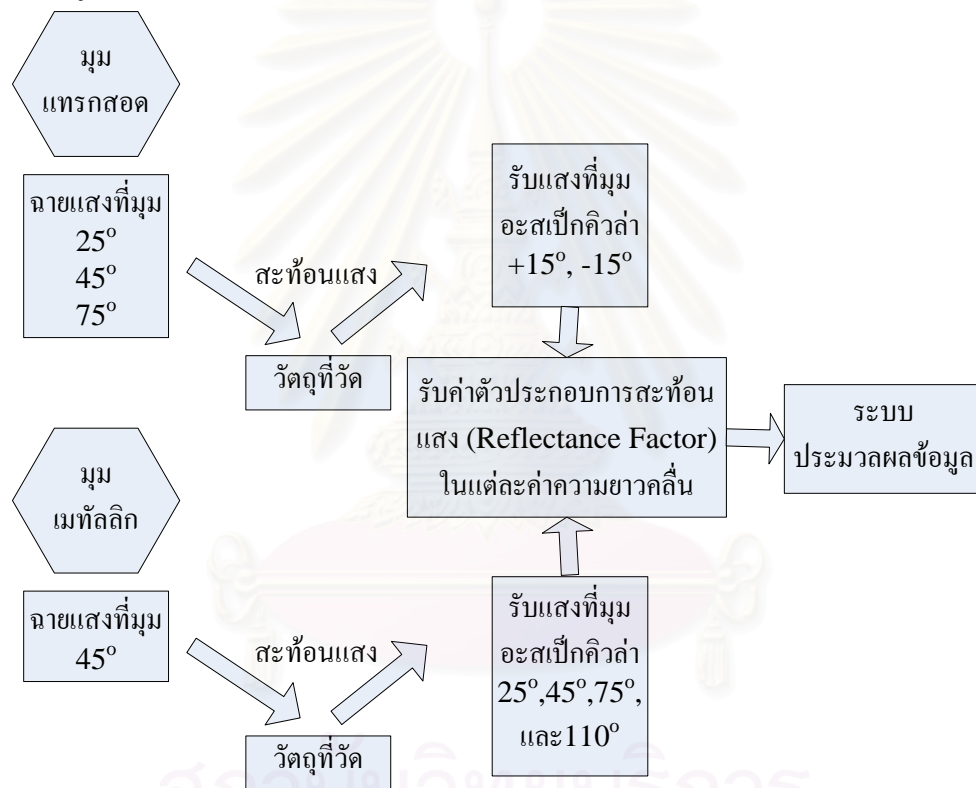
โดย  $C_{ab,X}^* = C_{ab,S}^*$  เมื่อมาตรฐานของคู่ชิ้นงานถูกแยกออกมาจากชุดชิ้นงาน ซึ่งเป็นกรณีทั่วไปของการประเมินค่าการวัดสีทางอุตสาหกรรม ความไม่สมมาตรของสูตรเป็นเหตุให้ความแตกต่างของสีระหว่างคู่ชิ้นงาน (A และ B) เมื่อคำนวณด้วย A เป็นมาตรฐาน จะแตกต่างจากเมื่อ B เป็นมาตรฐาน ความแตกต่างที่ผิดแปลกไปเมื่อไม่มีชิ้นงานใดออกแบบเป็นมาตรฐาน และ  $C_{ab,X}^*$  อาจกำหนดเป็นค่าเฉลี่ยของค่ารงค์ตาม CIELAB ดังสมการที่ 5.32

$$C_{ab,X}^* = (C_{ab,A}^* C_{ab,B}^*)^{1/2} \quad (5.32)$$

## บทที่ 6

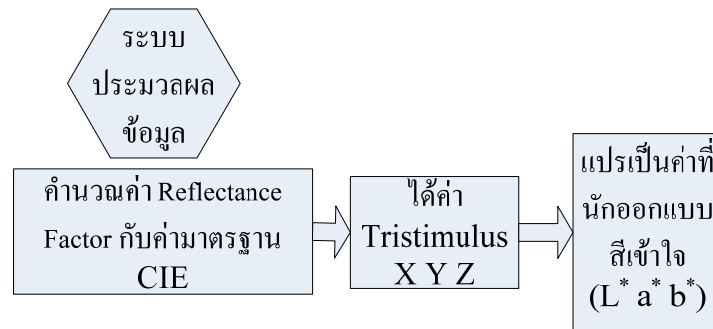
### การออกแบบมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

มัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในอดีตนั้น มีมุมฉายแสงเพียงหนึ่งมุมกับมุมรับแสงหลายมุม หรือมุมรับแสงหนึ่งมุมและมุมฉายแสงหลายมุม ดังเช่นในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ในปัจจุบันได้ทำการเพิ่มมุมฉายแสงและมุมรับแสงขึ้นอีก เพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของสีนั้นๆมากที่สุด โดยการออกแบบการทำงานนั้น เริ่มแรกจะฉายแสงไปที่โมโนโครเมเตอร์ก่อน เมื่อแสงผ่านโมโนโครเมเตอร์จะได้แสงที่มีความยาวคลื่นนั้นๆ แสงเหล่านั้นจะผ่านเลนส์รวมแสง จากนั้นจะเป็นไปตามรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์

รูปที่ 6.1 แสดงการทำงานของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนของฮาร์ดแวร์โดยที่แบ่งเป็นสองส่วนคือ ฉายแสงที่มุมแทรกสอด  $25^\circ$   $45^\circ$  และ  $75^\circ$  และฉายแสงที่มุมเมทัลลิกที่  $45^\circ$  โดยเมื่อฉายแสงไปที่วัตถุแล้วทำการรับแสงที่มุม  $+15^\circ$  และ  $-15^\circ$  ในกรณีของมุมแทรกสอด ส่วนกรณีของมุมเมทัลลิก ทำการรับแสงที่มุม  $+25^\circ$   $+45^\circ$   $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$  โดยแสงที่รับมาจะผ่านเส้นใยนำแสง จากนั้นก็เข้าไปสู่หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photo-Multiplier Tube) จะได้สัญญาณทางไฟฟ้า แล้วแปลงจากสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อประมวลผลข้อมูลต่อไป



รูปที่ 6.2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนที่เป็นซอฟต์แวร์

รูปที่ 6.2 แสดงการทำงานของมัลติแองเกิ้ลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนของซอฟต์แวร์ โดยภายในระบบประมวลผลนั้น จะนำค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่ได้ไปแปรเป็นค่าไตรสติมูลัส  $X$   $Y$  และ  $Z$  ซึ่งเป็นค่าตามมาตรฐาน CIE แต่เนื่องจากระบบนี้ไม่สมดุล จึงนำค่าไตรสติมูลัส  $X$   $Y$  และ  $Z$  ไปแปลงเป็นระบบ  $L^*$   $a^*$   $b^*$  ตาม CIE ซึ่งมีความสมดุลและเข้าใจได้ง่ายกว่า

### 6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดสี

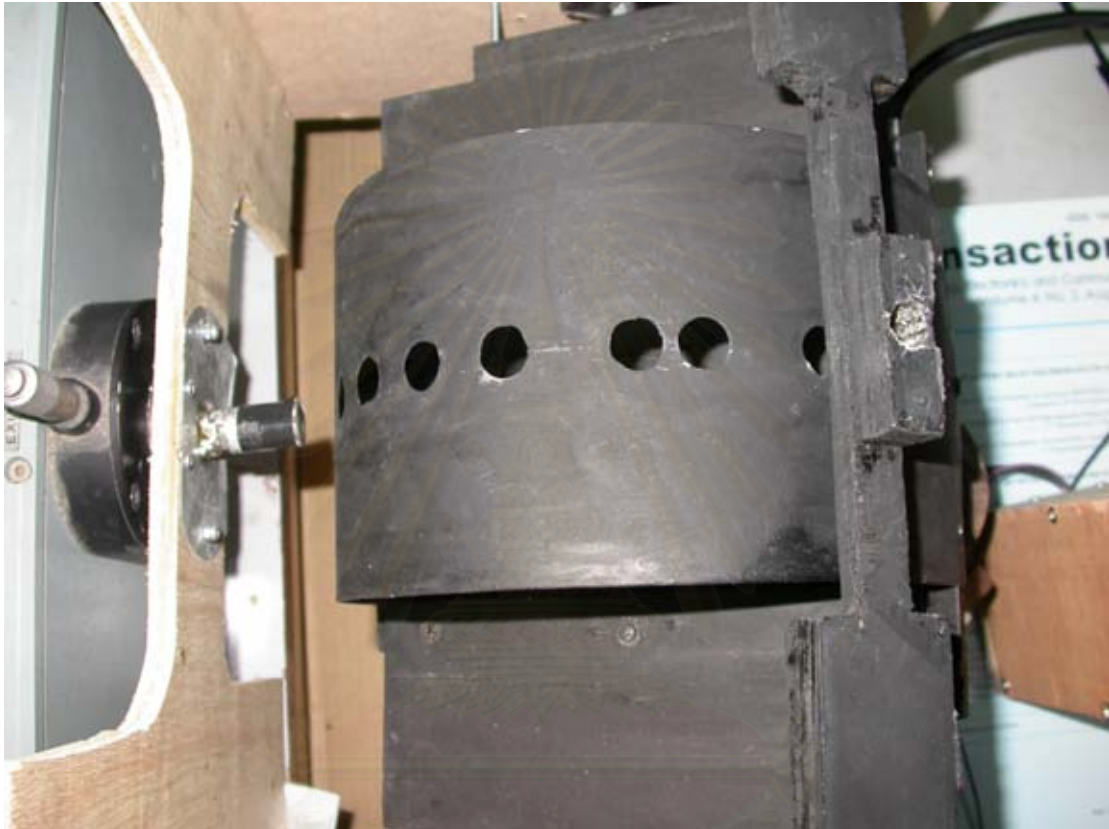
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวัดสีประกอบด้วย

- (1) หลอดฮาโลเจนที่อุณหภูมิสีเทียบเคียง 6000 K ที่กำลังงาน 60 W และแรงดัน 12 โวลต์ ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 หลอดฮาโลเจนไฟหน้ารถยนต์ที่อุณหภูมิสีเทียบเคียง 6000 K ที่กำลังงาน 60 W พร้อมชุดระบายความร้อน (พัดลมระบายอากาศ 2 ตัว)

- (2) โมโนโครเมเตอร์
- (3) เลนส์นูน (ความยาวโฟกัส 1.4 เซนติเมตร)
- (4) ชุดรับและแยกแสงได้หลายมุมโดยช่องรับแสงจากโมโนโครเมเตอร์ และช่องส่งแสงไปที่เส้นใยนำแสงดังรูปที่ 6.4 ก) (มองจากด้านบน) พร้อมด้วยที่ใส่แผ่นสียตัวอย่างในรูปที่ 6.4 ข) (มองจากด้านหน้า) และช่องที่ให้แสงผ่านไปตกกระทบบนแผ่นสีย (ขนาดของช่อง  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ) ดังรูปที่ 6.4 ค) (มองจากด้านล่าง)

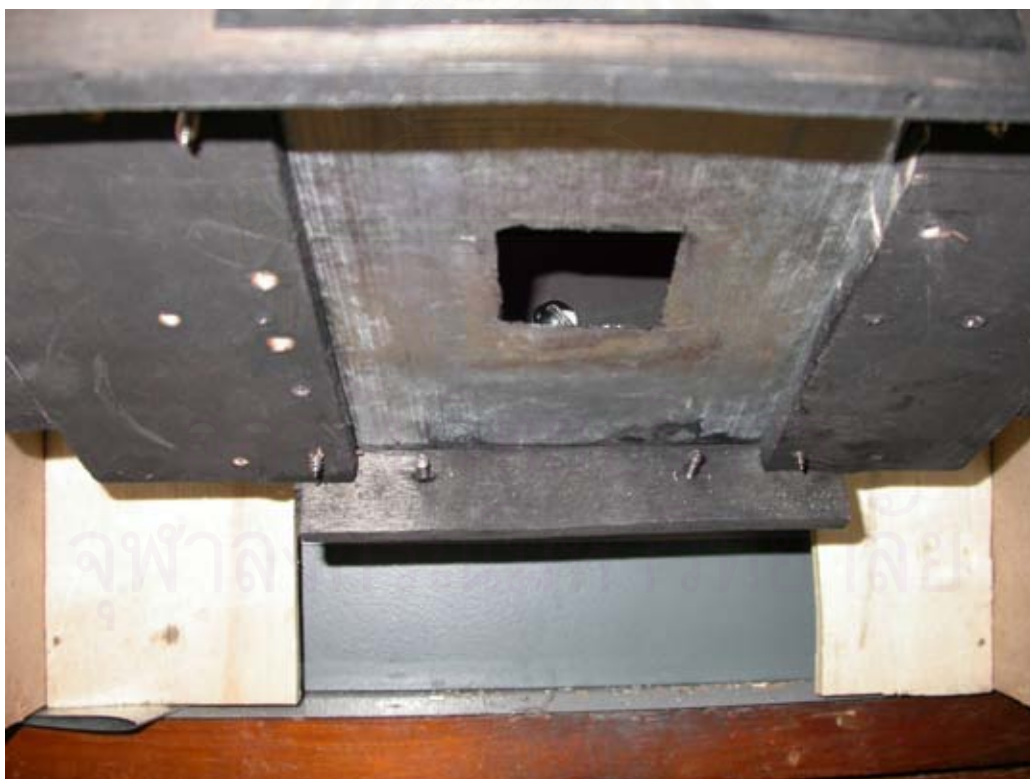


รูปที่ 6.4 ก) ชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านบน) โดยรับแสงจากโมโนโครเมเตอร์ (จากมุม  $25^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $75^\circ$ ) และแยกแสงไปที่มุมอะสเปคคิวลาร์ ( $\pm 15^\circ$ ,  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$ )

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 ข) ที่ใส่แผ่นสีของชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านหน้า)



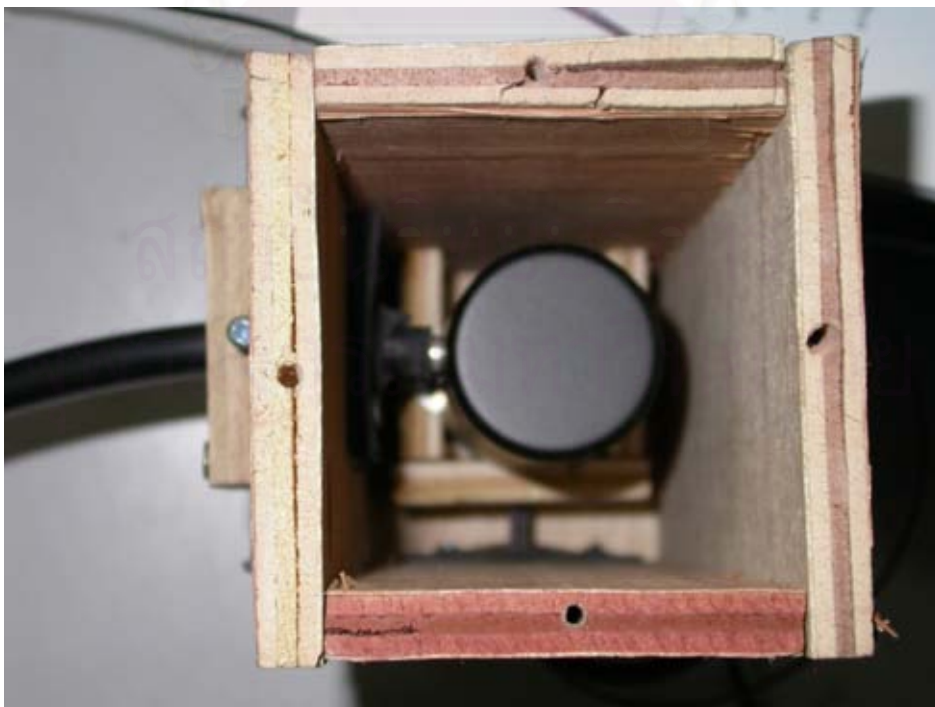
รูปที่ 6.4 ค) ช่องที่ให้แสงผ่านไปตกกระทบบนแผ่นสี (ขนาดของช่อง  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ) ของชุดรับและแยกแสง (มองจากด้านล่าง)



- (5) เส้นใยนำแสงดังรูปที่ 6.5 โดยที่ปลายใช้สังกะสีเพื่อติดตั้งกับชุดรับและแยกแสง จะได้เส้นทางเดินแสงที่ตั้งฉากกับผิวโค้งด้านบนของชุดรับและแยกแสง
- (6) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (R3896) พร้อมด้วยที่ครอบป้องกันสนามแม่เหล็ก (magnetic shield, E989) จากบริษัท Hamamatsu ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 เส้นใยนำแสงขณะปลายหนึ่งติดกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ส่วนปลายอีกด้านติดด้วยสังกะสี



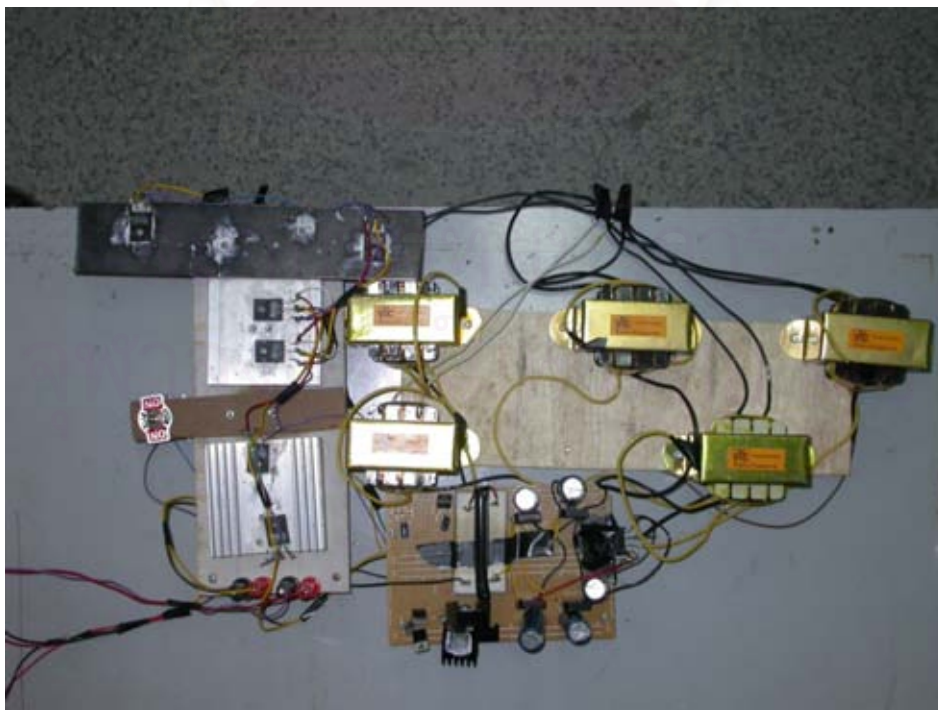
รูปที่ 6.6 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (R3896) พร้อมด้วยที่ครอบป้องกันสนามแม่เหล็ก (E989)

- (7) เครื่องจ่ายกำลังไฟตรงแรงดันสูง โดยจ่ายให้หลอดไฟโคมัลติฟลายเออร์ที่แรงดัน 800 V ripple  $\approx$  2-3 โวลต์ ( $\approx$  0.4%) ในขณะที่ใช้งานกด lock เพื่อรักษาระดับแรงดัน ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 เครื่องจ่ายกำลังไฟตรงแรงดันสูงโดยจ่ายให้หลอดไฟโคมัลติฟลายเออร์ที่แรงดัน 800 V

- (8) แหล่งจ่ายกำลังไฟตรงสำหรับหลอดฮาโลเจน โดยมีแรงดันไฟตรง 12 V และกระแส 5 A ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 แหล่งจ่ายกำลังไฟตรงสำหรับหลอดฮาโลเจน โดยมีแรงดันไฟตรง 12 V และกระแส 5 A

- (8) เซรามิกที่ใช้ในการเทียบสีเพื่อหาค่าตัวประกอบการสะท้อนแสง ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 เซรามิกที่ใช้ในการทดลองเทียบสี

- (9) แผ่นสี 43 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 แผ่นสี 43 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

โดยที่แต่ละสีมีที่มาตามแค็ตตาล็อกของ BICBEN, NIPPON และ KANSAI PAINT

ดังนี้

- |     |        |        |                          |
|-----|--------|--------|--------------------------|
| (1) | Isuzu  | PT682  | จาก แค็ตตาล็อกของ BICBEN |
| (2) | Nissan | BKR4   | จาก แค็ตตาล็อกของ BICBEN |
| (3) | Nissan | 61M    | จาก แค็ตตาล็อกของ BICBEN |
| (4) | Honda  | NH623M | จาก แค็ตตาล็อกของ BICBEN |
| (5) | Nissan | GG1M   | จาก แค็ตตาล็อกของ BICBEN |

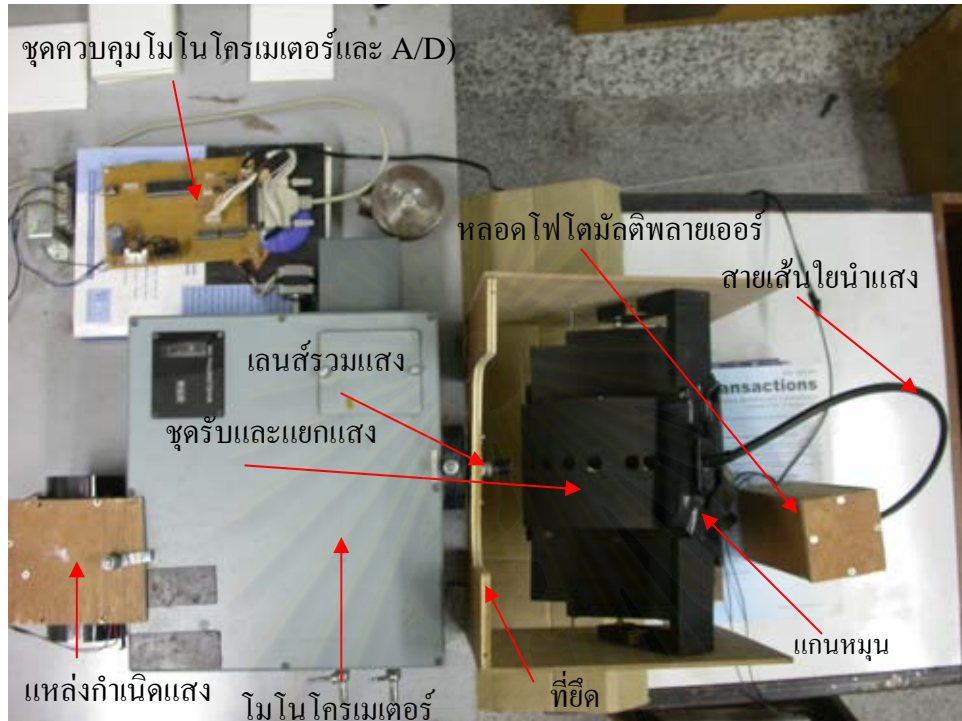
(6)	Toyota	T-1D0	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(7)	Honda	NH537M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(8)	Mitsubishi	A69	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(9)	Honda	H183M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(10)	Isuzu	PT059	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(11)	Nissan	BB1M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(12)	Toyota	T-587	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(13)	Mitsubishi	A26	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(14)	Honda	YR538M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(15)	Nissan	CM1	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(16)	BMW	245	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(17)	Benz	272	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(18)	Nissan	GD1P	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(19)	Toyota	T-6P4	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(20)	Standard	TN-74023	จาก เค็ตตาล็อกของ KANSAI
(21)	Toyota	T-8P4	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(22)	Toyota	T-8H8	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(23)	Toyota	869 Met.	จาก เค็ตตาล็อกของ NIPPON
(24)	Nissan	BG3M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(25)	Toyota	T-8P1	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(26)	Nissan	719 Met.	จาก เค็ตตาล็อกของ NIPPON
(27)	Benz	256	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(28)	Honda	NH612M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(29)	Benz	348	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(30)	Chevrolet	45-5083	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(31)	BMW	310	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(32)	Toyota	T-204	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(33)	Chevrolet	Z282	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(34)	Isuzu	PT066	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(35)	Standard	9920	จาก เค็ตตาล็อกของ KANSAI
(36)	Honda	B91M	จาก เค็ตตาล็อกของ BICBEN
(37)	Toyota	8C7 Met.	จาก เค็ตตาล็อกของ NIPPON

(38)	Mazda	6Z	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN
(39)	Isuzu	PT645	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN
(40)	Honda	RP28P	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN
(41)	Nissan	APO	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN
(42)	Honda	R522P	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN
(43)	Honda	R82P	จาก เค็ดตาลีอกของ BICBEN

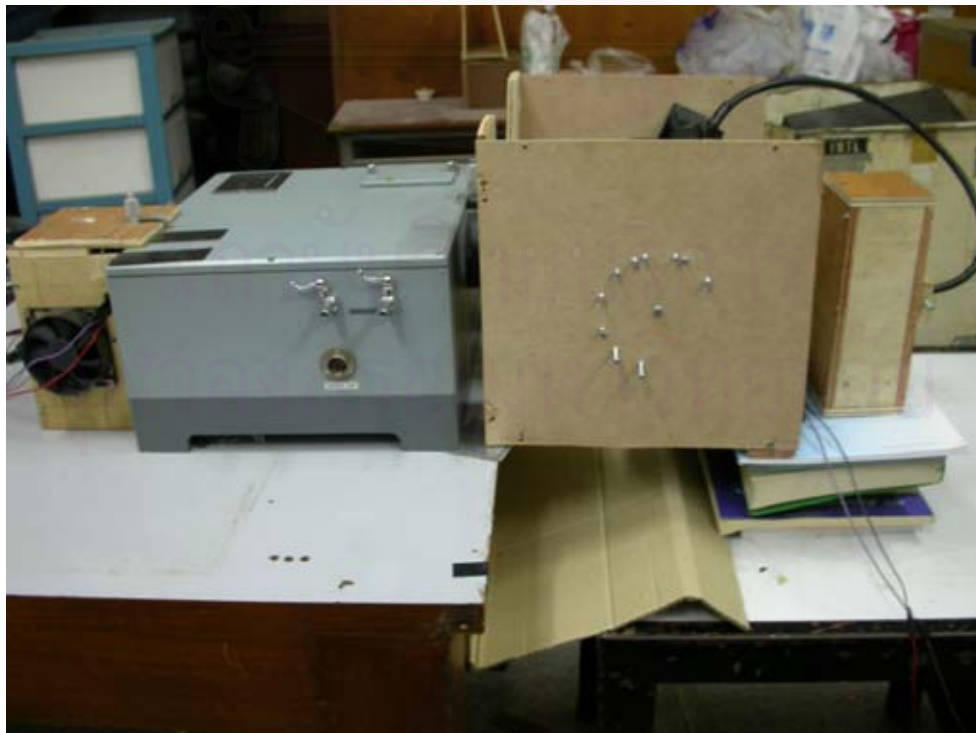
### 6.3 วิธีการทดลอง

เนื่องจากห้องทดลองไม่ใช่ห้องมืดสนิท แสงจากภายนอกไม่ว่าจะเป็นแสงไฟจากภายนอกหรือแสงจันทร์ส่งผลต่อค่ากระแสมืด (dark current) ถึงแม้ว่าจะใช้ผ้าสีดำคลุมก็ตาม เนื่องจากระบบที่ทดลองไม่ใช่ระบบปิด 100% เพื่อให้ง่ายต่อการเปลี่ยนตัวอย่างสี ดังนั้นการทดลองจึงเริ่มวัดสีเมื่อเวลาประมาณ 22.00 และใน 1 คืนจะวัดได้เพียงหนึ่งมุม เพราะชุดการทดลองที่ใช้โมโนโครเมเตอร์ซึ่งมี grating ชุดเดียว ทำให้ต้องใช้เวลาวัดทั้ง 43 ตัวอย่างต่อ 1 มุม ประมาณ 5 – 6 ชั่วโมง เริ่มแรกทำการเปิดเครื่องจ่ายกำลังไฟตรงแรงดันสูงและแหล่งจ่ายกำลังไฟตรงสำหรับหลอดฮาโลเจน เพื่อให้เครื่องอุ่นประมาณ 10 นาทีก่อนเวลาวัด เพื่อขณะวัดค่าจะได้ค่าที่คงที่ ตั้งค่าแรงดันที่เครื่องจ่ายกำลังไฟตรงแรงดันสูงให้เป็น 800V จากนั้นคลุมผ้าดำ แล้วปิดไฟให้มืด ปิดแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้หลอดฮาโลเจน หลังจากมืดแล้วจ่ายแรงดัน 800V ให้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ วัดค่ากระแสมืด หลังจากนั้นนำเอาแผ่นเซรามิกมาใส่ในชุดรับและแยกแสง เพื่อทำการปรับให้ได้เท่าๆเดิมก่อนจะวัด ผลัดเปลี่ยนวัดสีไปเรื่อยๆจนครบ 43 ตัวอย่าง โดยระหว่างเปลี่ยนแผ่น ต้องทำการหยุดจ่ายไฟให้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ เพื่อป้องกันหลอดเสียหายจากรูปที่ 6.11 ก) (มองจากด้านบน) จะพบแหล่งจ่ายไฟอยู่ทางซ้ายล่างของภาพด้านบนซ้าย เป็นชุดอุปกรณ์ควบคุมโมโนโครเมเตอร์ และส่วนของ A/D ด้วย ส่วนด้านซ้ายเป็นชุดทดลองวัดสี โดยประกอบด้วยแกนเลือกมุม (แกนสีดำด้านบนที่มีสายเส้นใยนำแสงติดตั้งอยู่) ชุดรับและแยกแสง (เหมือนในรูป 6.4 ก) ) และที่ล้อมรอบชุดแยกและรับแสงคือ ที่ยึดและมีไว้เพื่อยึดและหมุนชุดรับและแยกแสงกับแกนเลือกมุม โดยแกนนี้สามารถหมุนได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถรับแสงได้ที่มุมที่ต้องการ ส่วนที่ตัวชุดรับและแยกแสงนั้นสามารถหมุนได้ ทำให้เลือกมุมรับแสงได้ทั้ง 25°, 45° และ 75° โดยทั้งแกนหมุนและชุดรับและแยกแสงนั้น เมื่อเลือกมุมที่ต้องการแล้ว ที่ด้านข้างดังรูปที่ 6.11 ข) และ 6.11 ค) (มองจากด้านข้าง) จะใช้น็อตที่ตั่งไว้สำหรับทุกมุมที่จะใช้วัดสีเป็นตัวยึด เพื่อไม่ให้แผ่นที่วัดขยับระหว่างการวัด และที่ด้านหน้าของที่ยึดจะเห็นว่า มีท่อส่งกะสีออกมา ซึ่งก็คือท่อใส่เลนส์ ส่วนขวามือสุดของภาพก็คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และส่วนประกอบอื่นๆ เพื่อป้องกันแสงเข้าถึงตัวหลอดโดยทางอื่นที่ไม่ใช่ไฟเบอร์ออปติก ในรูปที่ 6.11 ค) จะเห็นว่า มีชุดที่ควบคุมโมโนโครเมเตอร์ เพื่อให้หมุนอัตโนมัติตามโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 6.12 โดยโปรแกรมนี้ใช้ในการควบคุมโมโนโครเมเตอร์และ A/D อีกด้วย โดยค่าที่วัดได้จะถูกแปรค่า

เป็น ค่าดิจิทัล ซึ่งสามารถนำมาประมวลผลได้ ในการทดลองนี้ จะวัดจาก 400 นาโนเมตร จนถึง 780 นาโนเมตร และบันทึกค่าแรงดันทุกๆ 5 นาโนเมตร โดยวัด 10 ครั้ง



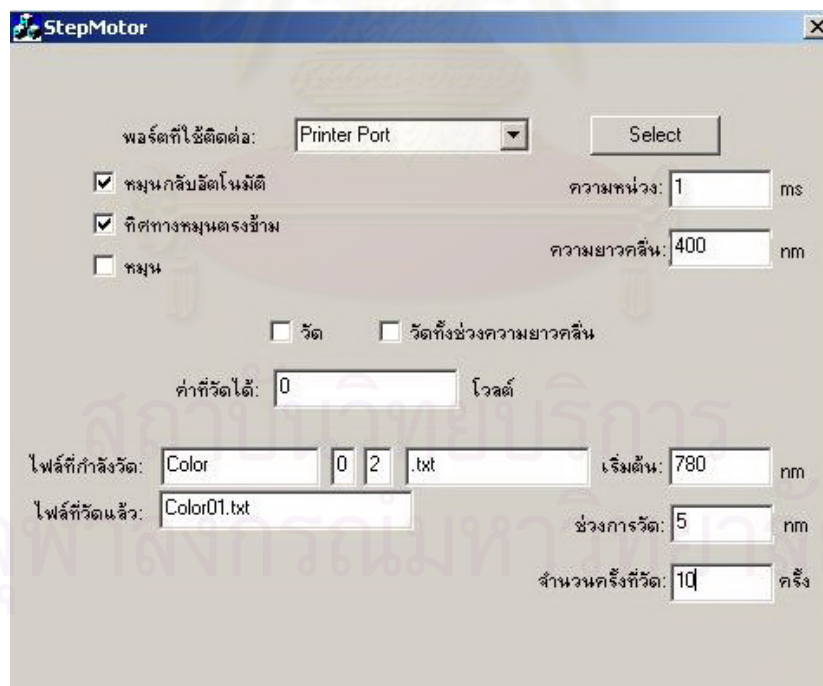
รูปที่ 6.11 ก) ชุดทดลอง (มองด้านบน)



รูปที่ 6.11 ข) ชุดทดลอง (มองด้านข้าง)



รูปที่ 6.11 ค) ชุดทดลอง (มองด้านข้าง) พร้อมด้วยชุดควบคุมโมโนโครเมเตอร์



รูปที่ 6.12 ภาพหน้าจอโปรแกรมในการควบคุมโมโนโครเมเตอร์และ A/D

## 6.4 ผลการคำนวณ

### 6.4.1 การคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1931 โดยผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐาน

เราสามารถคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1931 ได้จากสมการที่ 6.1 ก) – ค)

$$X = k \sum_{\lambda=400}^{780} \bar{x}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.1 \text{ ก})$$

$$Y = k \sum_{\lambda=400}^{780} \bar{y}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.1 \text{ ข})$$

$$Z = k \sum_{\lambda=400}^{780} \bar{z}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.1 \text{ ค})$$

โดยค่า  $\bar{x}(\lambda)$   $\bar{y}(\lambda)$  และ  $\bar{z}(\lambda)$  คือค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1931 โดยผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน ( $2^\circ$ )  $R(\lambda)$  คือค่าตัวประกอบการสะท้อนแสง  $S(\lambda)$  คือค่าการกระจายกำลังแสงเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ของ illuminants มาตรฐานตาม CIE

$k$  คือ ค่า normalization factor โดย  $k = \frac{100}{\sum_{\lambda=400}^{780} \bar{y}(\lambda)S(\lambda)}$

### 6.4.2 การคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1964 โดยผู้สังเกตการณ์การวัดสีมาตรฐานเสริม

เราสามารถคำนวณค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1964 ได้จากสมการที่ 6.2 ก) – ค)

$$X_{10} = k_{10} \sum_{\lambda=400}^{780} x_{10}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.2 \text{ ก})$$

$$Y_{10} = k_{10} \sum_{\lambda=400}^{780} y_{10}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.2 \text{ ข})$$

$$Z_{10} = k_{10} \sum_{\lambda=400}^{780} z_{10}(\lambda)R(\lambda)S(\lambda) \quad (6.2 \text{ ค})$$

โดยค่า  $x_{10}(\lambda)$   $y_{10}(\lambda)$  และ  $z_{10}(\lambda)$  คือค่าไตรสติมูลัสตาม CIE ปี 1964 โดยผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน ( $10^\circ$ )  $R(\lambda)$  คือค่าตัวประกอบการสะท้อนแสง  $S(\lambda)$  คือ ค่าการกระจายกำลังแสงเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ของ illuminants มาตรฐานตาม CIE

$k_{10}$  คือ ค่า normalization factor โดย  $k_{10} = \frac{100}{\sum_{\lambda=400}^{780} y_{10}(\lambda)S(\lambda)}$

เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงไม่ใช่หลอดซีนอนที่ถูกอัดด้วยความดันอากาศสูง แต่เป็นเพียงหลอดฮาโลเจน ดังนั้น ที่ค่าความยาวคลื่น 380 ถึง 395 นาโนเมตร เราจึงไม่สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากปริมาณแสงที่วัดได้มีค่าน้อยเกินไป แต่จากค่าฟังก์ชันเทียบสีในตารางที่ 2.4 และ 2.6 พบว่ามีค่าน้อยมาก ดังนั้นการเริ่มวัดที่ 400 นาโนเมตรก็ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าที่ต้องการ

ในการคำนวณค่าไตรสติมูลัส จะต้องเลือก illuminants ที่จะพิจารณา โดยในการทดลองเลือก illuminants A และ D<sub>65</sub> ซึ่งใช้ค่า  $S(\lambda)$  ดังตารางที่ 2.1 เมื่อได้ค่าไตรสติมูลัสที่ต้องการแล้ว

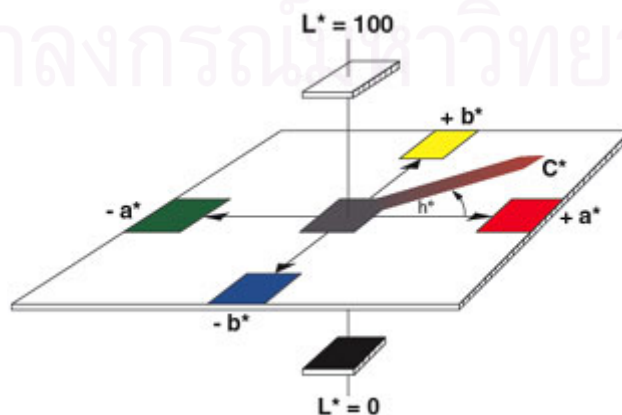


ทั้งกรณีตาม CIE ปี 1931 หรือ CIE ปี 1964 นำค่าที่ได้แปลงไปเป็นค่าในปริภูมิสี CIELAB โดยใช้สมการที่ 5.11 ก) – ข) ในกรณีของ  $L^*$  และสมการที่ 5.12 ก) – ข) ในกรณีของ  $a^*$  และ  $b^*$  หลังจากนั้น ก็หาค่าที่ยอมรับได้ โดยในที่นี้จะใช้ค่า  $\Delta E_{ab}^*$  ในสมการที่ 5.19 ถึงแม้  $\Delta E_{ab}^*$  จะไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากที่กล่าวมา อาจมีทั้ง  $\Delta E_{CMC(l:c)}$  และ  $\Delta E_{94}^*$  แต่เนื่องจากทั้ง 2 กรณีนี้เป็นการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม สำหรับงานวิจัยนี้กับสารสีตัวอย่างที่มี ยังไม่จำเป็นต้องใช้ค่าเหล่านั้น เพราะว่าทั้ง 2 กรณีนี้เป็นการกำหนดตัวแปรที่ควบคุมตามเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับสารสีมาตรฐาน ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ ดังนั้น จึงใช้  $\Delta E_{ab}^*$  ซึ่งสัมพันธ์กับปริภูมิสี CIELAB จากการทดลองเป็นการวัดสีขึ้นเดิม 10 ครั้ง เพราะฉะนั้นจึงไม่ได้นำมาเทียบกับสีมาตรฐานแบบในอุตสาหกรรม การหา  $\Delta E_{ab}^*$  เป็นเพียงการตรวจสอบค่าความผิดพลาดจากการวัดของเครื่องมือและอื่นๆ โดยค่าที่นำเสนอจะเป็นค่าสูงสุด ซึ่งเกิดจากการเทียบกับค่าเฉลี่ยว่าผิดพลาดสูงสุดเท่าใด (ความแตกต่างของสีเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ย) นอกจากนี้แล้ว ยังมีค่า MCDM (Mean color difference from the mean) ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของสี โดยเทียบกับค่าเฉลี่ยของชุดสีงานนั้น (ไม่ได้เทียบกับมาตรฐาน) ดังสมการที่ 6.3 ในปริภูมิสี CIELAB ดังนี้

$$MCDM = \frac{\sum_{i=1}^N [(L_i^* - L_{mean}^*)^2 + (a_i^* - a_{mean}^*)^2 + (b_i^* - b_{mean}^*)^2]^{1/2}}{N} \quad (6.3)$$

โดยที่ N คือ จำนวนครั้งที่วัด

รูปสามมิติแสดงโครงสร้างของปริภูมิสี CIELAB เพื่อให้เข้าใจผลจากการคำนวณง่ายขึ้น ดังรูปที่ 6.14 โดยจากภาพค่า  $L^*$  บอกรความเป็นสีดำจนถึงสีขาวในช่วง  $0 \leq L^* \leq 100$  ขณะที่  $a^*$  บอกรความเป็นสีแดงหรือเขียว โดยถ้า  $a^*$  มากกว่า 0 จะเป็นสีแดง และในทางตรงข้ามเป็นสีเขียว ในทำนองเดียวกัน  $b^*$  บอกรความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน โดยถ้า  $b^*$  มีค่าเป็นลบจะเป็นสีน้ำเงิน ถ้าเป็นบวกจะเป็นสีเหลือง ขณะที่  $C_{ab}^*$  บอกรค่ารงค์ ซึ่งแสดงความเด่นชัดในสีนั้นๆว่ามากหรือน้อย ถ้ามากจะบอกรสีนั้นๆได้อย่างชัดเจน ถ้าน้อยจะเข้าใกล้แกนกลางซึ่งเป็นสีเทา ขณะที่มุม  $h_{ab}$  แสดงทิศทางของสีว่าอยู่ quadrant อะไร ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงเฉดสีได้ โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา



รูปที่ 6.13 โครงสร้างของปริภูมิสี CIELAB

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

ในการทดลอง ได้ทำการวัดสเปกตรัมทั้งหมด 43 ตัวอย่าง มีทั้งแบบลูซิเต้ (Lucite) (ส่วนมาก) และแบบธรรมดา โดยได้วัดค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงทั้ง 10 มุมของทุกตัวอย่าง แต่เนื่องจากทำได้เพียงวันละมุม ดังนั้นทำให้ค่ากระแสไม่เท่ากันในแต่ละวัน นอกจากนั้นระยะเวลาในการทำค่อนข้างนานมาก (5 ถึง 6 ชั่วโมง) ในการวัดทุกตัวอย่างนั้น เมื่อได้ค่าอัตราการสะท้อนก็นำไปแปลงเป็นค่าไตรสติมิลัส ทั้งแบบผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตาม CIE ปี 1931 และ CIE ปี 1964 และทั้ง illuminant มาตรฐานตาม CIE แบบ A และ D<sub>65</sub> โดยมุมที่ใช้วัดเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM (American Society for Testing and Materials) และ A/D ที่เลือกใช้มีขนาด 12 บิต ใช้ R ขนาด 20 K $\Omega$  ในการแปลงกระแสที่ได้จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ไปเป็นแรงดัน

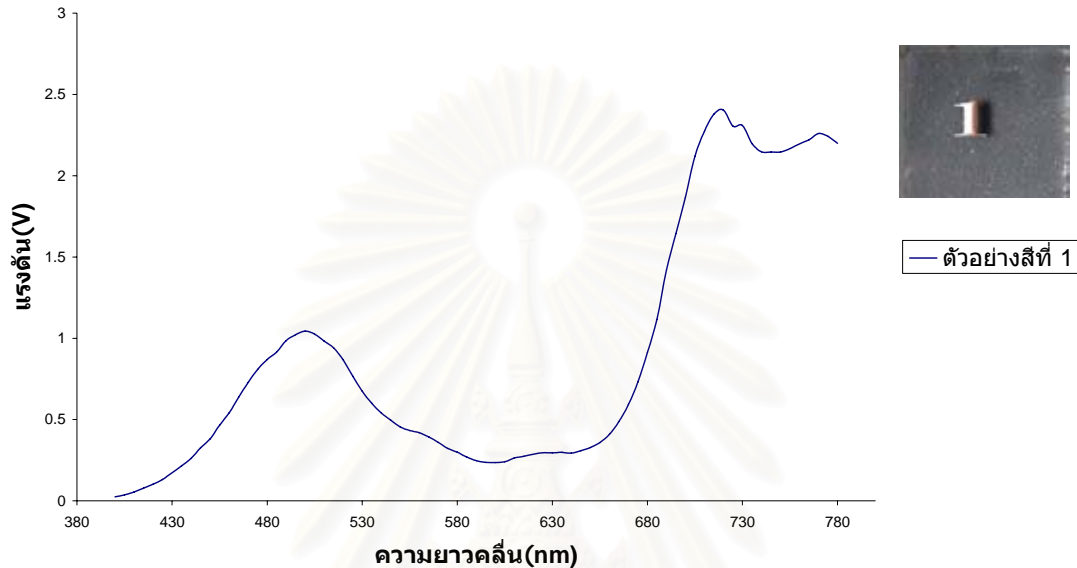
รูปที่ 7.1 แสดงสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนจากเซรามิกสีขาว ที่มุมฉายแสง 45° และมุมรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์ +45 จาก 400 ถึง 780 นาโนเมตร โดยนำค่าเฉลี่ยการวัด 10 ครั้งมาแสดงเป็นกราฟ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนในงานวิจัยนี้ โดยกำหนดให้มีความสว่างเท่ากับ 100% เนื่องจากไม่สามารถหาตัวสะท้อนแบบกระจายแสงมาตรฐานได้ และในปัจจุบัน ตัวสะท้อนนี้ส่วนใหญ่จะเทียบกับเครื่องมือที่ฉายแสงที่ 45° แล้วรับแสงที่มุม 90° (อะสเปกคิวลาร์ +45°) ถ้าสามารถหาได้ในอนาคต ก็เพียงเปลี่ยนตัวหารเทียบ ก็จะได้ค่าไตรสติมิลัสที่ถูกต้องยิ่งขึ้น



รูปที่ 7.1 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่สะท้อนจากเซรามิกที่มุมอะสเปกคิวลาร์ +45° เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

รูปที่ 7.2 ถึง 7.6 แสดงสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างที่ 1, 16, 21, 31 และ 35 ที่มุมฉายแสง  $45^\circ$  และมุมรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  จาก 400 ถึง 780 นาโนเมตร ตามลำดับโดยนำค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้งมาแสดงเป็นกราฟ โดยเลือกชิ้นงานที่น่าจะมีความแตกต่างกันทางสเปกตรัมอย่างเห็นได้ชัด

ตัวอย่างสีที่ 1



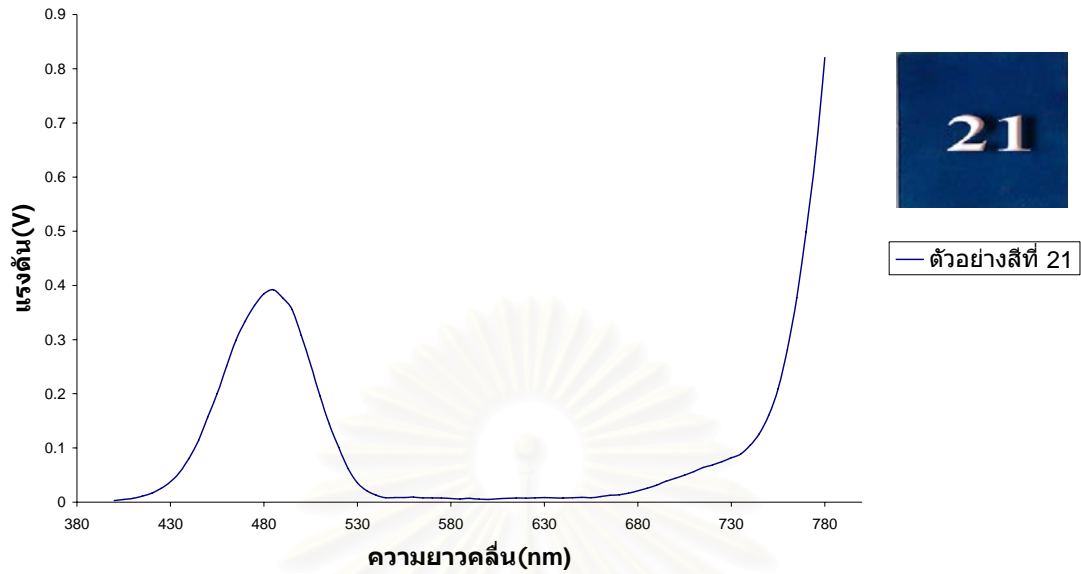
รูปที่ 7.2 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 1 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

ตัวอย่างสีที่ 16



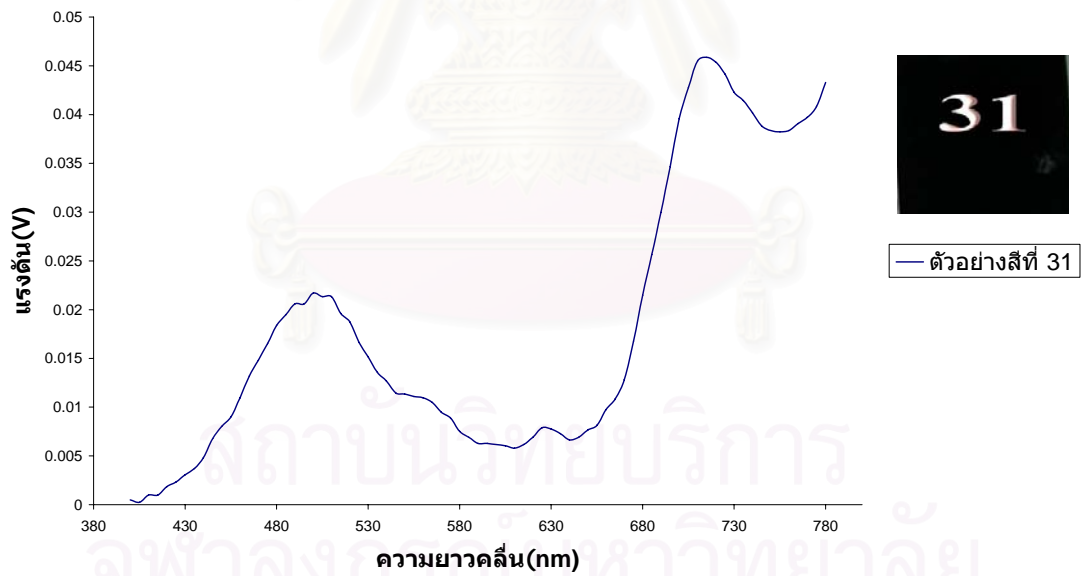
รูปที่ 7.3 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 16 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

ตัวอย่างสีที่ 21



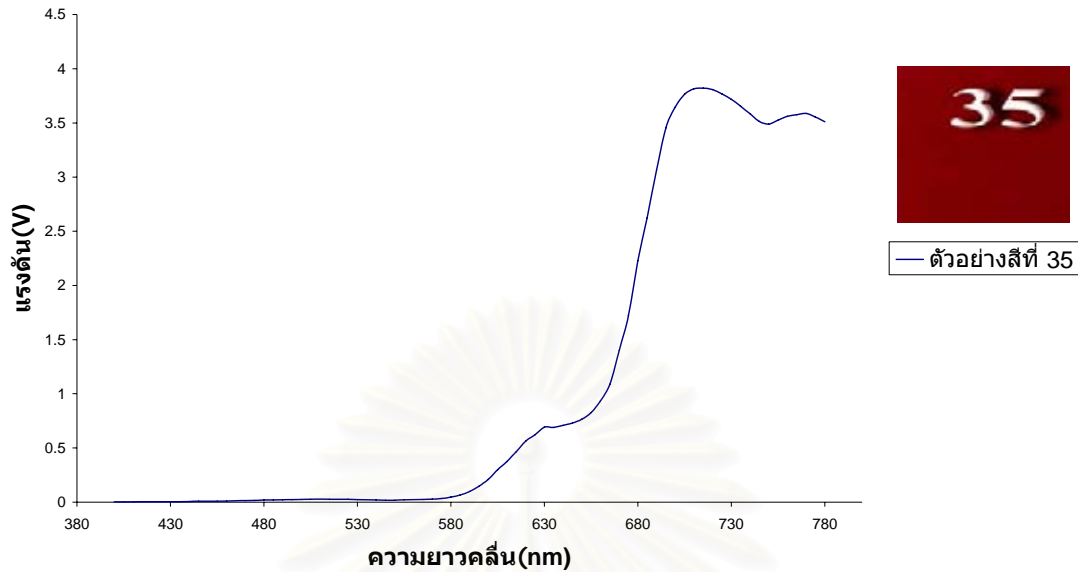
รูปที่ 7.4 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 21 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

ตัวอย่างสีที่ 31



รูปที่ 7.5 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 31 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

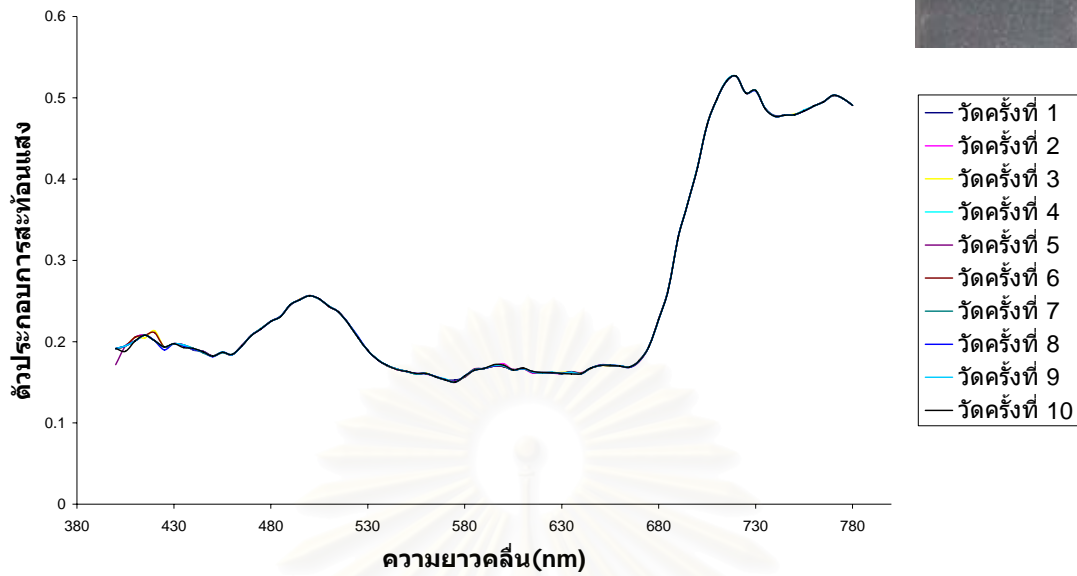
ตัวอย่างสีที่ 35



รูปที่ 7.6 แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 35 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

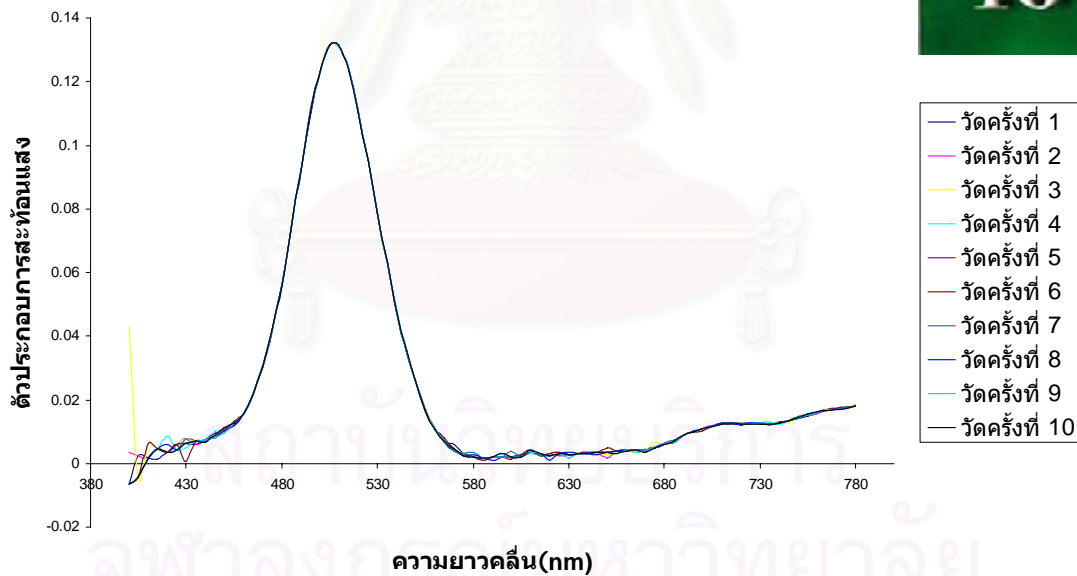
รูปที่ 7.7 ถึง 7.11 แสดงค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 1, 16, 21, 31 และ 35 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  โดยเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่รับแสงที่สะท้อนจากเซรามิกที่เงื่อนไขเดียวกันในแต่ละความยาวคลื่น จากการวัดทั้ง 10 ครั้งโดยไม่เคลื่อนสีตัวอย่าง ปรากฏว่าความสัมพันธ์ของทุกรูปสังเกตได้จากความแตกต่างของสีในการวัดแต่ละครั้ง เมื่อมีค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความแตกต่างของสีที่มีค่าสูงกว่า ( $\Delta E_{ab}^*$  มีค่าสูงกว่า) ดังในรูปที่ 7.10 ซึ่งเป็นสีดำ จะมีความแตกต่างของสีสูงกว่า ขณะที่ตัวอย่างที่ 1 และ 35 จะมีความแตกต่างของสีต่ำกว่า ดังในรูปที่ 7.7 และ 7.11 เพราะที่ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงค่าต่ำๆ จะมีผลของสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะเกิดจากเครื่องจ่ายกำลังไฟตรงทั้งของหลอดฮาโลเจนและหลอดโฟโตมัลติฟลายเออร์ หรือมาจาก A/D

สีตัวอย่างที่ 1



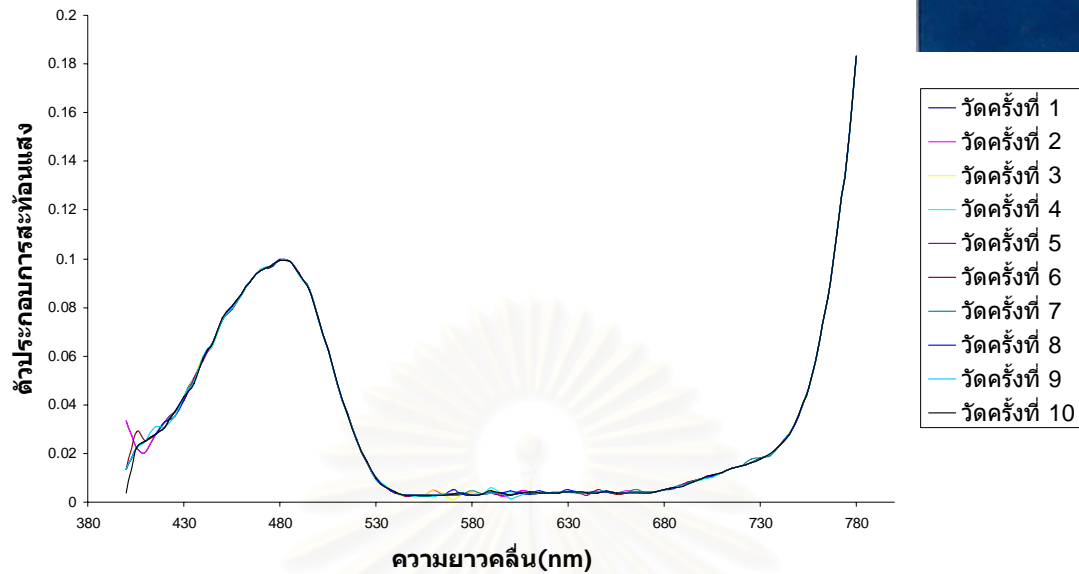
รูปที่ 7.7 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 1 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

สีตัวอย่างที่ 16



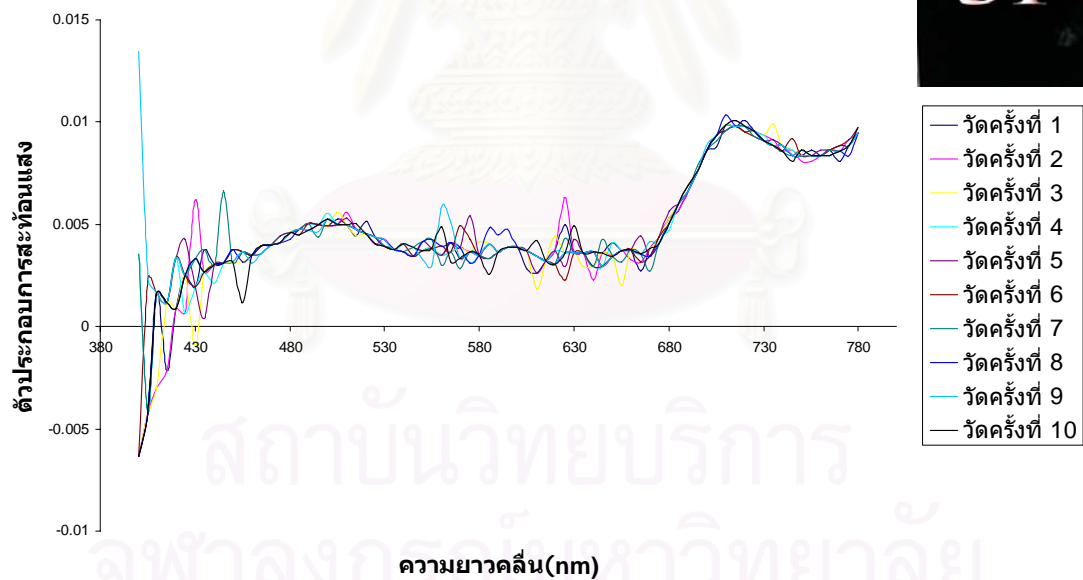
รูปที่ 7.8 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 16 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

สีตัวอย่างที่ 21



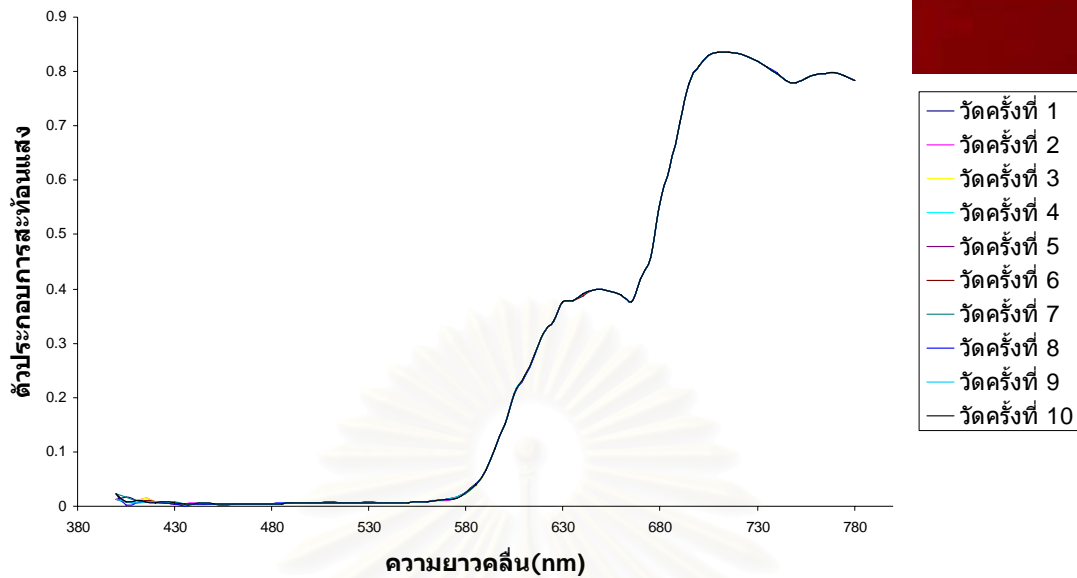
รูปที่ 7.9 ค่าของตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 21 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

สีตัวอย่างที่ 31



รูปที่ 7.10 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากสีตัวอย่างที่ 31 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

ตัวอย่างที่ 35

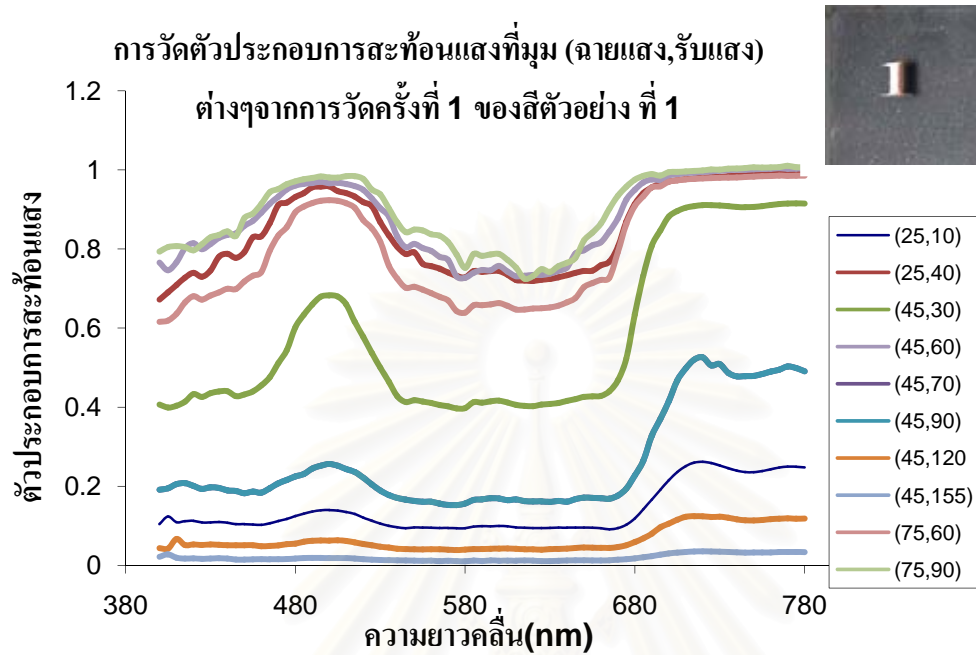


รูปที่ 7.11 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงจากการฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างที่ 35 ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น

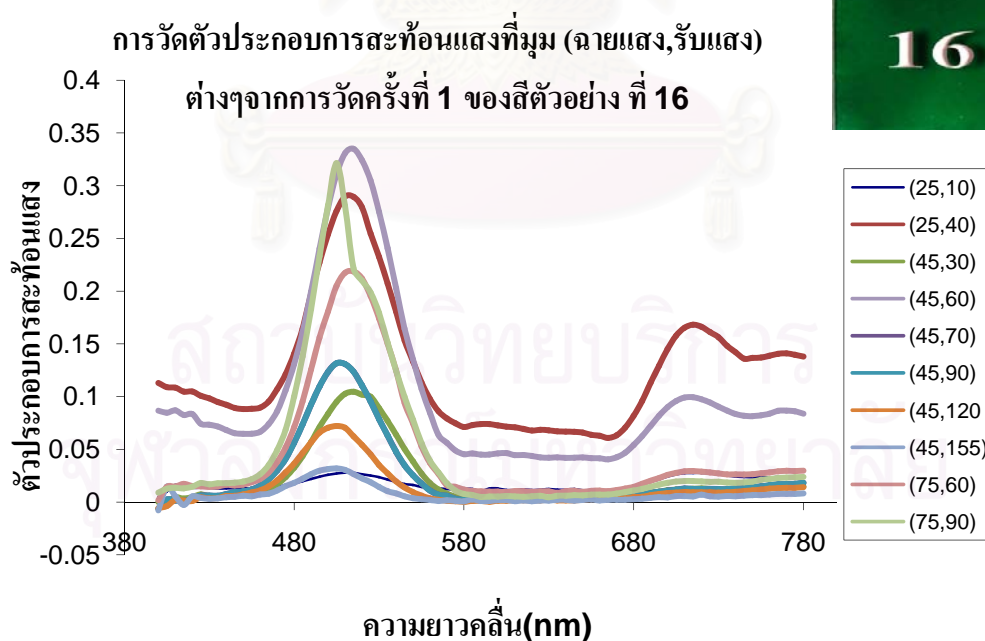
รูปที่ 7.12 ถึง 7.16 แสดงค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่วัดในแต่ละมุมที่ฉายแสงและแต่ละมุมที่รับแสง ได้แก่ ฉายแสงที่มุม  $25^\circ$  และรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $\pm 15^\circ$  ( $170^\circ$  และ  $140^\circ$ ) ฉายแสงที่มุม  $75^\circ$  และรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $\pm 15^\circ$  ( $120^\circ$  และ  $90^\circ$ ) และฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $\pm 15^\circ$ ,  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$  ( $150^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  และ  $25^\circ$ ) การวัดมุมให้คิดตามเข็มนาฬิกา โดยเริ่มจากฝั่งมุมที่ฉายแสงในช่วง  $0^\circ$  ถึง  $180^\circ$  โดยเลือกจากการวัดสี่ครั้งที่ 1 มาแสดงเป็นกราฟเทียบกับทุกมุมของตัวอย่างที่ 1, 16, 21, 25, 31 และ 35 โดยจากรูปที่ได้ ปรากฏว่ากรณีของสีดูไลท์ ซึ่งได้แก่ตัวอย่างที่ 1, 16, 21, 25, และ 31 เมื่อเปลี่ยนมุมฉายแสงหรือมุมรับแสง จะพบว่าการเลื่อนของค่าสูงสุดของค่าตัวประกอบทางแสงไปที่ความยาวคลื่นอื่น โดยเฉพาะในรูปที่ 7.13 เห็นได้ชัดเจนมาก ส่วนกรณีสีดำ ถึงแม้ว่าจะเป็นสีดูไลท์ แต่พบที่มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณที่รับได้จากสีดำจะมีค่าต่ำ ทำให้แยกแยะความแตกต่างด้วยตาได้ยาก และสำหรับสีธรรมชาติตัวอย่างที่ 35 ในรูปที่ 7.16 เห็นได้ว่า ค่าของจุดสูงสุดของค่าของตัวประกอบการสะท้อนแสงอยู่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ ปรากฏว่าในแต่ละมุมที่ฉายแสงนั้นจะให้ความสว่างไม่เท่ากัน เนื่องจากแผ่นสีตัวอย่างนั้นไม่ใช่ตัวสะท้อนแสงแบบกระจายแสง จึงทำให้แต่ละมุมรับแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกมีค่ามากน้อยแตกต่างกัน นอกจากนี้ ในรูปที่ 7.13 และ 7.15 ปรากฏว่ามีค่าของตัวประกอบการสะท้อนแสงที่ติดลบ (ในบางมุมที่สะท้อนแสงได้น้อย) เนื่องจากที่ความยาวคลื่นค่าต่ำๆ (ประมาณช่วง 400 - 410) แหล่งกำเนิดแสงให้แสงที่น้อยกว่ามาก เมื่อเทียบกับที่ความยาวคลื่นอื่นๆ (สังเกตที่สเปกตรัมของเซรามิกในรูป



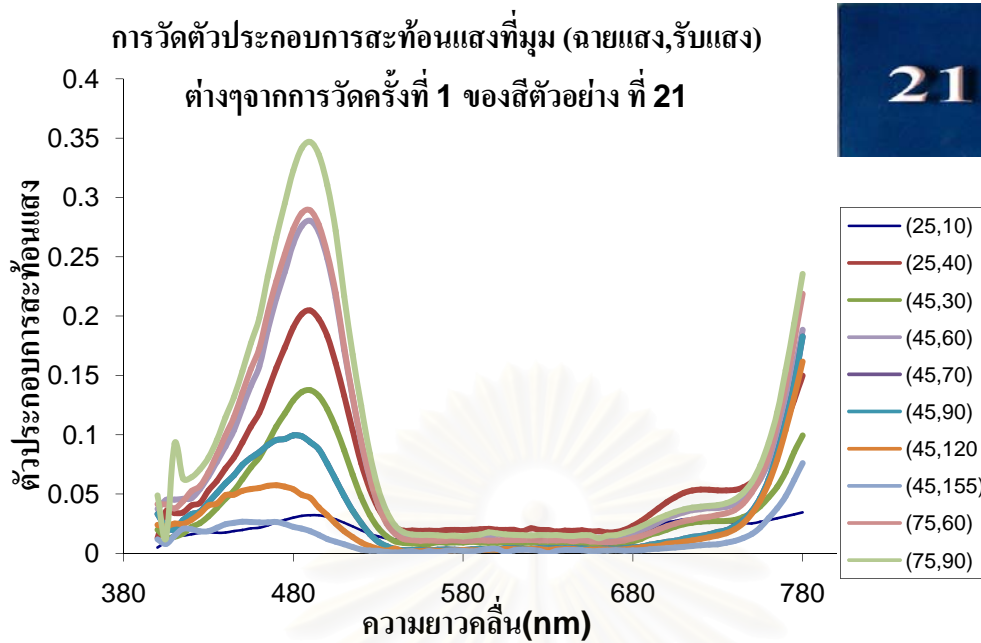
ที่ 7.1) ทำให้เมื่อวัดสัญญาณค่าน้อยๆ แล้วทำให้วัดได้เพียงสัญญาณรบกวน เนื่องจากค่ากระแสมืดที่ใช้ในการทดลองเกิดจากการเฉลี่ยจากการวัด 128 ครั้ง เพราะฉะนั้น จึงอาจทำให้ค่าที่วัดได้ที่ขนาดสัญญาณต่ำมากๆต่ำกว่าสัญญาณรบกวนได้



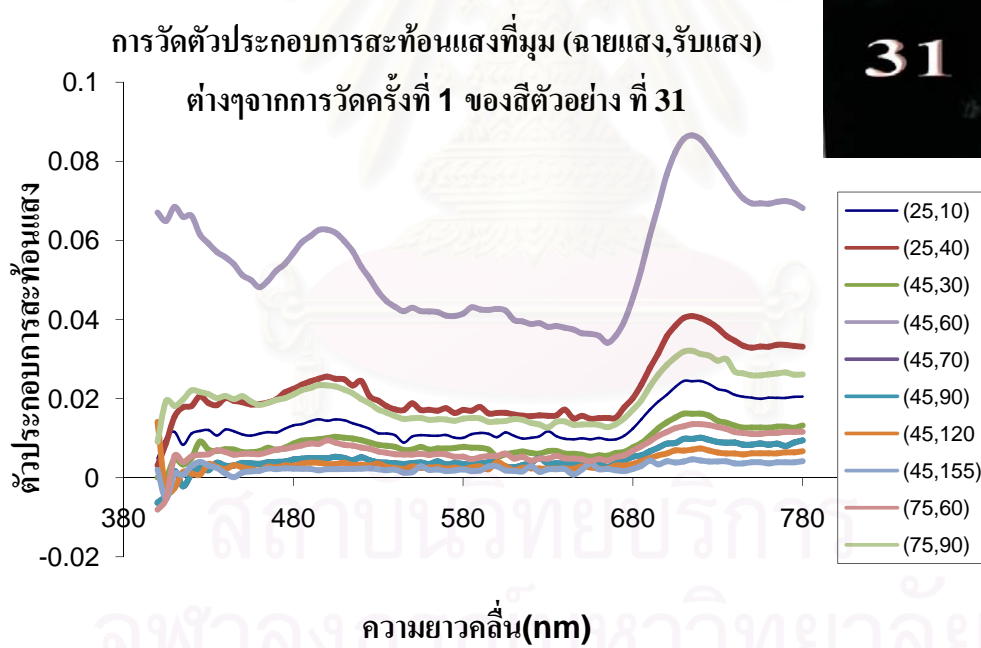
รูปที่ 7.12 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 1



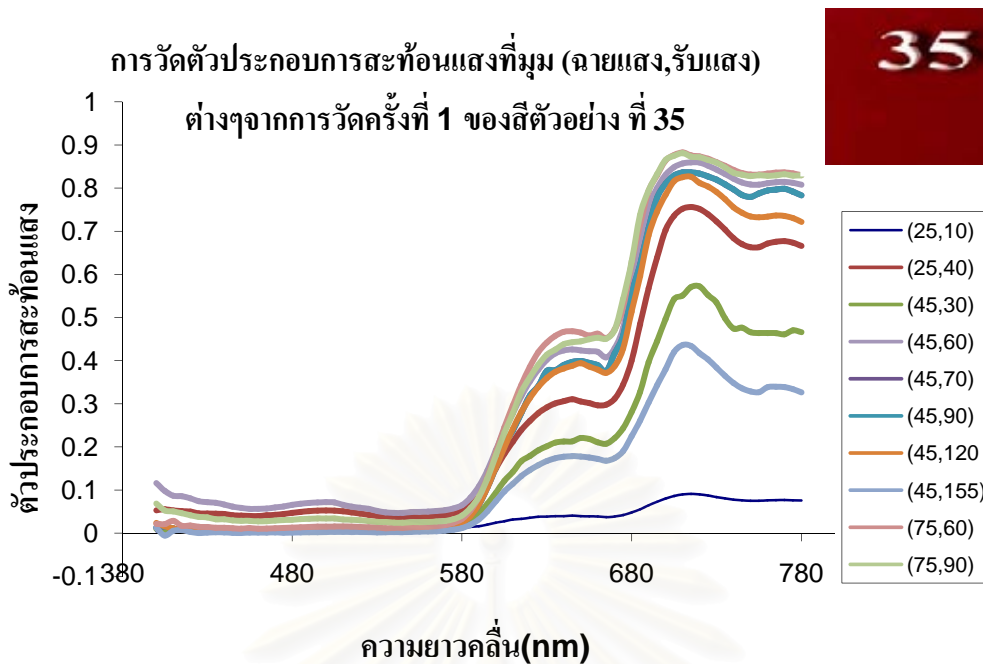
รูปที่ 7.13 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 16



รูปที่ 7.14 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 21



รูปที่ 7.15 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 31



รูปที่ 7.16 ค่าตัวประกอบสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 35

จากค่าตัวประกอบสะท้อนแสงที่มุมต่างๆ ทำให้พอคาดเดาได้ว่า สีที่ได้แตกต่างกันเพียงใด อย่างไรก็ตาม เมื่อนำค่าที่ได้ไปแปลงเป็นระบบ CIELAB ทำให้ง่ายต่อการเข้าใจว่า ความแตกต่างของสีเปลี่ยนไปในทิศทางใด ดังตารางที่ ก.1 ก) – จ) (ในภาคผนวก ก) ซึ่งแสดงค่าต่างๆ ของการคำนวณทั้งค่าไตรสติมูลัส  $X$   $Y$   $Z$   $X_{10}$   $Y_{10}$  และ  $Z_{10}$  แปลงไปเป็นค่า  $L^*$   $a^*$   $b^*$   $C_{ab}^*$   $h_{ab}$   $L_{10}^*$   $a_{10}^*$   $b_{10}^*$   $C_{ab,10}^*$  และ  $h_{ab,10}$  โดยนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาหาค่าของ  $\Delta E_{ab}^*$  และ  $\Delta E_{ab,10}^*$  จากนั้นนำค่าความแตกต่างของสีที่ได้ไปหาค่าของ MCDM และ MCDM<sub>10</sub> โดยตารางเหล่านี้แสดงค่าต่างๆ ของทั้ง 43 ตัวอย่างสี ภายใต้ illuminants มาตรฐาน D<sub>65</sub> ตาม CIE ที่มุมฉายแสงและมุมรับแสงต่างๆ

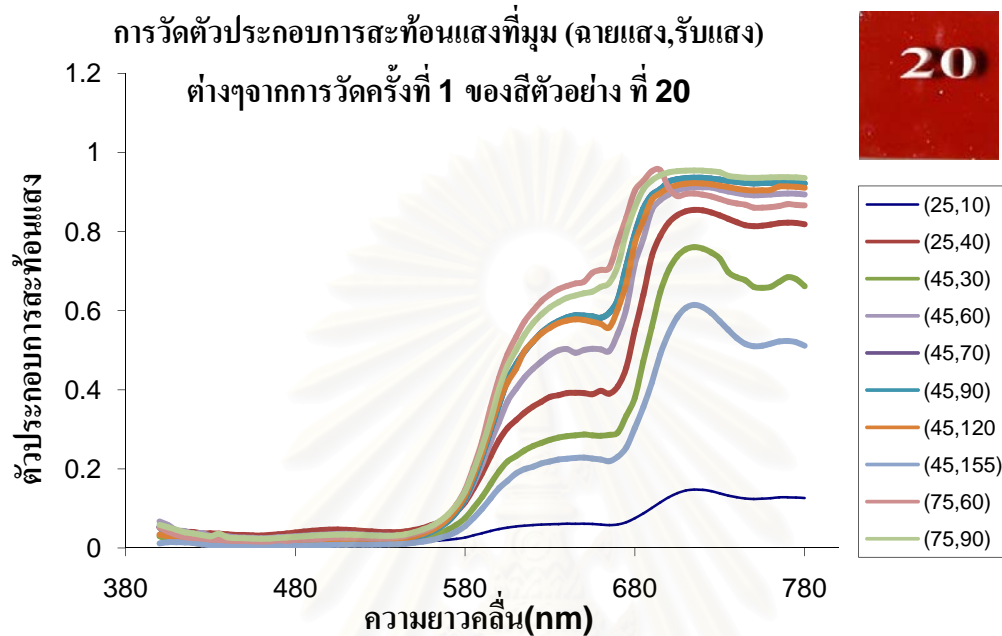
จากค่าที่ได้ในตาราง ก.1 ก) – จ) ปรากฏว่า ทุกตัวอย่างสำหรับมุมแทรกสอด (มุมอะสเปกคิวลาร์  $\pm 15^\circ$ ) ที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $-15^\circ$  มีค่าความสว่างน้อยกว่าที่มุม  $+15^\circ$  และเฉดสีจะเปลี่ยนมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีมุมเมทัลลิก ตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 7.1 ข ซึ่งแสดงค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  โดยใช้ illuminant D<sub>65</sub> และฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  รับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $-15^\circ$  (รับแสงที่มุม  $120^\circ$ ) สีตัวอย่างที่ 5 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ดังนี้ 97.1, -3.65 และ 1.17 ตามลำดับ หมายถึงว่า มีความสว่าง 97.1% เมื่อเทียบกับเซรามิกที่ใช้ และมีโทนสีเกือบเป็นสีเทาโดยมีความเขียว ( $a^*$  เป็นลบ) และมีความเหลือง ( $b^*$  เป็นบวก) ปนมาเพียงเล็กน้อย ขณะที่ฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  รับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+15^\circ$  (รับแสงที่มุม  $150^\circ$ ) สีตัวอย่างที่ 5 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ดังนี้ 114.63, 21.34 และ -0.89 ตามลำดับ หมายความว่า มีความสว่าง 114.63% เมื่อเทียบกับเซรามิก (เพราะว่า

มีแสงสเปกคิวลาร์มาเกี่ยวข้องจึงมีค่าเกิน 100%) และมีโทนสีออกสีแดงเป็นส่วนมาก ( $a^*$  เป็นบวก) และแทบไม่มีสีน้ำเงินและสีเหลืองเจือปน จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นว่าทั้งที่เป็นสีเดียวกันเพียงเปลี่ยนมุมที่มองก็สามารถเห็นเป็นสีอื่นได้ ขณะที่ยังพิจารณาที่สีตัวอย่างที่ 5 ในกรณีของมุมเมทัลลิกดังตารางที่ 7.1g ซึ่งแสดงค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยใช้ illuminant  $D_{65}$  และฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  รับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+45^\circ$  (รับแสงที่มุม  $90^\circ$ ) สีตัวอย่างที่ 5 มีค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ดังนี้ 68.95, -6.33 และ -0.87 ตามลำดับ หมายความว่า มีความสว่าง 68.95% เมื่อเทียบกับเซรามิกที่ใช้ และมีโทนสีออกสีเขียวเล็กน้อย ( $a^*$  เป็นลบ) และแทบไม่มีสีน้ำเงินและสีเหลืองเจือปน ขณะที่อีกหนึ่งมุมเมทัลลิกดังตารางที่ 7.1g ซึ่งแสดงค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยใช้ illuminant  $D_{65}$  และฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  รับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+75^\circ$  (รับแสงที่มุม  $60^\circ$ ) สีตัวอย่างที่ 5 มีค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ดังนี้ 40.68, -2.61 และ +1.64 ตามลำดับ หมายความว่า มีความสว่าง 40.68% เมื่อเทียบกับเซรามิกที่ใช้ และมีโทนสีออกสีเขียวเล็กน้อย ( $a^*$  เป็นลบ) และมีสีเหลืองเจือปนนิดหน่อย ( $b^*$  เป็นบวก) จะเห็นว่าทั้ง 2 มุมเมทัลลิก ( $+45^\circ$  และ  $+75^\circ$ ) แทบไม่แตกต่างกันในเจดสี แต่แตกต่างกันส่วนมาก (ประมาณ 19%) ในด้านความสว่าง ซึ่งเป็นไปตามหลักการของมุมเมทัลลิกที่ว่า เมื่อเปลี่ยนมุมมองความสว่างจะเปลี่ยนตาม เช่นเดียวกับกรณีมุมเมทัลลิกที่เปลี่ยนเจดสีค่อนข้างมาก และนอกจากนั้นค่า  $a^*$  หรือ  $b^*$  ที่มักจะน้อยลงในกรณีมุมเมทัลลิก เมื่อความสว่างน้อยลง เพราะยิ่งเข้าไปใกล้สีดำมากเท่าไร ค่าของเจดสีจะแคบลงเท่านั้น ตามหลักการของ Mac Adams รูปที่ 5.5 จะเห็นว่า ยิ่งค่า Y (บอกถึงความสว่าง) น้อยลง วงรีของการรับรู้ทางสียิ่งมีขนาดของแกนประกอบจากเล็กลงด้วย

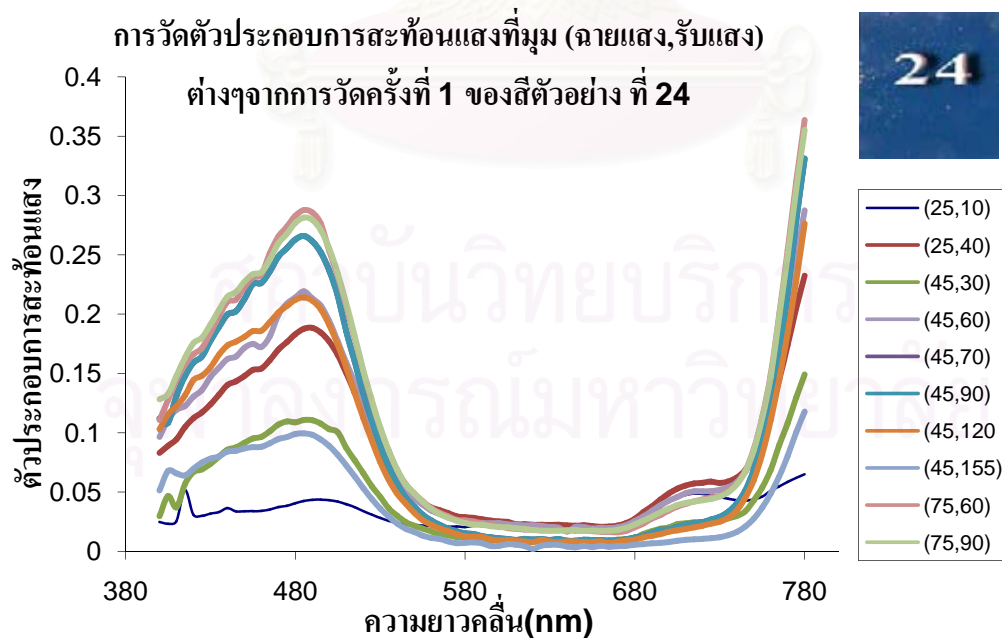
นอกจากนี้ จากตารางที่ 7.2 พบว่าสีตัวอย่างที่ 31 (สีดำ) มีค่า  $h_{ab}$  และ  $h_{ab,10}$  ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากถึงประมาณ 100 เนื่องจากสีตัวอย่างที่ 31 เป็นสีดำสนิท โดยเฉพาะเมื่อฉายแสงที่มุม  $45^\circ$  และรับแสงที่มุมอะสเปกคิวลาร์  $+110^\circ$  ซึ่งเป็นมุมที่ทำให้ความสว่างน้อยที่สุด และเนื่องจากค่ามุมของเจดสี (hue angle)  $h_{ab}$  และ  $h_{ab,10}$  คำนวณจากค่า  $\arctan(b/a)$  เพราะฉะนั้นกรณีที่ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  ค่าใกล้ 0 หลายๆอาจเป็นบวกหรือลบเนื่องจากวัตถุมืดมาก ยกตัวอย่างเช่น ในการวัด 3 ครั้ง ถ้า  $a^*$  มีค่าเป็น 0.05, -0.05, 0.05 และ  $b^*$  มีค่าเป็น -0.05, 0.05, 0.05 ปรากฏว่าทั้ง 3 ค่า ( $b^*$ ,  $a^*$ ) อยู่คนละ quadrant โดยวัดครั้งแรก (-0.05, 0.05) ค่ามุมของเจดสีเท่ากับ  $315^\circ$  วัดครั้งที่ 2 (0.05, -0.05) ค่ามุมของเจดสีเท่ากับ  $135^\circ$  และวัดครั้งที่ 3 (0.05, 0.05) ค่ามุมของเจดสีเท่ากับ  $45^\circ$  จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันมาก ทั้งที่จริงๆค่าไม่ต่างกันเท่าไร อธิบายได้ว่าที่ความสว่างน้อยๆค่า ค่ามุมของเจดสีมีผลน้อยมาก เนื่องจากค่าทุกอย่างจะเข้าไปใกล้แกนของสีที่ไม่มีสี (achromatic axis) เพราะค่ามุมนั้นมีไว้เพียงเพื่อบอกทิศทางของสี เพราะฉะนั้นถึงแม้มุมจะแตกต่างกัน แต่ก็ยังสามารถมีการรับรู้สอดคล้องกันได้ ในกรณีที่ความสว่างต่ำๆ

รูปที่ 7.17 และ 7.18 แสดงการวัดตัวประกอบสะท้อนแสงที่มุมฉายแสงและมุมรับแสงต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 20 และ 24 ซึ่งสีตัวอย่างทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่าง

เห็นได้ชัด โดยสีตัวอย่างที่ 20 คือสีแดง ส่วนสีตัวอย่างที่ 24 คือสีน้ำเงิน จากกราฟจะเห็นความแตกต่างของตำแหน่งที่เกิดจุดยอด โดยสีตัวอย่างที่ 20 จะมีจุดยอดที่ประมาณ 660 และ 720 นาโนเมตร ขณะที่สีตัวอย่างที่ 24 จะมีจุดยอดที่ประมาณ 480 นาโนเมตร และจากตารางที่ 7.1ก ถึง 7.1จ จะเห็นค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  ต่างกันมาก



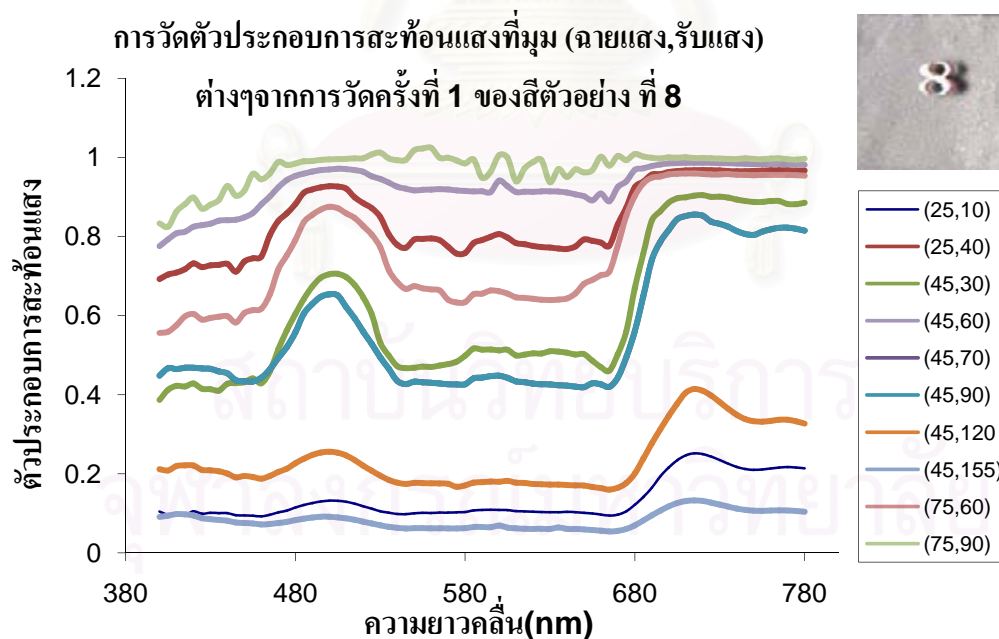
รูปที่ 7.17 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 20



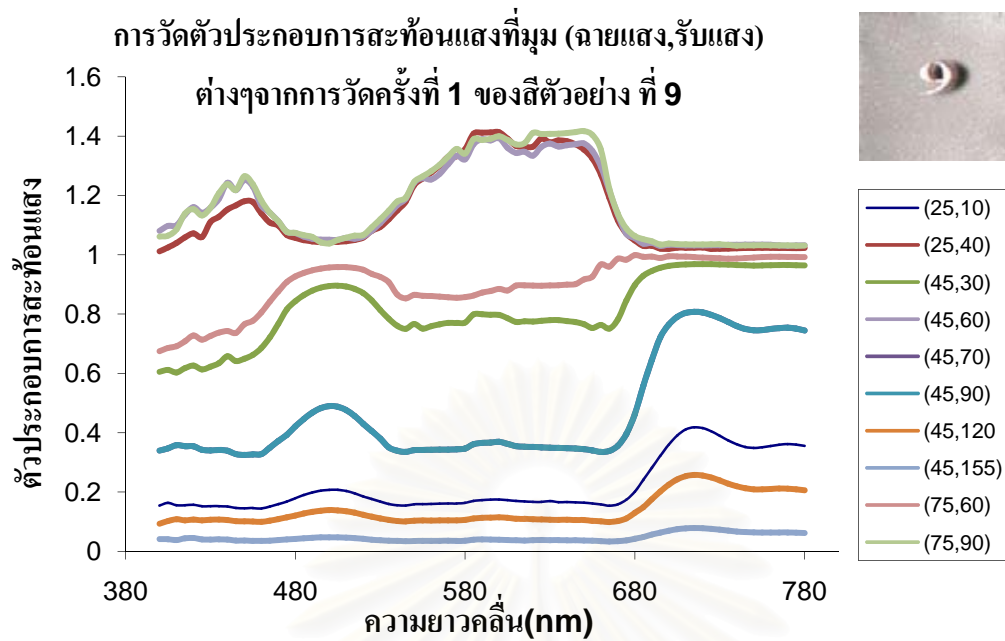
รูปที่ 7.18 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 24

จากตาราง 7.1x ที่มุมฉายแสงที่  $45^\circ$  และที่มุมรับแสงที่  $150^\circ$  สีตัวอย่างที่ 20 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 33, 41, 33.56 ส่วนสีตัวอย่างที่ 21 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 21.55, -10.7 และ -25.3 จะเห็นว่าสีตัวอย่างที่ 20 มีค่าความสว่างมากกว่าประมาณ 12% และมีสีแดงและสีเหลืองผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งก็คือสีส้มนั่นเอง ส่วนสีตัวอย่างที่ 24 มีสีเขียวและสีน้ำเงินเป็นส่วนผสมโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเงิน

รูปที่ 7.19 และ 7.20 แสดงผลการวัดตัวประกอบสะท้อนแสงที่มุมฉายแสงและมุมรับแสงต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 8 และ 9 สีทั้งสองตัวอย่างนี้มีความแตกต่างทางการมองเห็นน้อยมาก โดยเมื่อดูจากกราฟ จะเห็นว่าที่หลายๆมุมของทั้งสองตัวอย่างนี้มีจุดยอดที่เดียวกัน ที่ความยาวคลื่นประมาณ 490 และ 720 นาโนเมตร แต่ที่มุมแทรกสอด (อะสเปกคิวลาร์  $+15^\circ$ ) ให้จุดยอดที่แตกต่างกัน ดังในตารางที่ 7.1ก ถึง 7.1ค เช่น ที่มุมฉายแสงที่  $25^\circ$  และที่มุมรับแสงที่  $140^\circ$  สีตัวอย่างที่ 8 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 92.24, -5.97 และ 2.68 ส่วนสีตัวอย่างที่ 9 มีค่า  $L^*$   $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 108.4, 9 และ 6.97 จะเห็นว่าค่า  $a^*$  ของสีตัวอย่างที่ 9 มีค่าเป็นบวก ซึ่งบอกความแดง ขณะที่ค่า  $a^*$  ของสีตัวอย่างที่ 8 มีค่าเป็นลบ ซึ่งบอกความเขียว เนื่องจากทั้งคู่เป็นสีคู่ไฮซีที จึงกล่าวได้ว่าสีตัวอย่างที่ 8 มีประกายสีเขียว ส่วนสีตัวอย่างที่ 9 มีประกายสีแดง จากตัวอย่างคู่เหมือน (สีตัวอย่างที่ 8 และ 9) เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการแยกแยะความแตกต่างที่อาจเกิดขึ้นในบางมุม



รูปที่ 7.19 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 8



รูปที่ 7.20 ค่าตัวประกอบการสะท้อนแสงที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ซึ่งวัดที่มุม (ฉายแสง, รับแสง) ต่างๆ จากการวัดครั้งที่ 1 ของสีตัวอย่างที่ 9

ตารางที่ 7.1ก ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170° และ 140° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8, 9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35

มุมฉาย/รับแสง (องศา)	ค่ามาตรฐานตาม CIE		สีตัวอย่าง									
			1	5	8	9	16	20	21	24	31	35
25/170	L*	mean	38.52	53.6	39.1	48.25	13.82	18.52	12.63	18.23	10.06	13.13
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.01	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06
	a*	mean	-3.5	-4.06	-2.55	-2.8	-10.2	15.26	-3.52	-4.26	-1.99	11.66
		Std.	0.06	0.04	0.05	0.04	0.22	0.17	0.33	0.17	0.29	0.2
	b*	mean	-2.11	-0.48	1.55	2.7	2.43	9.33	-6.39	-6.49	-0.39	4.93
		Std.	0.07	0.02	0.04	0.05	0.24	0.23	0.17	0.17	0.16	0.29
	L <sub>10</sub> *	mean	38.79	53.85	39.21	48.35	13.94	18.29	13.18	18.67	10.15	13.05
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.01	0.06	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04
	a <sub>10</sub> *	mean	-4.58	-5.04	-3.05	-3.4	-10.1	14.12	-5.89	-5.87	-2.34	10.17
		Std.	0.07	0.03	0.05	0.05	0.25	0.13	0.22	0.15	0.18	0.13
	b <sub>10</sub> *	mean	-1.45	0.17	1.95	3.17	2.95	8.98	-5.03	-5.49	-0.09	4.9
		Std.	0.08	0.02	0.05	0.05	0.31	0.28	0.22	0.21	0.22	0.26
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.19	0.09	0.11	0.11	0.48	0.65	0.53	0.44	0.47	0.76
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.2	0.07	0.12	0.12	0.65	0.74	0.67	0.51	0.42	0.68
25/140	L*	mean	91.81	113.4	92.24	108.4	44.39	40.41	25.47	30.5	14.65	33.91
		Std.	0	0	0	0	0.01	0.02	0.03	0.01	0.06	0.02
	a*	mean	-8.29	19.2	-5.97	9	-37.1	41.81	-14.4	-12.8	-3.08	35.7
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06	0.04	0.08	0.08	0.21	0.06
	b*	mean	-2.16	0.12	2.68	6.97	7.65	31.37	-24.1	-26.1	-1.21	15.38
		Std.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.12	0.05	0.05	0.21	0.13
	L <sub>10</sub> *	mean	92.14	113	92.4	108	44.73	39.65	27.76	32.26	14.82	33.54
		Std.	0	0	0	0	0.01	0.02	0.03	0.01	0.06	0.02
	a <sub>10</sub> *	mean	-9.51	20.16	-6.69	9.86	-35.8	39.66	-25	-19.3	-3.67	32.3
		Std.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.07	0.09	0.18	0.05
	b <sub>10</sub> *	mean	-0.94	-1.62	3.54	6.27	9.31	30.14	-18.6	-22.5	-0.72	14.7
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.01	0.05	0.14	0.04	0.06	0.24	0.16
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.03	0.02	0.04	0.03	0.19	0.26	0.15	0.17	0.48	0.35
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.03	0.02	0.04	0.04	0.17	0.28	0.15	0.17	0.55	0.41



ตารางที่ 7.1x ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่มุม 150° และ 120° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8, 9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35

มุมฉาย/รับแสง (องศา)	ค่ามาตรฐานตาม CIE		สีตัวอย่าง										
			1	5	8	9	16	20	21	24	31	35	
45/150	L*	mean	73.77	97.1	77.73	91.46	23.17	33	18.77	21.55	6.87	23.57	
		Std.	0.01	0	0	0	0.03	0.02	0.02	0.02	0.09	0.03	
	a*	mean	-11	-3.65	-9.15	-6.65	-55	41	-13.8	-10.7	-3.16	41.13	
		Std.	0.03	0.01	0.01	0.01	0.34	0.05	0.11	0.07	0.3	0.04	
	b*	mean	-1.91	1.71	5.35	7.32	16.18	33.56	-23.5	-25.3	0.76	25.79	
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.02	0.3	0.28	0.05	0.06	0.25	0.11	
	L <sub>10</sub> *	mean	74.33	97.14	78.02	91.51	23.37	32.22	21.05	23.27	6.96	22.99	
		Std.	0.01	0	0	0	0.03	0.02	0.02	0.02	0.09	0.02	
	a <sub>10</sub> *	mean	-13.3	-3.67	-10.6	-7.09	-51.2	39.09	-24.4	-17.2	-3.48	38.15	
		Std.	0.04	0.01	0.02	0.01	0.37	0.05	0.11	0.1	0.3	0.04	
	b <sub>10</sub> *	mean	-0.1	2.05	6.78	8.24	18.91	32.24	-18.1	-21.8	1.17	24.81	
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.02	0.38	0.33	0.05	0.07	0.29	0.16	
		ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.07	0.03	0.04	0.03	0.66	0.69	0.14	0.17	0.69	0.19
		ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.09	0.03	0.03	0.05	0.93	0.84	0.21	0.16	0.69	0.27
45/120	L*	mean	92.78	114.6	97.2	108.3	44.39	42.24	27.22	31.04	25.43	38.69	
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	
	a*	mean	-7.83	21.34	-3.68	9.27	-55	50.7	-18.5	-11.8	-2.4	40.81	
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.02	0.06	0.03	0.07	0.07	0.09	0.08	
	b*	mean	-4	-0.89	3.62	3.91	13	38.72	-30.7	-30.1	-4.42	14.2	
		Std.	0.01	0.02	0.01	0.02	0.07	0.09	0.04	0.06	0.09	0.06	
	L <sub>10</sub> *	mean	93.13	114.2	97.21	107.9	44.74	41.33	30.22	33.09	25.69	38.34	
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	
	a <sub>10</sub> *	mean	-9.04	22.34	-3.77	9.98	-52.2	48.24	-32.4	-19.6	-3.13	36.74	
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06	0.04	0.1	0.07	0.09	0.06	
	b <sub>10</sub> *	mean	-2.91	-2.84	4.06	3.15	15.25	36.98	-23.7	-26.1	-4.1	13.34	
		Std.	0.01	0.02	0.01	0.02	0.07	0.13	0.05	0.06	0.07	0.07	
		ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.05	0.03	0.03	0.06	0.14	0.15	0.13	0.19	0.2	
		ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.04	0.05	0.03	0.04	0.14	0.28	0.19	0.2	0.17	

ตารางที่ 7.1ค ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 75° และรับแสงที่มุม 120° และ 90° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8, 9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35

มุมฉาย/รับแสง (องศา)	สีตัวอย่าง											
	ค่ามาตรฐานตาม CIE	1	5	8	9	16	20	21	24	31	35	
75/120	L*	mean	88.68	98.97	87.24	95.58	33.81	46.31	26.87	33.9	5.56	33.4
		Std.	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	0.01
	a*	mean	-10.3	-3.32	-10.7	-4.8	-66.5	59.48	-18.2	-13.5	-2.55	55.92
		Std.	0.01	0.01	0.02	0.02	0.14	0.03	0.13	0.08	0.28	0.05
	b*	mean	-1.96	4.88	4.15	6.34	18.33	53.29	-33.7	-35.8	-0.67	38.39
		Std.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.1	0.12	0.05	0.07	0.22	0.19
	L <sub>10</sub> *	mean	89.09	98.91	87.47	95.59	34.17	45.2	30.11	36.41	5.65	32.6
		Std.	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	0.02
	a <sub>10</sub> *	mean	-11.8	-3.18	-11.6	-5.23	-62.5	56.89	-33.1	-23.1	-2.89	52.06
		Std.	0.01	0.01	0.02	0.01	0.14	0.03	0.09	0.08	0.28	0.02
	b <sub>10</sub> *	mean	-0.5	5.2	5.38	7.1	21.75	51.3	-26.3	-30.8	-0.25	36.91
		Std.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.14	0.13	0.05	0.07	0.21	0.2
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.04	0.03	0.03	0.04	0.3	0.22	0.22	0.2	0.72	0.34
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.04	0.04	0.05	0.03	0.32	0.2	0.12	0.2	0.73	0.31
75/90	L*	mean	94.12	113.5	99.75	108.8	35.41	45.81	30.38	33.8	13.54	34.79
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.02	0.02	0.09	0.02
	a*	mean	-8.57	20.35	-3.32	9.92	-75.1	56.78	-21.5	-13.1	-1.96	49.99
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.13	0.03	0.13	0.09	0.17	0.05
	b*	mean	-2.7	-1.66	3.79	4.58	14.86	46.19	-33.3	-36.2	-3.58	24.16
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.01	0.06	0.19	0.03	0.06	0.22	0.08
	L <sub>10</sub> *	mean	94.41	113.1	99.69	108.4	36.21	44.78	33.64	36.3	13.76	34.2
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.02	0.02	0.08	0.02
	a <sub>10</sub> *	mean	-9.41	21.15	-3	10.65	-72.6	54.11	-36.3	-22.6	-2.67	45.9
		Std.	0.03	0.01	0.02	0.01	0.11	0.02	0.09	0.1	0.14	0.05
	b <sub>10</sub> *	mean	-1.69	-3.47	4.01	3.78	19.49	44.28	-25.8	-31.4	-3.2	22.85
		Std.	0.02	0.02	0.02	0.01	0.08	0.19	0.03	0.06	0.22	0.07
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.05	0.04	0.05	0.02	0.25	0.46	0.21	0.16	0.53	0.17
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.06	0.04	0.04	0.02	0.22	0.47	0.18	0.21	0.47	0.15

ตารางที่ 7.1ง ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่มุม 110° และ 90° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8, 9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35

มุมฉาย/รับแสง (องศา)	ค่ามาตรฐานตาม CIE		สีตัวอย่าง									
			1	5	8	9	16	20	21	24	31	35
45/110	L*	mean	81.38	98.12	88.76	97.87	28.54	39.98	19.72	26.81	3.55	25.84
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.04	0.03	0.07	0.02
	a*	mean	-9.15	-2.2	-6.23	-1.78	-68.9	53.93	-15.3	-11.3	-1.08	49.07
		Std.	0.02	0.01	0.02	0.01	0.17	0.03	0.09	0.12	0.28	0.06
	b*	mean	-5.7	0.8	5.13	3.39	17.05	51.39	-30.7	-33.4	-0.56	36.11
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.07	0.19	0.08	0.06	0.12	0.24
	L <sub>10</sub> *	mean	82	98.16	88.88	97.86	28.98	38.94	22.7	29.07	3.62	25.11
		Std.	0	0	0	0	0.02	0.01	0.03	0.02	0.05	0.02
	a <sub>10</sub> *	mean	-11.6	-2.26	-6.94	-1.92	-64.9	51.66	-29.2	-19.5	-1.52	45.76
		Std.	0.02	0.02	0.01	0.01	0.17	0.04	0.1	0.1	0.17	0.05
	b <sub>10</sub> *	mean	-4.03	0.98	5.95	3.73	20.88	49.56	-24	-29.2	-0.21	34.8
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.12	0.22	0.07	0.05	0.22	0.25
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.04	0.02	0.03	0.02	0.25	0.37	0.17	0.25	0.56	0.61
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.04	0.03	0.02	0.03	0.31	0.45	0.19	0.22	0.63	0.52
45/90	L*	mean	49.55	68.95	74.33	67.45	23.05	42.78	12.98	31.13	3.58	29.47
		Std.	0.01	0	0	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.06	0.02
	a*	mean	-4.9	-6.33	-8.25	-6.02	-58.9	58.19	1.85	-12.6	-1.36	55.01
		Std.	0.03	0.03	0.01	0.03	0.34	0.03	0.09	0.06	0.27	0.05
	b*	mean	-3.93	-0.87	-0.83	1.66	8.39	55.36	-33	-38.4	0.84	43.59
		Std.	0.04	0.01	0.01	0.02	0.11	0.17	0.08	0.02	0.31	0.32
	L <sub>10</sub> *	mean	49.95	69.28	74.75	67.71	23.84	41.68	15.65	33.84	3.6	28.65
		Std.	0.01	0	0	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	0.07	0.02
	a <sub>10</sub> *	mean	-6.52	-7.52	-9.88	-7.23	-58.1	55.73	-10.4	-22.9	-1.53	51.41
		Std.	0.05	0.02	0.01	0.02	0.15	0.03	0.15	0.06	0.16	0.06
	b <sub>10</sub> *	mean	-3	-0.01	0.41	2.61	12.36	53.39	-27.7	-33.2	1.08	42.02
		Std.	0.05	0.02	0.01	0.03	0.12	0.16	0.07	0.03	0.34	0.39
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.09	0.06	0.03	0.06	0.52	0.38	0.25	0.08	0.94	0.77
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.13	0.04	0.04	0.05	0.28	0.36	0.26	0.12	0.88	0.93

ตารางที่ 7.1จ ค่ามาตรฐานต่างๆตาม CIE ที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่มุม 60° และ 25° สำหรับ illuminant D<sub>65</sub> ของสีตัวอย่างที่ 1, 5, 8, 9, 16, 20, 21, 24, 31 และ 35

มุมฉาย/รับแสง (องศา)	ค่ามาตรฐานตาม CIE		สีตัวอย่าง									
			1	5	8	9	16	20	21	24	31	35
45/60	L*	mean	25.4	40.68	50.68	39.84	14.75	43.14	7.21	28.38	2.41	29.2
		Std.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.06	0.01	0.09	0.01
	a*	mean	-2.35	-2.61	-4.16	-2.42	-43	57.04	13.39	-10.8	-0.89	54.87
		Std.	0.07	0.04	0.03	0.06	0.26	0.03	0.35	0.08	0.28	0.04
	b*	mean	-3.32	1.64	-3.14	0.91	2.42	56.84	-32.6	-36.3	0.16	44.16
		Std.	0.13	0.02	0.04	0.05	0.11	0.13	0.2	0.04	0.33	0.18
	L <sub>10</sub> *	mean	25.66	40.76	51.01	39.97	15.64	42.02	9.51	30.88	2.45	28.37
		Std.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.05	0.01	0.07	0.01
	a <sub>10</sub> *	mean	-3.42	-2.95	-5.35	-3.07	-44.9	54.81	2.99	-20.1	-1.14	51.35
		Std.	0.06	0.06	0.03	0.05	0.31	0.03	0.34	0.1	0.17	0.04
	b <sub>10</sub> *	mean	-2.77	1.93	-2.46	1.38	6.06	54.89	-28.5	-31.6	0.39	42.57
		Std.	0.14	0.03	0.04	0.05	0.17	0.14	0.2	0.05	0.28	0.23
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.29	0.06	0.08	0.15	0.59	0.25	0.77	0.16	0.92	0.33
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.29	0.1	0.08	0.13	0.61	0.31	0.71	0.15	0.54	0.36
45/25	L*	mean	11.49	25.97	31.35	23.14	7.55	28.04	3.56	18.75	1.78	19.22
		Std.	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.01	0.05	0.04	0.06	0.03
	a*	mean	-1.18	-0.93	-1.8	-0.8	-20.2	41.32	9.17	-7.41	0.03	42.33
		Std.	0.16	0.07	0.1	0.08	0.22	0.06	0.28	0.19	0.24	0.08
	b*	mean	-3.48	0.71	-4.48	-0.58	-0.97	39.44	-23.2	-28.3	-0.08	30.36
		Std.	0.14	0.06	0.04	0.08	0.21	0.24	0.15	0.1	0.25	0.15
	L <sub>10</sub> *	mean	11.7	26.03	31.63	23.26	8.28	27.21	4.56	20.66	1.79	18.57
		Std.	0.04	0.02	0.01	0.03	0.04	0.02	0.05	0.04	0.07	0.03
	a <sub>10</sub> *	mean	-1.97	-1.09	-2.68	-1.34	-22.7	39.78	4.62	-14.5	-0.07	39.68
		Std.	0.23	0.1	0.09	0.05	0.2	0.05	0.2	0.11	0.26	0.08
	b <sub>10</sub> *	mean	-3.18	0.8	-4.15	-0.36	1.51	37.85	-21.5	-24.8	0.02	29.17
		Std.	0.12	0.09	0.06	0.07	0.2	0.32	0.18	0.1	0.25	0.17
	ΔE <sub>ab</sub>	(max)	0.27	0.13	0.22	0.17	0.46	0.49	0.62	0.36	0.53	0.3
	ΔE <sub>ab,10</sub>	(max)	0.48	0.17	0.18	0.14	0.49	0.65	0.36	0.22	0.59	0.26

ตารางที่ 7.2 ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 45° และรับแสงที่มุม 25° (มุมอะซิมปท  
 ทิศลาร์ +110°) ( $C^*_{ab}$ ,  $h_{ab}$ ,  $C^*_{ab,10}$  และ  $h_{ab,10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>							
	$C^*_{ab}$		$h_{ab}$		$C^*_{ab,10}$		$h_{ab,10}$	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	3.68	0.12	251.21	2.87	3.75	0.16	238.29	3.11
Color02	3.34	0.11	237.34	3.1	3.55	0.09	224.82	1.58
Color03	2.85	0.15	245.43	4.28	2.93	0.14	235.5	4.65
Color04	4.93	0.06	248.04	0.98	5.02	0.06	236.63	1.2
Color05	1.17	0.08	142.51	2.54	1.35	0.12	143.83	2.39
Color06	2.21	0.07	227.29	2.78	2.39	0.08	216.77	2.23
Color07	0.55	0.2	258.95	38.48	0.57	0.23	243.64	40.99
Color08	4.83	0.05	248.09	1.19	4.94	0.04	237.12	1.14
Color09	0.99	0.07	215.69	5.08	1.39	0.05	194.85	3.02
Color10	1.11	0.09	132	1.93	1.52	0.11	137.96	2.68
Color11	5.66	0.15	81.13	1.34	5.52	0.2	78.79	1.76
Color12	1.98	0.14	101.12	2.17	2.24	0.18	108.43	2.04
Color13	2.55	0.12	70.06	2.71	2.56	0.13	77.1	2.51
Color14	2.78	0.13	53.71	6.53	2.64	0.16	59.18	5.37
Color15	3.2	0.18	246.58	2.12	3.32	0.16	235.1	3.3
Color16	20.24	0.22	182.74	0.6	22.72	0.21	176.2	0.49
Color17	1.04	0.21	305.37	14.18	1.11	0.18	302.59	12.87
Color18	3.1	0.31	256.38	7.18	3	0.34	241.04	7.12
Color19	26.47	0.2	189.29	0.3	27.83	0.18	184.22	0.32
Color20	57.12	0.17	43.66	0.17	54.91	0.24	43.57	0.23
Color21	24.92	0.23	291.58	0.5	21.99	0.21	282.11	0.44
Color22	8.55	0.36	270.94	2.45	7.99	0.37	260.3	2.65
Color23	5.06	0.22	285.63	2.58	4.79	0.19	277.85	2.67
Color24	29.27	0.1	255.34	0.37	28.75	0.09	239.7	0.24
Color25	17.78	0.28	279.74	1.03	16.41	0.25	270.18	1.2
Color26	4	0.22	188.87	2.2	4.1	0.2	183.97	2.39
Color27	3.8	0.18	185.3	3.86	4.06	0.26	180.1	3.34
Color28	5.15	0.1	260.09	3.27	5.07	0.15	246.71	2.14
Color29	18.88	0.07	267.34	0.34	18.04	0.06	257.31	0.48
Color30	7.64	0.02	211.5	0.17	8.68	0.02	199.56	0.19
Color31	0.3	0.17	240.7	89.45	0.28	0.21	190.8	99.53
Color32	0.59	0.2	161.69	15.49	0.63	0.21	155.81	24.81
Color33	0.66	0.3	141.9	15.8	0.76	0.33	129.25	8.58
Color34	6.31	0.19	245.29	1.81	6.42	0.18	232.97	2.78
Color35	52.09	0.07	35.65	0.17	49.25	0.11	36.32	0.18
Color36	6.08	0.09	244.34	1.7	6.22	0.1	233.1	2.1
Color37	6.71	0.09	245.29	1.26	6.82	0.09	234.4	1.32
Color38	5.39	0.11	252.53	1.41	5.43	0.1	238.69	1.59
Color39	4.14	0.3	254.06	2.85	4.16	0.32	242.73	3.8
Color40	12.09	0.2	22.89	1.72	11.2	0.25	23.47	2.5
Color41	12.33	0.3	17.1	1.31	10.82	0.24	18.5	1.54
Color42	14.32	0.18	12.68	1.13	12.75	0.14	12.44	1.44
Color43	16.99	0.17	11.97	1.32	15.12	0.27	11.68	1.82

## บทที่ 8 บทสรุป

### 8.1 สรุปผลการทดลอง

ความสัมพันธ์ของค่าที่คำนวณได้ ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C_{ab}^*$ ,  $h_{ab}$ ,  $L_{10}^*$ ,  $a_{10}^*$ ,  $b_{10}^*$ ,  $C_{ab,10}^*$ ,  $h_{ab,10}$ ,  $\Delta E_{ab}^*$ ,  $\Delta E_{ab,10}^*$ , MCDM และ MCDM<sub>10</sub>) กับสีตัวอย่างคือ

(1) กรณีที่เป็นสีลูโซต์ (เช่นสีตัวอย่างที่ 5 ในตารางที่ 7.1x ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 7) ค่าที่วัดได้ในกรณีที่มีมุมรับแสงเป็นมุมแบบแทรกสอด (อะซิมป์ติกวาร์ที่  $\pm 15^\circ$ ) เจดสีและค่ารังสีจะมีความแตกต่างกันมาก โดยดูได้จากค่า  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C_{ab}^*$ ,  $h_{ab}$  ในกรณีที่ใช้ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานตาม CIE ปี 1931 หรือค่า  $a_{10}^*$ ,  $b_{10}^*$ ,  $C_{ab,10}^*$ ,  $h_{ab,10}$  ในกรณีที่ใช้ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานเสริมตาม CIE ปี 1964 ส่วนในมุมเมทัลลิก (เช่นสีตัวอย่างที่ 5 ในตารางที่ 7.1ง และ 7.1จ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 7) ที่มีมุมอะซิมป์ติกวาร์ที่  $+25^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $+75^\circ$  และ  $+110^\circ$  พบว่า ค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นๆ

(2) กรณีที่เป็นสีแบบธรรมดา ดังเช่นในสีตัวอย่างที่ 30 ทั้งที่เป็นสีขาว แต่กลับมีตัวประกอบการสะท้อนแสงต่ำกว่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างสีที่ 5 ซึ่งเป็นเพียงสีบรอนซ์ ดังในตารางที่ ก.1ค จะเห็นว่าสีตัวอย่างที่ 30 มีค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 31.61, -2.32 และ 0.04 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ 5 ซึ่งมี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  เท่ากับ 53.6, -4.06 และ -0.48 ปรากฏว่ามีความสว่างแตกต่างกันถึงประมาณ 22% ทั้งนี้ก็เนื่องจากสีลูโซต์มีการผสมเม็ดสีแบบเมทัลลิก ทำให้แสงสะท้อนได้ดีขึ้นในหลายๆมุมมอง

(3) ค่า  $\Delta E_{ab}^*$ ,  $\Delta E_{ab,10}^*$ , MCDM และ MCDM<sub>10</sub> บ่งบอกถึงความสามารถในการทำซ้ำ และขอบเขตที่ยอมรับได้โดยผู้บริโภค โดยค่า  $\Delta E_{ab}^*$  และ  $\Delta E_{ab,10}^*$  จะบอกเป็นค่าสูงสุด ส่วนกรณี MCDM และ MCDM<sub>10</sub> ก็คือการเอา  $\Delta E_{ab}^*$  และ  $\Delta E_{ab,10}^*$  มาเฉลี่ยนั่นเอง โดยค่าของ  $\Delta E_{ab}^*$ ,  $\Delta E_{ab,10}^*$ , MCDM และ MCDM<sub>10</sub> จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อขนาดของสัญญาณที่วัดมีค่าน้อยลง เนื่องจากที่ค่าน้อย ทำให้สัญญาณรบกวนส่งผลกระทบต่อได้มากกว่า ดังที่เห็นในรูปที่ 7.10 นั่นคือค่าของตัวประกอบการสะท้อนแสงของสีตัวอย่าง 31( สีดำ) จะมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดในการวัดสัญญาณแต่ละครั้ง จากตารางที่ 7.1x สีตัวอย่างที่ 5 ซึ่งสว่างกว่า มีค่า  $\Delta E_{ab}^*$  (max),  $\Delta E_{ab,10}^*$  (max), MCDM และ MCDM<sub>10</sub> เท่ากับ 0.03 ขณะที่สีตัวอย่างที่ 31 ในตารางเดียวกัน มีค่า  $\Delta E_{ab}^*$  (max),  $\Delta E_{ab,10}^*$  (max) เท่ากับ 0.69

(4) ค่า  $h_{ab,10}$ ,  $h_{ab}$  ที่ความสว่างต่ำๆนั้นจะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงด้วย เพราะว่าการแตกต่างของเจดสีจะมีผลน้อยลง เมื่อวัตถุเข้าใกล้สีดำ ดังที่อธิบายในบทที่ 7 ตามทฤษฎีของ MacAdam รูปที่ 5.5 เมื่อ Y (เทียบได้กับค่า  $L^*$  ความสว่าง) น้อยลง ค่าขอบเขตการรับรู้สีจะลดลงตามไปด้วย ตามรูปวงรีที่ค่อยๆมีขนาดเล็กลงนั้น

(5) จากการทดลองวัดสีคู่ที่คล้ายกัน กับคู่ที่แตกต่างกันในบทที่ 7 โดยในคู่สีที่คล้ายกันนั้น มีเพียงบางมุมเท่านั้นที่เห็นความแตกต่าง ซึ่งทำให้มัดดิเองเกิดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มีความสำคัญ สำหรับการบอกความแตกต่างของสี

จากผลการทดลองการวัดสีรถยนต์ ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นมาตรฐานของค่าไตรสติมัลส์ที่ประเมิน  $X$   $Y$   $Z$   $X_{10}$   $Y_{10}$   $Z_{10}$  คือ

(1) สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากส่วนรับสัญญาณเช่น สัญญาณรบกวนและกระแสมีคของตัวตรวจจับแสง เนื่องจากห้องที่ใช้วัดและระบบการวัด ไม่ใช่ระบบปิด และการใช้หลอดไฟโคมัลติฟลายเออร์ซึ่งไวต่อแสงมาก ดังนั้นแม้กระทั่งแสงจันทร์ที่ผ่านหน้าต่างก็ส่งผลได้ สัญญาณรบกวนจากการกระเพื่อมของแหล่งจ่ายไฟตรงแรงดันสูง และจากความร้อนของไส้หลอดที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่ม ซึ่งส่งผลให้กระแสไหลผ่านหลอดน้อยลง เป็นต้น

(2) แหล่งกำเนิดแสง (source) ถ้าต้องการให้ได้ค่าถูกต้องตลอดทั้งความยาวคลื่นที่วัดควรใช้หลอดที่มีสเปกตรัมกว้างเพียงพอ เช่น หลอดซินอนที่ถูกอัดด้วยความดันอากาศสูง จะให้ความเข้มแสงเพียงพอที่จะวัดทั้งช่วงของแสง แต่เนื่องจากราคาค่อนข้างสูง และค่าที่ได้เพิ่มความแม่นยำไม่มากพอที่จะคุ้มกับราคา ทำให้การทดลองนี้ใช้ค่าความยาวคลื่นในช่วง 400 ถึง 780 นาโนเมตร แทนที่จะเริ่มที่ 380 นาโนเมตรตามค่ามาตรฐาน

(3) มาตรฐานสีขาว (white standard) ที่ใช้เป็นกระเบื้องเซรามิกปูห้องน้ำแบบสีขาวด้าน ซึ่งสะท้อนแสงได้ดี แต่ไม่ใช่มาตรฐานสีขาวที่ควรจะเป็น ดังนั้น ค่าที่ได้จากการทดลองนี้จึงยังไม่มาตรฐาน ฉะนั้น การทดลองนี้จึงเลือกมุมเฉพาะเพื่อวัดแสงที่สะท้อนจากเซรามิกนี้ โดยเลือกมุมฉายแสงที่  $45^\circ$  และเลือกมุมรับแสงที่มุม  $90^\circ$  โดยมุมนี้เป็นมุมมาตรฐานที่เครื่องวัดสีทั่วไปใช้ในการวัดแสงสะท้อนแบบกระจายแสง โดยวิธีที่สามารถทำให้การทดลองนี้ได้มาตรฐาน กรณีแรกถ้าสามารถหาแผ่นสีขาวมาตรฐานได้ (ที่แผ่นจะระบุค่า  $X$   $Y$   $Z$  หรือค่าไตรสติมัลส์อื่นๆในปริภูมิสีอื่น) จะนำแผ่นมาตรฐานนั้นมาวัดเพื่อนำไปเทียบ แล้วก็คำนวณค่า  $X$   $Y$   $Z$  ย้อนกลับไปเพื่อปรับให้เป็นมาตรฐาน กรณีที่หาแผ่นมาตรฐานได้แต่ไม่รู้ว่ามีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงเท่าไร ต้องใช้อินดิเกรตติ้งสเฟียร์เพื่อหาค่าการสะท้อนแสง(reflectance) ทั้งหมดจากแผ่นมาตรฐานสีขาวนั้น ซึ่งปรากฏว่าราคาของอินดิเกรตติ้งสเฟียร์สูงมาก และแผ่นมาตรฐานสีขาวมักจะมาพร้อมกับตัวเครื่องวัดสีซึ่งก็มีราคาสูงเช่นกัน จึงไม่สามารถหาได้

(4) โมโนโครเมเตอร์เป็นแบบเกรตติงเดี่ยว เนื่องจากมีเกรตติงเพียงตัวเดียว จึงต้องใช้การหมุนเกรตติง ซึ่งทำให้ใช้เวลานานในการวัด ส่งผลให้สัญญาณรบกวนมีผลมากขึ้น

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการวัดสรีรยนต์พบว่า ในกรณีที่ใช้โมโนโครเมเตอร์แบบเกรตติงเดียวจะมีการสูญเสียขนาดของสัญญาณไปมาก และค่อนข้างใช้เวลานานในการวัด การวัดสีในมุมอะสเปกคิวลาร์นั้น ขนาดสัญญาณที่ได้จะมีขนาดต่ำมาก จึงต้องใช้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เพื่อขยายและวัดสัญญาณ ซึ่งก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่เพื่อการพัฒนาในอนาคต สำหรับเครื่องมัลติแองเกิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์นี้ควรใช้เกรตติงแบบเลี้ยวเบนเป็นหลักในการพัฒนา และถ้าใช้เกรตติงประเภทนี้แล้วมีความเป็นไปได้ที่จะใช้โฟโตไดโอดอาร์เรย์เป็นตัวรับแสง ซึ่งจะช่วยให้เครื่องมือมีขนาดเล็กลง และมีความรวดเร็วในการวัดค่า อีกทั้งยังสามารถพกพาได้ด้วย สุดท้ายนี้หวังว่าผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

- [1] Robert T. Marcus. Measuring effect pigments. Available from:  
<http://www.pcimag.com> (9 January 2004).
- [2] Dr. Joerg Seubert and Dr. Andrea Fetz. PVD aluminum pigments: superior brilliance for coatings & graphic arts. Available from:  
<http://www.pcimag.com> (6 January 2000).
- [3] Camp, Alphonse D., Aylward, Peter T., Bourdelais, Robert P. Photographic element with nacreous overcoat. United states patent 6,596,447 (22 July 2003).
- [4] Sharathkumar Mendon and Shelby Thames. Pigments more than just a pretty color (second of two parts) Available from :  
<http://www.paintandpowder.com> (25 September 2003).
- [5] Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System. E2194-03, American Society for Testing and Materials [ASTM].
- [6] Deane B. Judo and Gunter Wyszecki. Color in Business, Science and Industry. Third Edition. New York : John Wiley & Sons, 1975.
- [7] D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki (with the collaboration of H. W. Budde, H. R. Condit, S. T. Henderson, and J. L. Simonds), Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. J. Opt. Soc. Am. 54 (1964) : 1031.
- [8] Roderick McDonald. Colour physics for industry. Second Edition. Society of Dyers and Colourists, 1997.
- [9] R. Davis and K. S. Gibson, Filters for the reproduction of sunlight and daylight and the determination of color temperature, Misc. Pub. 114, Natl. Bur. Std., 1931.
- [10] Anni Berger-Schunn. Practical Color Measurement. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [11] W.S. Stiles and J.M. Burch, Interim report to the Commission Internationale de l'Eclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching. Optica Acta 2 (1955) : 168.
- [12] W.S. Stiles and J.M. Burch, N. P. L. colour-matching investigation final report. Optica 6 (1959):1.
- [13] N. I. Speranskaya, Determination of spectrum color coordinates for twenty-seven normal observers. Opt. Spectr. (USSR), Engl. Trans. 7 (1959) : 424.
- [14] W. D. Wright. THE MEASUREMENT OF COLOUR. Third Edition. London : Hilger & Watts LTD, 1964.
- [15] H.E. Ives, A precision artificial eye, Phys. Rev. 6 (1915) : 334.
- [16] Timothy Mouw. Sphere vs. 0°/45°. Available from: <http://www.x-rite.com>, X-rite incorporated (15 September 1995).
- [17] A guide to understanding color communication. Available from:  
<http://www.x-rite.com>, X-rite incorporated, 2002.
- [18] Berg, et al. Multiangular color measuring apparatus. United states patent 5,387,977 (7 February 1995).

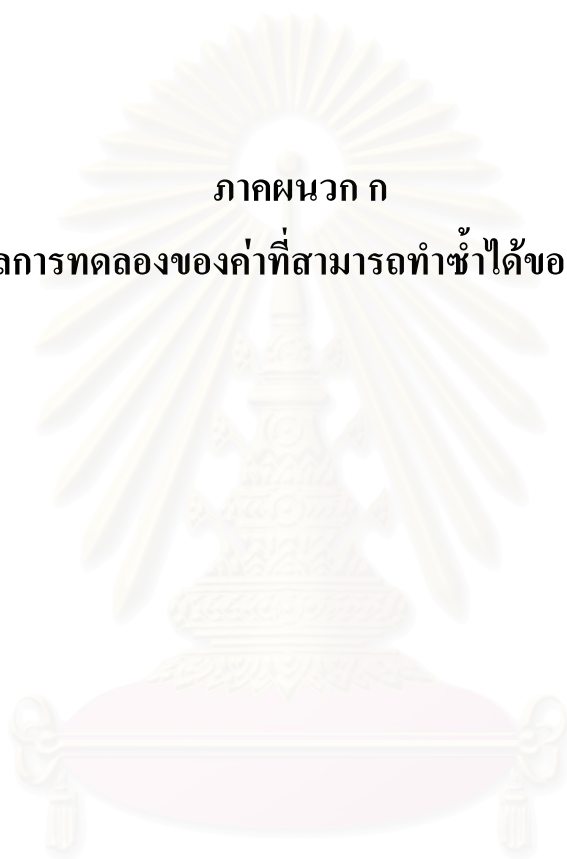
ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลองของค่าที่สามารถทำซ้ำได้ของสีตัวอย่าง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1ก ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
(มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) (X Y และ Z) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>					
	X		Y		Z	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	9.43	0.01	10.39	0.01	12.06	0.02
Color02	9.9	0.01	10.89	0.01	11.95	0.01
Color03	13.04	0.01	14.38	0.01	16.28	0.02
Color04	9.42	0.01	10.29	0.01	11.54	0.01
Color05	19.7	0.01	21.6	0.01	23.76	0.01
Color06	17.66	0.01	19.43	0.01	21.27	0.01
Color07	4.09	0.01	4.39	0.01	4.54	0.03
Color08	9.86	0.01	10.72	0.01	11.09	0.02
Color09	15.66	0.01	16.99	0.01	17.15	0.02
Color10	8.42	0.01	9.05	0.01	8.45	0.01
Color11	8.34	0	8.77	0.01	7.55	0.01
Color12	20.32	0.01	21.72	0.01	18.78	0.01
Color13	14.3	0.01	15.34	0.01	14.64	0.02
Color14	11.83	0	12.44	0	11.8	0.01
Color15	8.54	0.01	9.2	0.01	8.76	0.02
Color16	1.26	0.01	1.7	0.01	1.6	0.01
Color17	1.7	0.01	1.99	0.01	2.26	0.01
Color18	1.23	0.01	1.4	0.01	1.76	0.02
Color19	2.83	0.01	4.2	0.01	4.36	0.02
Color20	3.36	0.01	2.64	0.01	1.72	0.02
Color21	1.31	0.01	1.5	0.01	2.36	0.02
Color22	1.77	0.01	2.19	0.01	3.98	0.02
Color23	1.7	0.02	1.9	0.01	2.31	0.03
Color24	2.24	0.01	2.57	0.01	3.82	0.03
Color25	3.59	0.01	4.5	0.01	8.51	0.01
Color26	7.89	0.01	9.43	0	9.24	0.01
Color27	6.19	0.01	7.41	0.01	7.2	0.02
Color28	15.29	0.01	16.94	0.01	20.8	0.02
Color29	7.56	0.01	8.76	0.01	10.19	0.02
Color30	6.35	0.01	6.92	0.01	7.51	0.01
Color31	1.02	0.01	1.13	0.01	1.27	0.01
Color32	1.07	0.01	1.18	0.01	1.33	0.02
Color33	1.17	0.01	1.3	0.01	1.36	0.01
Color34	8.42	0.02	9.43	0.01	11.66	0.01
Color35	1.96	0.01	1.58	0.01	1.26	0.02
Color36	10.21	0	11.45	0.01	14.1	0.02
Color37	9.11	0.01	10.31	0.01	12.28	0.02
Color38	10.69	0.01	11.78	0.01	14.46	0.02
Color39	4.3	0.01	4.87	0.01	7	0.02
Color40	3.5	0.01	3.48	0	4.01	0.01
Color41	2.39	0.01	2.09	0.01	1.84	0.03
Color42	1.98	0.01	1.87	0.01	1.95	0.02
Color43	2.88	0.01	2.58	0.01	2.61	0.02

ตารางที่ ก.1๖ ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม  $25^{\circ}$  และรับแสงที่มุม  $170^{\circ}$   
(มุมอะสเปกทิวลาร์  $-15^{\circ}$ ) ( $X_{10}$   $Y_{10}$  และ  $Z_{10}$ ) สำหรับ illuminant  $D_{65}$

Specimen	Standard Illuminant $D_{65}$					
	$X_{10}$		$Y_{10}$		$Z_{10}$	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	9.42	0.01	10.54	0.01	11.83	0.02
Color02	9.89	0.01	11	0.01	11.72	0.01
Color03	13.02	0.01	14.57	0.01	15.97	0.02
Color04	9.41	0.01	10.4	0.01	11.34	0.01
Color05	19.67	0.01	21.83	0.01	23.3	0.01
Color06	17.63	0.01	19.64	0.01	20.86	0.02
Color07	4.08	0.01	4.41	0.01	4.46	0.03
Color08	9.83	0.01	10.78	0.01	10.86	0.02
Color09	15.59	0.01	17.07	0.01	16.78	0.02
Color10	8.36	0.01	9.06	0.01	8.22	0.01
Color11	8.26	0	8.73	0	7.35	0.01
Color12	20.14	0.01	21.67	0.01	18.22	0.02
Color13	14.2	0.01	15.38	0.01	14.27	0.02
Color14	11.73	0	12.46	0	11.53	0.01
Color15	8.5	0.01	9.21	0.01	8.55	0.02
Color16	1.28	0.01	1.72	0.01	1.55	0.02
Color17	1.71	0.01	2.02	0.01	2.21	0.01
Color18	1.23	0.01	1.43	0.01	1.72	0.02
Color19	2.89	0.01	4.3	0.01	4.15	0.03
Color20	3.22	0.01	2.58	0.01	1.69	0.03
Color21	1.31	0.01	1.59	0.01	2.27	0.02
Color22	1.78	0.01	2.35	0.01	3.85	0.02
Color23	1.7	0.01	1.93	0.01	2.26	0.03
Color24	2.24	0.01	2.67	0.01	3.73	0.04
Color25	3.64	0.01	4.81	0.01	8.29	0.01
Color26	7.93	0.01	9.49	0	8.96	0.02
Color27	6.23	0.01	7.45	0.01	6.98	0.03
Color28	15.27	0.01	17.29	0	20.39	0.02
Color29	7.58	0.01	8.91	0.01	9.94	0.02
Color30	6.34	0.01	6.98	0.01	7.35	0.02
Color31	1.02	0	1.15	0.01	1.24	0.02
Color32	1.07	0.01	1.2	0.01	1.3	0.02
Color33	1.17	0.01	1.31	0.01	1.32	0.02
Color34	8.44	0.01	9.61	0.01	11.46	0.01
Color35	1.88	0.01	1.57	0.01	1.24	0.02
Color36	10.22	0.01	11.66	0	13.85	0.02
Color37	9.12	0.01	10.49	0.01	12.04	0.02
Color38	10.67	0.01	12	0.01	14.2	0.02
Color39	4.31	0.01	5.03	0.01	6.88	0.02
Color40	3.45	0.01	3.52	0	3.94	0.01
Color41	2.31	0.01	2.07	0.01	1.83	0.04
Color42	1.93	0.01	1.88	0.01	1.92	0.02
Color43	2.81	0.01	2.58	0.01	2.6	0.03

ตารางที่ ก.1ค ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
(มุมอะสเปกคิวลาร์ -15°) ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>					
	$L^*$		$a^*$		$b^*$	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	38.52	0.02	-3.5	0.06	-2.11	0.07
Color02	39.39	0.02	-3.48	0.04	-0.3	0.04
Color03	44.78	0.02	-4.07	0.06	-1.44	0.02
Color04	38.36	0.01	-2.9	0.08	-0.97	0.05
Color05	53.6	0.01	-4.06	0.04	-0.48	0.02
Color06	51.19	0.01	-4.26	0.03	-0.28	0.03
Color07	24.92	0.03	-1.11	0.13	1.15	0.12
Color08	39.1	0.02	-2.55	0.05	1.55	0.04
Color09	48.25	0.01	-2.8	0.04	2.7	0.05
Color10	36.08	0.02	-1.57	0.03	4.42	0.05
Color11	35.53	0.01	0.12	0.04	6.62	0.05
Color12	53.73	0.01	-1.55	0.02	8.82	0.03
Color13	46.1	0.01	-1.68	0.04	4.53	0.05
Color14	41.91	0	0.08	0.04	4.42	0.02
Color15	36.36	0.02	-1.72	0.06	3.9	0.05
Color16	13.82	0.06	-10.22	0.22	2.43	0.24
Color17	15.46	0.04	-4.75	0.1	-0.8	0.09
Color18	11.95	0.05	-3.07	0.18	-2.37	0.19
Color19	24.31	0.03	-18.7	0.18	1.03	0.13
Color20	18.52	0.05	15.26	0.17	9.33	0.23
Color21	12.63	0.04	-3.52	0.33	-6.39	0.17
Color22	16.46	0.04	-7.43	0.18	-10.48	0.12
Color23	14.93	0.07	-2.65	0.24	-2.06	0.23
Color24	18.23	0.03	-4.26	0.17	-6.49	0.17
Color25	25.25	0.03	-10	0.08	-14.43	0.05
Color26	36.79	0.01	-9.37	0.07	3.08	0.05
Color27	32.72	0.02	-8.77	0.07	3.08	0.1
Color28	48.19	0.01	-4.71	0.03	-4.58	0.04
Color29	35.51	0.02	-6.97	0.08	-2.05	0.08
Color30	31.61	0.02	-2.32	0.05	0.04	0.06
Color31	10.06	0.04	-1.99	0.29	-0.39	0.16
Color32	10.43	0.11	-1.85	0.17	-0.53	0.25
Color33	11.27	0.05	-2.17	0.2	0.56	0.16
Color34	36.8	0.02	-4.62	0.08	-4.01	0.05
Color35	13.13	0.06	11.66	0.2	4.93	0.29
Color36	40.32	0.01	-5.08	0.04	-4.14	0.04
Color37	38.39	0.01	-5.6	0.05	-2.93	0.04
Color38	40.86	0.01	-3.74	0.05	-4.07	0.05
Color39	26.35	0.02	-4.38	0.06	-7.14	0.07
Color40	21.86	0.02	3.13	0.11	-1.28	0.08
Color41	15.93	0.06	8.93	0.18	3.66	0.34
Color42	14.78	0.07	4.79	0.16	0.75	0.2
Color43	18.26	0.03	8.18	0.1	1.4	0.19

ตารางที่ ก.1ง ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม  $25^\circ$  และรับแสงที่มุม  $170^\circ$   
(มุมอะสเปกทีวาร์  $-15^\circ$ ) ( $L^*_{10}$   $a^*_{10}$  และ  $b^*_{10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>					
	$L^*_{10}$		$a^*_{10}$		$b^*_{10}$	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	38.79	0.02	-4.58	0.07	-1.45	0.08
Color02	39.58	0.02	-4.19	0.02	0.2	0.04
Color03	45.03	0.02	-5.07	0.03	-0.8	0.03
Color04	38.55	0.01	-3.59	0.06	-0.55	0.04
Color05	53.85	0.01	-5.04	0.03	0.17	0.02
Color06	51.42	0.01	-5.17	0.03	0.35	0.03
Color07	24.98	0.03	-1.49	0.12	1.37	0.16
Color08	39.21	0.02	-3.05	0.05	1.95	0.05
Color09	48.35	0.01	-3.4	0.05	3.17	0.05
Color10	36.1	0.02	-2.02	0.04	4.85	0.05
Color11	35.46	0.01	-0.12	0.03	6.86	0.05
Color12	53.67	0.01	-1.96	0.03	9.34	0.04
Color13	46.15	0.01	-2.31	0.04	5.03	0.06
Color14	41.93	0.01	-0.55	0.03	4.78	0.03
Color15	36.38	0.02	-2.02	0.06	4.23	0.08
Color16	13.94	0.06	-10.06	0.25	2.95	0.31
Color17	15.61	0.04	-5.1	0.12	-0.36	0.1
Color18	12.16	0.04	-3.83	0.17	-1.91	0.23
Color19	24.65	0.02	-18.99	0.18	2.45	0.16
Color20	18.29	0.05	14.12	0.13	8.98	0.28
Color21	13.18	0.05	-5.89	0.22	-5.03	0.22
Color22	17.23	0.03	-10.41	0.18	-8.69	0.13
Color23	15.12	0.06	-3.31	0.27	-1.63	0.27
Color24	18.67	0.03	-5.87	0.15	-5.49	0.21
Color25	26.19	0.02	-13.19	0.07	-12.47	0.05
Color26	36.91	0.01	-9.35	0.07	3.78	0.06
Color27	32.81	0.02	-8.66	0.07	3.69	0.11
Color28	48.62	0	-6.47	0.03	-3.59	0.04
Color29	35.81	0.01	-7.9	0.06	-1.19	0.08
Color30	31.75	0.02	-2.89	0.03	0.46	0.07
Color31	10.15	0.04	-2.34	0.18	-0.09	0.22
Color32	10.52	0.09	-2.15	0.2	-0.25	0.22
Color33	11.35	0.06	-2.48	0.16	0.92	0.19
Color34	37.13	0.02	-5.79	0.07	-3.31	0.04
Color35	13.05	0.04	10.17	0.13	4.9	0.26
Color36	40.68	0.01	-6.28	0.05	-3.38	0.05
Color37	38.7	0.01	-6.66	0.06	-2.19	0.06
Color38	41.22	0.01	-5.19	0.07	-3.29	0.06
Color39	26.81	0.02	-6.08	0.07	-6.24	0.06
Color40	22.01	0.02	1.89	0.08	-0.97	0.1
Color41	15.84	0.04	7.77	0.15	3.42	0.37
Color42	14.82	0.06	3.7	0.12	0.84	0.18
Color43	18.26	0.02	7.03	0.1	1.15	0.19

ตารางที่ ก.1จ ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°

(มุมอะสเปกทิวลาร์ -15°) ( $C^*_{ab}$   $h_{ab}$   $C^*_{ab,10}$  และ  $h_{ab,10}$ ) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>							
	$C^*_{ab}$		$h_{ab}$		$C^*_{ab,10}$		$h_{ab,10}$	
	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.	mean	Std. Dev.
Color01	4.09	0.06	211.01	0.97	4.8	0.05	197.54	1.08
Color02	3.49	0.04	184.98	0.58	4.19	0.02	177.3	0.49
Color03	4.32	0.06	199.51	0.44	5.13	0.03	188.96	0.3
Color04	3.06	0.07	198.55	1.26	3.63	0.05	188.66	0.72
Color05	4.09	0.04	186.72	0.28	5.05	0.03	178.03	0.26
Color06	4.27	0.03	183.81	0.43	5.18	0.03	176.13	0.31
Color07	1.6	0.16	134.05	2.57	2.02	0.19	137.48	1.75
Color08	2.98	0.06	148.61	0.58	3.61	0.06	147.44	0.58
Color09	3.89	0.05	136.08	0.55	4.64	0.06	136.97	0.46
Color10	4.69	0.05	109.5	0.4	5.25	0.05	112.66	0.48
Color11	6.62	0.05	88.98	0.39	6.86	0.05	91	0.24
Color12	8.96	0.03	99.97	0.15	9.54	0.04	101.84	0.19
Color13	4.83	0.05	110.35	0.53	5.53	0.07	114.64	0.43
Color14	4.42	0.02	88.99	0.51	4.81	0.03	96.55	0.36
Color15	4.26	0.06	113.78	0.74	4.69	0.09	115.54	0.48
Color16	10.5	0.25	166.65	1.11	10.49	0.31	163.71	1.4
Color17	4.82	0.09	189.55	1.16	5.11	0.11	184.05	1.17
Color18	3.89	0.14	217.68	3.22	4.28	0.16	206.47	3.32
Color19	18.73	0.18	176.85	0.39	19.15	0.19	172.65	0.44
Color20	17.89	0.1	31.44	0.86	16.74	0.11	32.43	0.98
Color21	7.3	0.15	241.17	2.67	7.75	0.13	220.52	2.08
Color22	12.85	0.09	234.64	0.88	13.56	0.09	219.85	0.84
Color23	3.36	0.15	217.84	5.06	3.71	0.19	206.33	5.18
Color24	7.77	0.09	236.7	1.69	8.04	0.09	223.06	1.72
Color25	17.56	0.05	235.27	0.26	18.15	0.06	223.41	0.21
Color26	9.87	0.08	161.81	0.27	10.08	0.09	157.97	0.24
Color27	9.29	0.09	160.68	0.49	9.41	0.1	156.91	0.51
Color28	6.57	0.03	224.22	0.4	7.41	0.03	209.03	0.37
Color29	7.27	0.07	196.4	0.66	7.99	0.06	188.56	0.62
Color30	2.32	0.05	179.15	1.51	2.93	0.04	170.93	1.25
Color31	2.04	0.26	191.63	5.58	2.35	0.17	182.48	5.53
Color32	1.94	0.17	195.94	7.54	2.17	0.21	186.45	5.67
Color33	2.24	0.23	165.8	3.19	2.65	0.19	159.77	3.65
Color34	6.12	0.08	220.96	0.44	6.67	0.07	209.77	0.28
Color35	12.66	0.16	22.91	1.44	11.29	0.11	25.71	1.37
Color36	6.55	0.04	219.17	0.42	7.13	0.04	208.3	0.53
Color37	6.33	0.04	207.61	0.43	7.01	0.04	198.22	0.58
Color38	5.53	0.05	227.41	0.59	6.15	0.05	212.4	0.68
Color39	8.38	0.06	238.5	0.47	8.71	0.06	225.75	0.44
Color40	3.38	0.11	337.79	1.31	2.13	0.09	332.74	2.43
Color41	9.66	0.06	22.31	2.23	8.49	0.07	23.76	2.63
Color42	4.86	0.15	8.92	2.41	3.8	0.13	12.8	2.7
Color43	8.3	0.09	9.72	1.36	7.12	0.1	9.32	1.58



ตารางที่ ก.1ฉ ค่าที่สามารถทำซ้ำได้ สำหรับการฉายแสงที่มุม 25° และรับแสงที่มุม 170°  
 (มุมอะสเปกทิวลาร์ -15°) (ค่าสูงสุดของ  $\Delta E^*_{ab}$  และ  $\Delta E^*_{ab,10}$  และค่า MCDM  
 และ MCDM<sub>10</sub>) สำหรับ illuminant D<sub>65</sub>

Specimen	Standard Illuminant D <sub>65</sub>			
	MCDM	MCDM <sub>10</sub>	$\Delta E^*_{ab}$ (max)	$\Delta E^*_{ab,10}$ (max)
Color01	0.08	0.09	0.19	0.2
Color02	0.05	0.04	0.09	0.09
Color03	0.06	0.04	0.1	0.06
Color04	0.08	0.06	0.15	0.12
Color05	0.04	0.03	0.09	0.07
Color06	0.04	0.04	0.05	0.07
Color07	0.14	0.16	0.31	0.41
Color08	0.06	0.06	0.11	0.12
Color09	0.05	0.05	0.11	0.12
Color10	0.05	0.06	0.09	0.1
Color11	0.06	0.05	0.1	0.13
Color12	0.03	0.04	0.06	0.08
Color13	0.06	0.07	0.11	0.14
Color14	0.04	0.04	0.08	0.06
Color15	0.07	0.08	0.13	0.2
Color16	0.29	0.36	0.48	0.65
Color17	0.11	0.14	0.25	0.23
Color18	0.23	0.25	0.36	0.4
Color19	0.19	0.18	0.41	0.52
Color20	0.22	0.23	0.65	0.74
Color21	0.32	0.26	0.53	0.67
Color22	0.19	0.19	0.4	0.45
Color23	0.24	0.28	0.8	0.91
Color24	0.2	0.22	0.44	0.51
Color25	0.09	0.08	0.13	0.12
Color26	0.08	0.08	0.16	0.15
Color27	0.1	0.11	0.23	0.25
Color28	0.05	0.04	0.09	0.1
Color29	0.09	0.09	0.17	0.15
Color30	0.07	0.06	0.13	0.14
Color31	0.29	0.25	0.47	0.42
Color32	0.29	0.28	0.55	0.47
Color33	0.21	0.23	0.5	0.46
Color34	0.08	0.07	0.18	0.17
Color35	0.28	0.23	0.76	0.68
Color36	0.05	0.06	0.09	0.14
Color37	0.05	0.07	0.09	0.14
Color38	0.06	0.08	0.14	0.17
Color39	0.08	0.08	0.16	0.14
Color40	0.11	0.11	0.2	0.19
Color41	0.27	0.3	0.81	0.9
Color42	0.24	0.21	0.33	0.29
Color43	0.17	0.18	0.41	0.42

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรชัย ชารีงามเกิดเมื่อวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย