การวัดค่าสีพอลิเมอร์ในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* จากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นคลื่น 400-1000 นาโนเมตร

โดย
นายวัชรากร มูลศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวัดค่าสีพอลิเมอร์ในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* จากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น
คลื่น 400-1000 นาโนเมตร

โดย
นายวัชรากร มูลศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

PLASTIC COLOR MEASUREMENT BASED ON RAW SPECTRUM IN 400-1000 NANOMETER WITH CIE L*A*B* SYSTEM.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

By

MR. Watcharakorn MOOLSRI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การวัดค่าสีพอลิเมอร์ในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* จากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นคลื่น 400-1000 นาโนเมตร
โดย	นายวัชรากร มูลศรี
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดศิริ เหมศรี)

....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อดิศักดิ์ จตุรพิรีย์)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

61402232 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : CIE L*a*b*, Spectrophotometer, Partial Least Square (PLS)

นาย วัชรากร มูลศรี: การวัดค่าสีพอลิเมอร์ในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* จากสเปกตรัม ในช่วงความยาวคลื่นคลื่น 400-1000 นาโนเมตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล

ระบบค่าสี CIE L*a*b* ของหน่วยงาน Commission International del'Eclairage แบบ L*a*b* color space เป็นระบบค่าสีที่มีความน่าสนใจและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบค่าสีดังกล่าวสามารถวัดค่าความสว่าง เฉดสี และความอิ่มตัวของสีให้อยู่ในเชิงตัวเลข การวัดค่าสีในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นการวัดค่าสีแบบจุด ทำให้การวัดค่าสีของชิ้นงานบนสายพานลำเลียงที่ต้องการตรวจสอบชิ้นงานทุกชิ้นงานหรือพื้นผิวที่มีการเคลื่อนที่ เช่น ชิ้นงานพลาสติก หรือ สิ่งทอ เป็นต้น เป็นไปได้ยากและมีราคาสูง ในงานวิจัยนี้ได้การออกแบบและสร้างเครื่องวัดสีแบบเส้น (LineScan Color Meter) ทำการประกอบระบบเลนส์และเกรตติง เพื่อรับแสงสะท้อนจากตัวอย่าง และแยกแสงให้ได้ค่าสเปกตรัมในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และใช้กล้อง HQ Camera Module เป็นตัวรับสเปกตรัม และใช้ Raspberry Pi เป็นตัวประมวลผล ใช้ตัวอย่างแผ่นสีมาตรฐาน (Standard Paint Colors 2017, TOA-Chugoku Marine Paints, Ltd.) 632 สี ทำการวัดสเปกตรัมและค่าสี CIE L*a*b* จากเครื่องวัดค่า CIE L*a*b* มาตรฐาน ColourFlex EZ จากนั้นสร้างสมการความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างค่าสเปกตรัมที่วัดโดยเครื่อง LineScan และค่า CIE L*a*b* ที่วัดจากเครื่อง ColourFlex EZ ด้วยเทคนิค Partial Least Square (PLS) เพื่อให้ได้เมตริกซ์โหลดดิ่งสำหรับเครื่อง LineScan บนสายพานลำเลียงขนาด 30 เซนติเมตร พบว่าสามารถสร้างเครื่องที่ใช้ทำนายค่าสีที่มีความแม่นยำที่ R^2 เท่ากับ 0.99 เมื่อนำมาทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่างพลาสติก (PVC) และชิ้นงานตัวอย่างแผ่นพลาสติกหลากสีที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป โดยผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการทำนายของเครื่องวัดค่า CIE L*a*b* ได้ R^2 เท่ากับ 0.97 และ 0.94 ตามลำดับ

61402232 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Keyword : CIE L*a*b*, Spectrophotometer, Partial Least Square (PLS)

MR. WATCHARAKORN MOOLSRI : PLASTIC COLOR MEASUREMENT BASED ON RAW SPECTRUM IN 400-1000 NANOMETER WITH CIE L*A*B* SYSTEM. THESIS ADVISOR : SARAWUT PHUPAICHITKUN, Dr.Agr.

The color standard system of Commission International del'Eclairage's color system in L*a*b* color space is widely used because it can measure brightness, hue, and saturation. Most of the color measurement in manufacture is spot-type color measurements which are unable to inspect all part or area on the conveyor. In this research, a line-scan color meter (LineScan) using a lens, grating system, and HD camera with Raspberry Pi provide the low-cost color meter. Calibrate and validate this device using the CIE L*a*b* value of Standard Paint Colors (TOA-Chugoku Marine Paints, Ltd., 2017 with 632 colors) measured by standard measurement (ColorFlex EZ). Partial least square (PLS) regression between L*a*b* value with spectrum in the visible range give loading matric for transforming the spectrum of LineScan to L*a*b* value with R2 equals 0.99. The results showed the predictive efficiency of the PVC samples and unknown samples using the LineScan color meter with an R-squared equal to 0.97 and 0.94 respectively.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายๆ ฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศราวุธ ภู่ไพจิตร์กุล อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้กรุณาให้คำแนะนำเมื่อมีพบอุปสรรคตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดศิริ เหมศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ จตุรพิรีย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ นายจิวัฒน์ อินทจักร นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผู้ทำวิจัยเรื่อง การคัดแยกชนิดพอลิเมอร์ที่ผ่านการใช้งานแล้วบนสายพานลำเลียงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ และให้คำแนะนำเรื่องเกี่ยวกับสเปกตรัม การสร้างเครื่อง การปรับเทียบความยาวคลื่น การปรับปรุงสเปกตรัม ตลอดจนการวิเคราะห์สเปกตรัม และนาย ทศพล น่าดู สำหรับคำแนะนำการการเขียนคำสั่งบนซอฟแวร์ Labview ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์หลักที่ใช้ในเครื่องวัดค่าสี CIE L*a*b* ที่สร้างในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหารที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง multispectrometer สำหรับการนำมาเป็นเครื่องมาตรฐานในการปรับเทียบความยาวคลื่น และเครื่อง ColourFlex EZ สำหรับการวัดค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงาน เพื่อนำมาคำนวณหาค่า Loading และทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือที่สร้าง

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์และบัณฑิตวิทยาลัยศิลปากรที่อนุเคราะห์ทุนในการทำงานวิจัย

และขอขอบพระคุณบิดาและมารดา สำหรับการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และในการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิตจนสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

นาย วัชรากร มูลศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.................... จ

กิตติกรรมประกาศ.................... ฉ

สารบัญ.................... ช

สารบัญตาราง....................ฏ

สารบัญรูปภาพ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ.................... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ.................... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.................... 1

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.................... 1

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 2

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.................... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.................... 4

2.1 สี 4

2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง.................... 4

2.1.2 วัตถุ 5

2.1.2.1 การดูดกลืนพลังงาน (Absorption) 6

2.1.2.2 การสะท้อนและการส่องผ่าน (Refraction และ Transmission).................... 8

2.1.2.3 การกระเจิงของแสง (Scattering).................... 11

2.1.3 การรับสี[8-10] 12

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.1.4 ค่าสี[11-14] 16

2.1.4.1 ระบบค่าสี RGB 17

2.1.4.2 ระบบค่าสี XYZ 19

2.1.5 ระบบค่าสี CIE L*a*b* color space 21

2.2 สีและพลาสติก [15] 23

2.3 เครื่องวัดค่าสี[16] 24

2.3.1 Colorimeter 24

2.3.2 Spectrophotometer 24

2.4 ส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าสีจากสเปกตรัม 25

2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง [8] 25

2.4.2 เลนส์ (Lens) [17] 28

2.4.3 อุปกรณ์แยกสเปกตรัม [19] 33

2.4.3.1 ปริซึม (Prism) 33

2.4.3.2 เกรตติง (Diffraction grating) 34

2.4.4 อุปกรณ์รับสเปกตรัม (Detector) [20] 35

2.4.5 ซอฟต์แวร์ (Software) 38

2.5 การวิเคราะห์ค่าสเปกตรัม [21-23] 38

2.5.1 Covariance (COV) 38

2.5.2 Correlation (COR) 40

2.5.3 Eigenvector และ Eigenvalue 40

2.5.4 Principal Component Analysis (PCA) 41

2.5.5 Partial Least Squares regression 43

2.5.6 Error vector (EV) 45

2.5.7 Relative Error (RE) และ Percent Error (PE) 46

มหาวิทยาลัยศิลปากร

2.5.8 Sum of Squared Error (SSE) 46
2.5.9 Mean Absolute Error (MAE) 46
2.5.10 Total Sum of Squared (SST หรือ TSS) 47
2.5.11 Mean Square Error (MSE) 47
2.5.12 Root Mean Square Error (RMSE) 47
2.5.13 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) 47
2.5.14 Root Mean Squared Relative Error (RMSRE) 48
2.5.15 R-Squared (R^2) 48
2.5.16 การปรับแต่งสเปกตรัม 49
2.5.16.1 Savitzky–Golay Filter [24] 49
2.5.16.2 Normalization 50
2.5.16.3 Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV) 51
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 52
3.1 ตัวอย่างที่ใช้วัดค่าสี 52
3.1.1 ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทำนาย 52
3.1.2 ตัวอย่างสีมาตรฐาน 52
3.1.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์สีที่มีขายอยู่ทั่วไป 53
3.2 การออกแบบเครื่อง LineScan Color Meter สำหรับสีในระบบมาตร CIE L*a*b* 53
3.2.1 แหล่งกำเนิดแสง 53
3.2.2 ระบบเลนส์ 53
3.2.3 ขนาดกับชนิดของเกรตติง 53
3.2.4 อุปกรณ์รับภาพ 54
3.2.5 การปรับเทียบเครื่องวัด 56

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.2.6 การใช้เครื่องมือวัดมาตรฐานในการปรับเทียบเครื่องมือวัดสเปกตรัมที่สร้างขึ้น 57

3.3 การสร้างสมการการทำนายค่า CIE L*a*b* 58

3.3.1 การเก็บค่า CIE L*a*b* และสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors เพื่อนำมาสร้างสมการการทำนาย 58

3.3.2 หาความสัมพันธ์ของสเปกตรัมและค่า CIE L*a*b* ของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors 58

3.3.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors จากเครื่อง LineScan Color Meter กับค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง ColourFlex EZ 58

3.3.4 นำสมการการทำนายไปแทนค่าในซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้น 58

3.3.5 วัดค่า CIE L*a*b* ด้วยเครื่อง LineScan Color Meter 58

3.4 ทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือที่ออกแบบ 59

3.4.1 ทดสอบการวัดค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่าง PVC และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการวัดค่าของเครื่อง LineScan Color Meter 59

3.4.1.1 ผลของความหยาบของชิ้นงานพลาสติก 59

3.4.1.2 ผลของความหนาของชิ้นงานพลาสติก 59

3.4.2 ทดสอบการวัดค่า CIE L*a*b* ของตัวอย่างพอลิเมอร์สีที่มีขายอยู่ทั่วไปของเครื่อง LineScan Color Meter 59

บทที่ 4 ผลการทดลอง 60

4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเครื่องวัดค่า CIE L*a*b แบบ LineScan Color Meter 60

4.1.1 โครงของเครื่อง LineScan Color Meter และแหล่งกำเนิดแสง 60

4.1.2 ระบบเลนส์และเกรตติง 61

4.1.3 ซอฟต์แวร์ 63

4.2 การเทียบมาตรฐาน 64

4.3 การสร้างสมการการทำนายของเครื่อง LineScan Color Meter 66

4.4 ผลการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter 70
4.4.1 ผลของการทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC 70
4.4.2 ผลของความหยาบของผิวชิ้นงานต่อการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter 72
4.4.3 ผลของความหนาของชิ้นงานต่อการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter 75
4.4.4 ผลของการทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก Unknown 79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 81
5.1 สรุปผลการทดลอง 81
5.2 ข้อเสนอแนะ 81
ภาคผนวก 82
รายการอ้างอิง 104
ประวัติผู้เขียน 107

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 สีที่แสดงและสีที่ดูดกลืนของแต่ละช่วงความยาวคลื่น 6

ตารางที่ 2 แสดงปรากฏการที่เกิดจากการปล่อยพลังงาน (Emission) 7

ตารางที่ 3 แสดงสีที่ปรากฏในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ 25

ตารางที่ 4 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันมากในแสงช่วงคลื่น Visible light 27

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของระยะวัตถุ ประเภทของเลนส์ และการเกิดภาพ 28

ตารางที่ 6 แสดงการแปลความหมายของค่า R^2 49

ตารางที่ 7 การขึ้นรูป PVC ด้วยเทคนิคการกดอัด 52

ตารางที่ 8 แสดงค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ในแต่ละเครื่องและพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลังผ่านการใช้ Solver 64

ตารางที่ 9 ค่าที่ได้จากการคำนวณประสิทธิภาพของสมการการทำนายของแผ่นสีมาตรฐาน 69

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ก.) สีของแสง, ข.) สีในอุตสาหกรรมการพิมพ์ และ ค.) สีสำหรับงานศิลปะ 4

ภาพที่ 2 แสดงสีของแหล่งกำเนิดแสงที่อุณหภูมิสีต่าง ๆ 5

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่ปล่อยออกมาในค่าอุณหภูมิสีต่าง ๆ 5

ภาพที่ 4 แสดงแผนภาพของการสะท้อน ($r_\lambda R_\lambda$) การส่องผ่าน ($\tau_\lambda R_\lambda$) การดูดกลืน ($a_\lambda R_\lambda$) และการปล่อยพลังงาน ($\varepsilon_\lambda R_\lambda$) 6

ภาพที่ 5 แสดงผลของจำนวนของคอนจูเกตต่อสีที่ปรากฏ 8

ภาพที่ 6 แสดงผลของหมู่ออกโซโครมต่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นที่ดูดกลืน 8

ภาพที่ 7 แสดงการเกิดการกระเจิงในแต่ละแบบ ก.) การสะท้อนกลับหมด ข.) การกระเจิงแบบสะท้อนที่ใกล้เคียงการสะท้อน ค.) การกระเจิงแบบสะท้อนแบบ Lambertain ง.) การกระเจิงแบบสะท้อนแบบ Quasi-Lambertain จ.) การกระเจิงแบบ Complex 10

ภาพที่ 8 แสดงการเกิดการกระเจิงในแต่ละแบบในลักษณะพื้นผิวแบบต่าง ๆ ก.) ผิวเรียบ ข.) ผิวขรุขระ ค.) ผิวขรุขระมาก 10

ภาพที่ 9 แสดงการกระเจิงแสงจากความมันวาว 11

ภาพที่ 10 แสดงกลไกการกระเจิงของแสงเนื่องจากความมันวาวของผิววัตถุที่ผ่านการเคลือบผิว ... 11

ภาพที่ 11 แสดงการกระเจิงของแสงทั้งแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น 12

ภาพที่ 12 ภาคตัดขวางของดวงตามนุษย์ 12

ภาพที่ 13 แสดงลักษณะของเซลล์รับแสงรูปทรงกรวย (Cones) และเซลล์รับแสงแบบแท่ง (Rods) 13

ภาพที่ 14 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับแสงในแต่ละความยาวคลื่นของเซลล์ลักษณะทรงกรวยทั้ง 3 ชนิด 14

ภาพที่ 15 ความสามารถในการตอบสนองของเซลล์ลักษณะทรงกรวย 14

ภาพที่ 16 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับสเปกตรัมของตามนุษย์ เซนเซอร์ CCD และ เซนเซอร์ CMOS 15

ภาพที่ 17 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับสเปกตรัมของวัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็นเซนเซอร์รับภาพและแสง 15

ภาพที่ 18 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับแสงของเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ของบริษัท Hamamatsu Photonics K.K. ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำงานของเซนเซอร์นั้น ๆ 16

ภาพที่ 19 แสดงสีแดงของแร่เหล็กที่มีความอิ่มตัวของสีน้อยกว่าสีของกุหลาบสีแดง 16

ภาพที่ 20 ฟังก์ชันของการหาค่าสีในระบบ RGB ของ Guild และ Wright 17

ภาพที่ 21 RGB Color space เกิดมาจากการทำเป็นฟังก์ชัน 8 บิต 18

ภาพที่ 22 XYZ color space 19

ภาพที่ 23 L*a*b* color space 22

ภาพที่ 24 แสดงความแตกต่างระหว่าง colorimeter กับ spectrophotometer 25

ภาพที่ 25 แสดงช่วงความยาวคลื่นที่เป็นช่วง Visible light และสีที่ปรากฏในความยาวคลื่นนั้นๆ . 26

ภาพที่ 26 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงตามมาตรฐานของ CIE ที่พบบ่อย 27

ภาพที่ 27 ลักษณะและรูปร่างของเลนส์ชนิดต่าง ๆ 30

ภาพที่ 28 รูปแบบการหักเหแสงของเลนส์แต่ละชนิด 31

ภาพที่ 29 รูปแบบความโค้งของภาพที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังเลนส์ ก.) ภาพที่ไม่มีตำหนิ ข.) ตำหนิแบบ Barrel ค.) ตำหนิแบบ Pincushion และ ง.) ตำหนิแบบ Wavy หรือ Moustache 32

ภาพที่ 30 การเกิดภาพหลังเลนส์ 32

ภาพที่ 31 ระยะโฟกัสของระบบเลนส์ 2 ตัว 33

ภาพที่ 32 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากปริซึม 34

ภาพที่ 33 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากเกรตติง 34

ภาพที่ 34 ตำแหน่งการเกิดสเปกตรัม ก.) เกรตติงแบบส่องผ่าน และ ข.) เกรตติงแบบสะท้อน 35

ภาพที่ 35 ประเภทของสารกึ่งตัวนำ ก.) สารกึ่งตัวนำชนิด N และ ข.) สารกึ่งตัวนำชนิด P 36

ภาพที่ 36 กลไกการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ก.) ไม่มีการให้พลังงานกระตุ้นสารกึ่งตัวนำ ข.) ให้พลังงานกระตุ้นแก่สารกึ่งตัวนำ และ ค.) สารกึ่งตัวนำเกิดประจุขึ้น 36

ภาพที่ 37 โครงสร้างของเซนเซอร์ประเภท PMOS 37

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาพที่ 38 รูปแบบการทำงานของเซนเซอร์ ก.) เซนเซอร์แบบ CCD และ ข.) เซนเซอร์แบบ CMOS 37
ภาพที่ 39 รูปแบบและประเภทของพิกเซล 38
ภาพที่ 40 กราฟสมการเส้นตรงของ Eigenvector และ Eigenvalue 40
ภาพที่ 41 แสดงการทำงานของ PCA 43
ภาพที่ 42 แผนภาพการหาความสัมพันธ์แบบเทคนิค PLS 44
ภาพที่ 43 แสดงกราฟของค่าคะแนน (score) กับค่าตัวแปรตามที่ได้จากการทำการทดลอง 45
ภาพที่ 44 ซองใส่แผ่นสีมาตรฐานสำหรับนำไปวัดสเปกตรัม 53
ภาพที่ 45 เกรตติงแบบส่องผ่านที่ใช้ในงานวิจัย 54
ภาพที่ 46 ไมโครคอมพิวเตอร์ Raspberry Pi 4b 55
ภาพที่ 47 ความว่องไว (sensitivity) ในแต่ละความยาวคลื่นของเซนเซอร์ 55
ภาพที่ 48 โมดูลกล้อง Raspberry Pi High Quality Camera Module 55
ภาพที่ 49 แสดงการตั้งค่า Motion package ของ Raspberry Pi 56
ภาพที่ 50 ภาพถ่ายเลเซอร์โดยเครื่อง LineScan Color Meter 57
ภาพที่ 51 เครื่องวัดค่า CIE L*a*b* แบบ LineScan Color Meter 60
ภาพที่ 52 แหล่งกำเนิดแสงของเครื่องวัดค่า CIE L*a*b* แบบ LineScan Color Meter 60
ภาพที่ 53 ระบบเลน์ เกรตติง และกล้องของเครื่อง 61
ภาพที่ 54 ภาพถ่ายสเปกตรัมของหลอด LED จากไฟ LED แบบเส้น 62
ภาพที่ 55 แผนภาพการใช้ซอฟต์แวร์ 63
ภาพที่ 56 การแปลงรูปภาพเป็นค่าความเข้มแสงของแต่ละพิกเซล 64
ภาพที่ 57 กราฟแสดงค่าความยาวคลื่นของเครื่องมือทั้งสองที่ผ่านฟังก์ชัน Solver 65
ภาพที่ 58 แสดงค่า Loading ที่ได้จากเทคนิค Partial Least Squares regression (PLS) โดยให้อัลกอริทึมมี ncomp เท่ากับ 5 66
ภาพที่ 59 แสดงค่า Loading และค่า B_0 ที่ได้จากเทคนิค Partial Least Squares regression (PLS) 68

ภาพที่ 60 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ที่วัดโดย ColourFlex EZ (Calibration) และค่าที่ทำนายด้วยเทคนิค PLS (Validation) และค่าที่ทำนายด้วยเทคนิค PLS (Validation) แบบแยกค่า L* a* และ b* 70

ภาพที่ 61 แผนภาพการทำนายค่า CIE L*a*b* และหาประสิทธิภาพของสมการการทำนาย 71

ภาพที่ 62 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) กับค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 71

ภาพที่ 63 ตำแหน่งของชิ้นงานที่มีผลต่อสเปกตรัมที่วัดด้วยเครื่อง LineScan Color Meter 72

ภาพที่ 64 สเปกตรัมของชิ้นงานพลาสติก PVC สีแดงความหนา 3 มิลลิเมตร ที่มีความเรียบของผิวชิ้นงานต่างกัน วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter 73

ภาพที่ 66 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีผิวหยอบระดับที่ 1 ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 73

ภาพที่ 67 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีความหยาบระดับ 2 ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 74

ภาพที่ 65 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีผิวเรียบ ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 75

ภาพที่ 68 สเปกตรัมของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนาของชิ้นงานต่างกัน วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter 76

ภาพที่ 69 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 76

ภาพที่ 70 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 77

ภาพที่ 71 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 78

ภาพที่ 72 แสดงภาพของชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร 79

ภาพที่ 73 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก Unknown ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred) 79

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการวัดค่าสีมีความจำเป็นในระดับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานพลาสติกที่ต้องการความแม่นยำและความละเอียดของผลิตภัณฑ์สูง ซึ่งมาตรฐานระบบการวัดค่าสีทั่วไปมีหลายมาตรฐาน อาทิเช่น ระบบค่าสี RGB, ระบบค่าสี XYZ เป็นต้น มาตรฐานที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ ระบบค่าสีของหน่วยงาน Commission International del'Eclairage แบบ L*a*b* color space (CIE L*a*b*) เนื่องจากเป็นมาตรฐานการวัดค่าสีที่สามารถวัดค่าความสว่าง, เฉดสี และความอิ่มตัวของสีให้อยู่ในเชิงตัวเลข ตัวอย่างการวัดค่าสีบนสายพานลำเลียง ได้แก่ ความสม่ำเสมอของสีย้อมบนผืนผ้า การจำแนกสีในการคัดแยกพลาสติกรีไซเคิลเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมรีไซเคิลต่อไป เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการประมวลผลด้วยภาพในระบบค่าสีแบบ RGB ร่วมกับเครื่องจักรในการแยกสีของพลาสติกบนสายพานลำเลียง ทดแทนแรงงานคนที่มีข้อจำกัดในการจำแนกค่าสี ทั้งในด้านปริมาณ ความแม่นยำของการจำแนกเฉดสี การใช้เครื่องวัดค่าสีในระบบ CIE L*a*b* สำหรับการแยกสีบนชิ้นงานที่เคลื่อนที่อยู่บนสายพานลำเลียงยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทำให้ต้องการเงินลงทุนจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะนำระบบเลนส์และเกรตติง เพื่อสร้างเครื่องวัดค่าสเปกตรัมในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าที่สะท้อนจากชิ้นงานบนสายพานลำเลียง เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงสถิติ สำหรับใช้ทำนายค่าสีในระบบ CIE L*a*b*

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- สร้างเครื่องวัดสีในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* สำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ
- สร้างแบบจำลองการวัดสีจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible) โดยใช้ระบบมาตรฐาน CIE L*a*b*

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เนื่องจากต้องการหาความเชื่อมโยงของค่าสีในระบบ CIE L*a*b* กับสเปกตรัมของพอลิเมอร์ งานวิจัยนี้ต้องการสร้างเครื่องวัดค่าสีพลาสติกบนพื้นฐานของสเปกตรัมในขนาดห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองสำหรับประยุกต์ใช้ในการหาค่าสีพลาสติกในระดับอุตสาหกรรม

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- ใช้ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS,LTD (CMD) 2017 Standard Paint Colors เป็นสีมาตรฐานในการวัดค่า CIE L*a*b*
- ทำการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible) โดยการใช้เกรตติงแบบส่องผ่าน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
- ดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 ดำเนินการสร้างเครื่องวัดค่าสีของตัวอย่างบนสายพานลำเลียง (LineScan Color Meter)

- ศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์และเทคนิคการวัดค่า CIE L*a*b*
- ออกแบบโครงสร้างของเครื่องวัด ได้แก่ กำหนดขนาดและชนิดของสายพาน เลือกชนิดของกล้อง ชนิดและจำนวนของเลนส์ ชนิดและขนาดของแหล่งกำเนิดแสง ระยะห่างระหว่างวัตถุกับเลนส์ ระยะห่างระหว่างเลนส์ ระยะห่างระหว่างเลนส์กับเกรตติง ระยะห่างระหว่างเกรตติงกับกล้อง องศาของแหล่งกำเนิดแสง องศาของเกรตติงและองศาของกล้อง ก่อนทำการประกอบเครื่องวัดสี
- เชื่อมต่อระบบกล้องรับสัญญาณกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry Pi) และเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อและวิเคราะห์ค่าสีบนโปรแกรม Labview
- ทำการปรับเทียบตำแหน่งสเปคตรัมบนกล้องเทียบกับเลเซอร์มาตรฐานที่ดำเนินการวัดค่าความยาวคลื่นโดยใช้ Multispectrometer (Tech5) เป็นเครื่องมือเทียบมาตรฐาน
- ทำการติดตั้งระบบลำเลียงชิ้นงานตัวอย่าง

ตอนที่ 2 การหาสมการทำนายค่าสีจากสเปคตรัม โดยใช้แผ่นสีมาตรฐาน TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS,LTD (CMD) 2017 Standard Paint Colors

- นำ CMD Standard Paint Colors ไปวัดค่าสีด้วยเครื่อง ColourFlex EZ ในโหมด D65 เพื่อหาค่า L*a*b* ของสีแต่ละสี จากนั้นจึงทำการบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์สกุล Comma Separated Value File (.csv) ผ่านตัวโปรแกรมของเครื่อง ColourFlex EZ
- นำ CMD Standard Paint Colors ไปวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่อง Multispectrometer (Tech5)

- นำ CMD Standard Paint Colors ไปวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่องวัดค่าสีที่สร้างขึ้น
- ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สเปคตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) ที่วัดในข้อ 2 และค่าสีที่วัดในข้อ 1 เพื่อใช้สร้างสมการทำนายค่าสี วิเคราะห์เชิงสถิติแบบ Partial Least Square (PLS) Analysis บนโปรแกรม MATLAB ที่เขียนขึ้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทำนายค่าสี (loading metric และ ค่า b_0) แสดงผลที่ได้จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R^2) ในการทำนายค่าสี
- ศึกษาผลของการปรับแต่งสเปคตรัม ต่อความแม่นยำในการทำนายค่าสี โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R^2) ในการทำนายค่าสี
- ทำเช่นเดียวกันกับข้อ 4 โดยใช้สเปคตรัมที่วัดได้จากเครื่องวัดสีที่สร้างขึ้น และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น (R^2) ในการทำนายค่าสี
- นำค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการทำนายค่าสี (loading metric และ ค่า b_0) ที่ได้ในข้อ 6 มาใช้ทำนายค่าสีของชิ้นงานตัวอย่างและตรวจสอบความแม่นยำของค่าสี เทียบกับค่าสีของชิ้นงานที่วัดจากเครื่อง ColourFlex EZ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

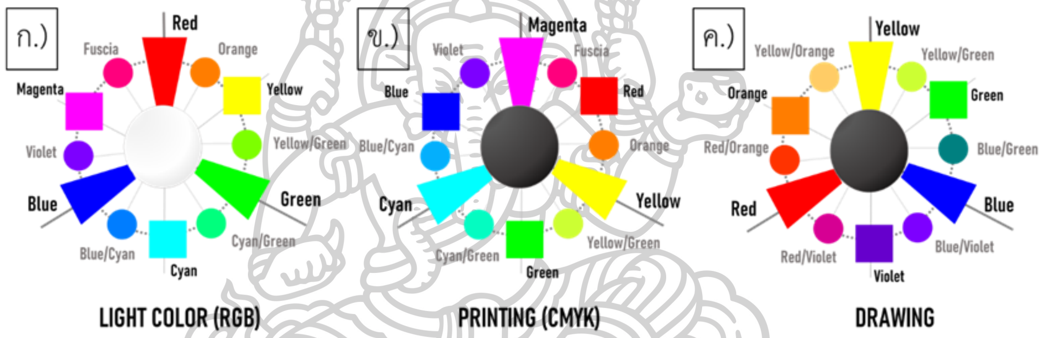
- ได้เครื่องวัดสีขนาดสำหรับห้องปฏิบัติการ
- ได้สมการทำนายค่าสีจากสเปกตรัมที่มีความแม่นยำสำหรับเครื่องวัดสีต้นแบบของตัวอย่างที่สามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมได้

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สี

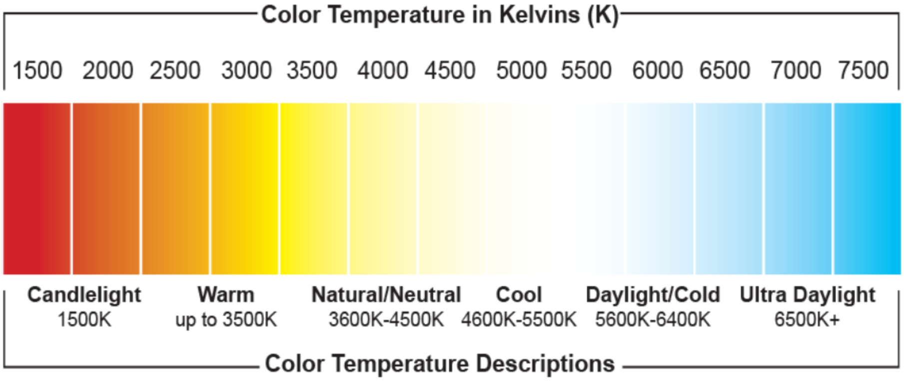
สี คือฟังก์ชันระบบการมองเห็นของมนุษย์ที่เกิดจากการสะท้อนหรือการปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันแต่ละของวัตถุมาเข้าสู่ตาของมนุษย์ โดยวัตถุจะเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ (visible) [1] ซึ่งปัจจัยในการมองเห็นสีมีอยู่ 3 ปัจจัยหลัก ๆ หรือเรียกว่า The triad โดยจะประกอบไปด้วย แหล่งให้พลังงานหรือแหล่งกำเนิดแสง (The light source) วัตถุ (The object) และตัวรับสัญญาณ (The Observers หรือ Detector) [2]



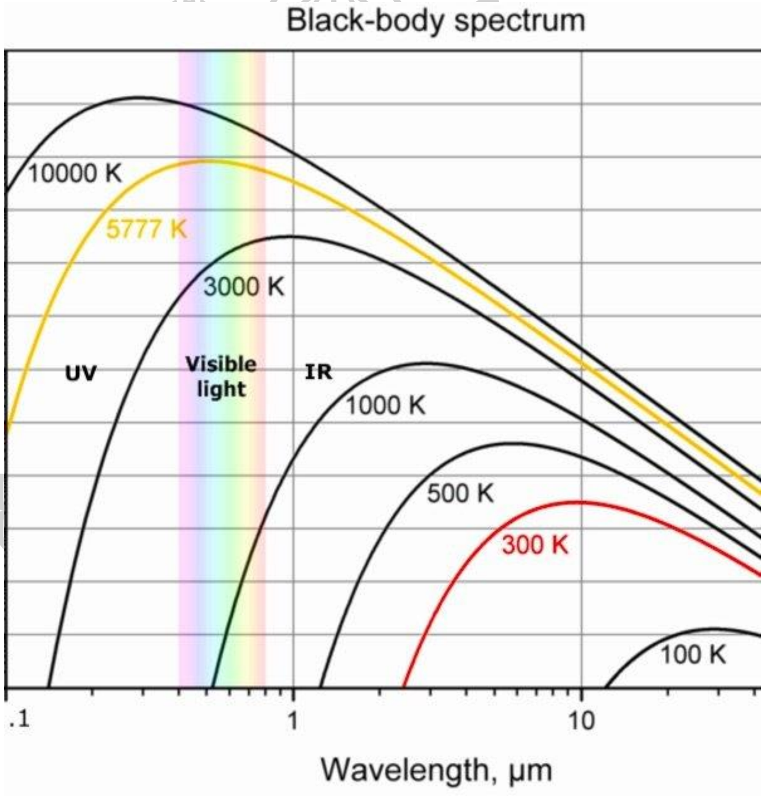
ภาพที่ 1 ก.) สีของแสง, ข.) สีในอุตสาหกรรมการพิมพ์ และ ค.) สีสำหรับงานศิลปะ

2.1.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้การมองเห็นสีไม่เหมือนกัน แม้จะเป็นวัตถุชนิดเดียวกัน โดยจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่แหล่งกำเนิดแสงปล่อยออกมา (Spectral power หรือ Energy distribution) การจำแนกแหล่งกำเนิดแสงจะจำแนกตามอุณหภูมิสีในหน่วยเคลวิน (K) ซึ่งอุณหภูมิสีได้มาจากอุณหภูมิที่วัตถุดำ (Blackbodies) ปล่อยรังสีออกมาเป็นสีที่ตรงกับสีของแหล่งกำเนิดแสงนั้น ๆ [2] ดังภาพที่ 2 โดยในอุณหภูมิสีแต่ละชนิดจะให้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาต่างกันดังภาพที่ 3



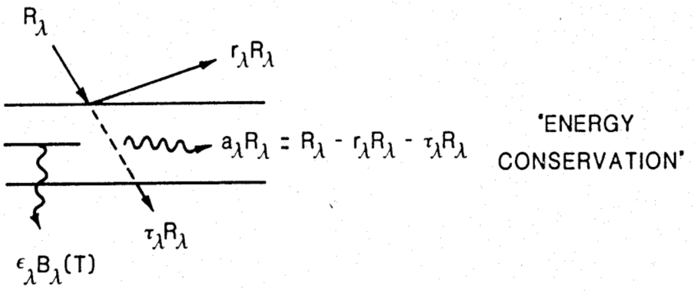
ภาพที่ 2 แสดงสีของแหล่งกำเนิดแสงที่อุณหภูมิสีต่าง ๆ



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่ปล่อยออกมาในค่าอุณหภูมิสีต่าง ๆ

2.1.2 วัตถุ

เมื่อมีแสงหรือพลังงานส่งมายังผิวของวัตถุ ส่วนใหญ่จะเกิดปรากฏการณ์หลัก ๆ 3 ปรากฏการณ์ คือ การสะท้อนและการส่องผ่าน (Refraction และ Transmission) การดูดกลืนพลังงาน (Absorption) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แสดงแผนภาพของการสะท้อน ($r_\lambda R_\lambda$) การส่องผ่าน ($\tau_\lambda R_\lambda$) การดูดกลืน ($a_\lambda R_\lambda$) และการปล่อยพลังงาน ($\varepsilon_\lambda R_\lambda$)

2.1.2.1 การดูดกลืนพลังงาน (Absorption)

โดยในวัตถุจะมีเม็ดสี (pigment) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานของพลังงานที่เข้ามาและพลังงานที่ไม่ถูกดูดกลืนจะออกมาในรูปแบบการสะท้อนหรือการส่องผ่านขึ้นอยู่กับความทึบของของวัตถุ โดยพลังงานที่วัตถุดูดกลืนจะส่งผลต่อระดับโมเลกุลจนถึงระดับอะตอมขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ให้เช่น ช่วงคลื่นไมโครเวฟ (Microwave region) จะส่งผลให้เกิดการหมุน (rotation) ในระดับโมเลกุล ช่วงคลื่นอินฟราเรด (Infrared region, IR) จะส่งผลให้เกิดการสั่น (vibration) ในระดับโมเลกุล และในช่วงคลื่นที่มองเห็นได้และอัลตราไวโอเลต (Visible and Ultraviolet region ,UV-Vis) จะส่งผลถึงการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุล เป็นต้น โดยในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (ground state) เข้าสู่สถานะกระตุ้น (exited state) และคายพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นกลับสู่สถานะพื้นตลอดเวลา ซึ่งพลังงานที่ถูกคายออกมาจะออกมาในรูปของพลังงานความร้อน

ตารางที่ 1 สีที่แสดงและสีที่ดูดกลืนของแต่ละช่วงความยาวคลื่น

Wavelength Absorbed (nm)	Colour Absorbed	Colour Observed
400–435	Violet	Yellow-Green
435–480	Blue	Yellow
480–490	Green-Blue	Orange
490–500	Blue-Green	Red
500–560	Green	Purple
560–580	Yellow-Green	Violet
580–595	Yellow	Blue
595–605	Orange	Green-Blue
605–700	Red	Blue-Green

หรือในบางวัตถุอาจคายพลังงานออกมาในรูปของแสง (Emission) ในช่วงความยาวคลื่นเดิมหรือในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างจากช่วงความยาวคลื่นพลังงานขาเข้าขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ โดยส่วนใหญ่จะเกิดในวัตถุที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence), ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) และปรากฏการณ์ที่เกิดการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติหรือไบโอลูมิเนสเซนซ์ (Bioluminescence) [3] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงปรากฏการที่เกิดจากการปล่อยพลังงาน (Emission)

ปรากฏการณ์	ความแตกต่างของแต่ละปรากฏการณ์	ตัวอย่างวัตถุ	ภาพตัวอย่าง
ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence)	วัตถุดูดซับพลังงานในช่วงความยาวคลื่นที่จำเพาะแล้วปล่อยพลังงานออกมาในช่วงความยาวคลื่นที่แต่ต่างจากช่วงความยาวคลื่นพลังงานขาเข้า	หลอดไฟฟลูออเรสเซนซ์, หลอดนีออน	
ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)	วัตถุดูดซับพลังงานในช่วงความยาวคลื่นที่จำเพาะแล้วปล่อยพลังงานออกมาอย่างช้า ๆ และจะปล่อยออกมาก็ต่อเมื่อหยุดให้พลังงานขาเข้า	สติ๊กเกอร์เรือนแสง, ศูนย์เล็งปืน	
ไบโอลูมิเนสเซนซ์ (Bioluminescence)	เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีภายในอวัยวะที่จำเพาะ	หิ่งห้อย, ปลาแองเกลอร์	

Image source:

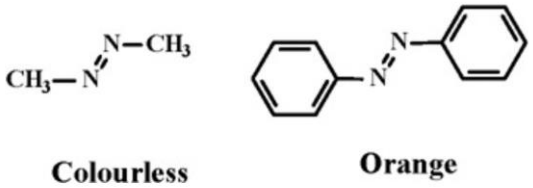
1.data:image/png;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUhEUgAAANgAAADpCAMAAABx2AnXAAACUlBMVEUAAAAREiT2//8HBw73//7z///s/u/2/v4ACgDW3/0AAOJjMRoqGYvf+v8GAABt1jooF4DO

2.https://m.media-amazon.com/images/I/81KfglYtLxL._AC_SL1500_.jpg

3.https://lh3.googleusercontent.com/-XWQCWHHDsb4/Vzyddxb9O0I/AAAAAAAAAW8/MGD3Ro79bgE/s640/images.jpg

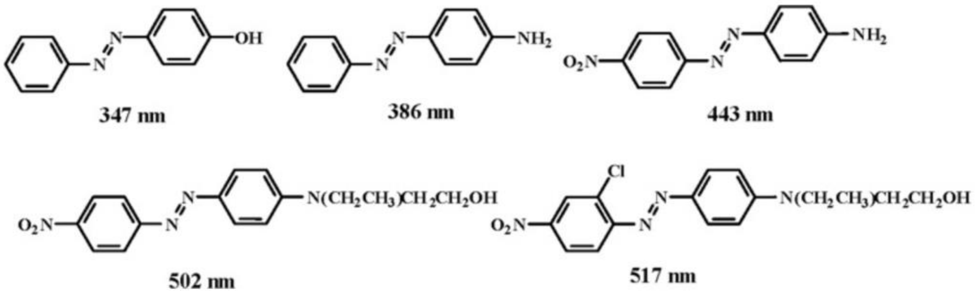
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ซึ่งในพลาสติกการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้จะมีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมีของตัววัตถุเอง เม็ดสี (Pigments) หรือสีย้อม (Dyes) ที่เติมลงไป โดยหมู่โครงสร้างทางเคมีที่สามารถดูดกลืนแสงในความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงช่วงยูวี คือหมู่โครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งจะเป็นหมู่ฟังก์ชันจำพวกที่มีคอนจูเกต (conjugated) ซึ่งหากจำนวนคอนจูเกตในโครงสร้างมีมากจะทำให้แสงที่สามารถดูดกลืนได้ที่ความยาวคลื่นที่มากขึ้นตาม และหากมีจำนวนคอนจูเกตในโครงสร้างของ 1 โมเลกุลน้อยกว่า 8 วัตถุดังกล่าวจะดูดกลืนพลังงานในช่วงยูวีดังภาพที่ 5 ทำให้วัตถุใสไม่มีสี



ภาพที่ 5 แสดงผลของจำนวนของคอนจูเกตต่อสีที่ปรากฏ

และมีหมู่ฟังก์ชันอีกชนิดคือหมู่ออกโซโครม (Auxochrome) ซึ่งไม่ได้ดูดกลืนแสงในความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้หรือดูดกลืนน้อยมากแต่เมื่อออกโซโครมไปเกาะอยู่กับหมู่โครโมฟอร์ จะทำให้หมู่โครโมฟอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอาจทำให้หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้นหรือลดลงหรืออาจทำให้หมู่โครโมฟอร์ดูดกลืนแสงได้มากขึ้นหรือต่ำลงตัวอย่างของหมู่ออกโซโครม เช่น หมู่ carboxylic acid, หมู่ sulfonic acid, หมู่ amino, และ หมู่ hydroxyl เป็นต้น ดังภาพที่ 6 ซึ่งการมองเห็นสีที่แตกต่างกันขึ้นกับค่าความยาวคลื่นของแสงที่วัตถุไม่ได้ดูดกลืน [4]



ภาพที่ 6 แสดงผลของหมู่ออกโซโครมต่อการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นที่ดูดกลืน

2.1.2.2 การสะท้อนและการส่องผ่าน (Refraction และ Transmission)

การเกิดการสะท้อนและการส่องผ่านเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดหลังการดูดกลืนพลังงานของวัตถุ โดยการสะท้อนมักจะเกิดในผิววัตถุที่ทึบแสงและโปร่งแสง ซึ่งแสงจะสะท้อนออกเป็นมุม 90 องศากับมุมตกกระทบของแสงขาเข้า ส่วนการส่องผ่านจะเกิดขึ้นในวัตถุที่โปร่งแสงและวัตถุที่โปร่งใส โดย

แสงที่ส่องผ่านจะออกมาในมุมเท่ากับมุมตกกระทบ ในส่วนความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาหรือส่องผ่านออกมาจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีการหักเหของวัตถุกับตัวกลางโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับความเข้มของแสงจากแหล่งให้กำเนิด [5] โดยในกรณีของการสะท้อนและการส่องผ่านทั่วไป สามารถคำนวณได้จากสมการ

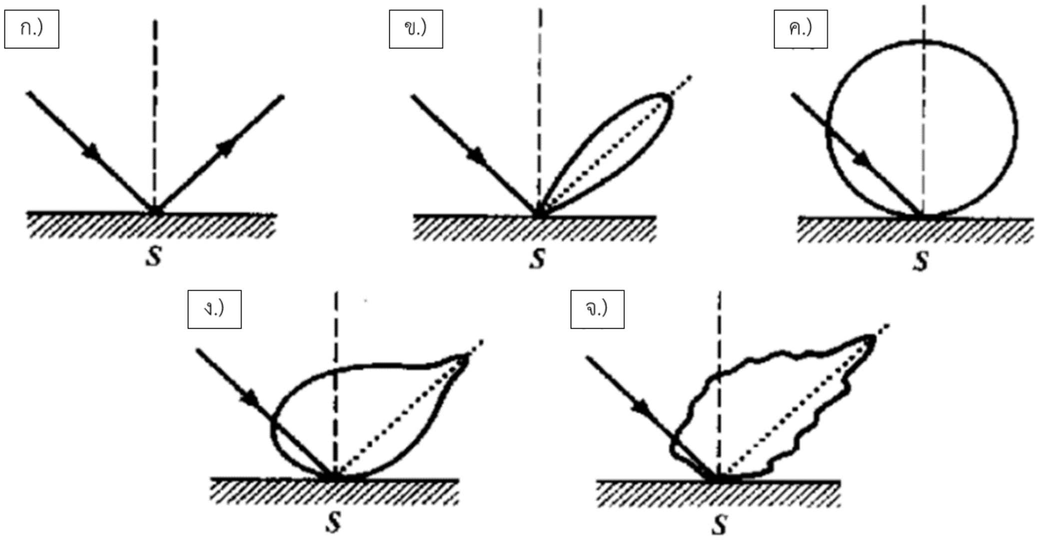
$$R = \left|\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right|^2$$

โดยที่

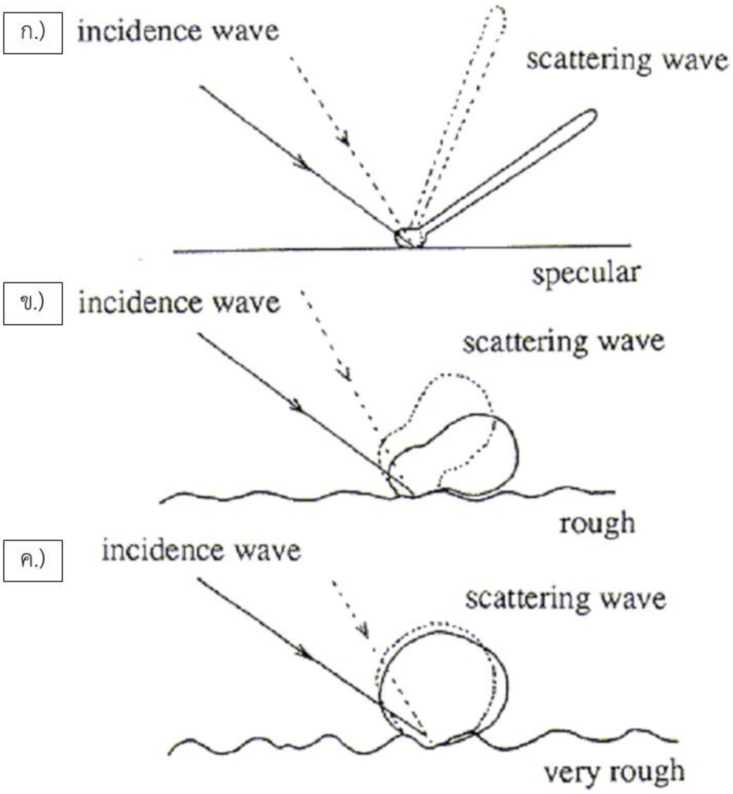
R	คือ	ความสามารถในการสะท้อนแสง
n_1	คือ	ค่าดัชนีการหักเหของตัวกลาง
n_2	คือ	ค่าดัชนีหักเหของวัตถุ

หากค่า R มีค่าเข้าใกล้ 0 หรือ n_1 มีค่าใกล้เคียงกับ n_2 จะทำให้ไม่เกิดการสะท้อนหรือการส่องผ่านและหาก R มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือ n_1 มีค่ามากกว่า n_2 ในปริมาณที่มาก จะทำให้แสงที่สะท้อนหรือแสงที่ส่องผ่านออกจากวัตถุมีค่าความเข้มที่ใกล้เคียงกับแสงที่ตกกระทบผิววัตถุ ในกรณีที่ผิววัตถุมีความขรุขระหรือมีการเคลือบผิวให้มันวาว (Goss) อาจเกิดปรากฏการณ์การแพร่ (Diffuse) หรือการกระเจิง (Scattering) ขึ้น [5] ดังภาพที่ 7 ในกรณีที่ผิวชิ้นงานมีความขรุขระและลักษณะของการกระเจิงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวชิ้นงานอีกด้วย [6] ดังแสดงในภาพที่ 8

มหาวิทยาลัยศิลปากร



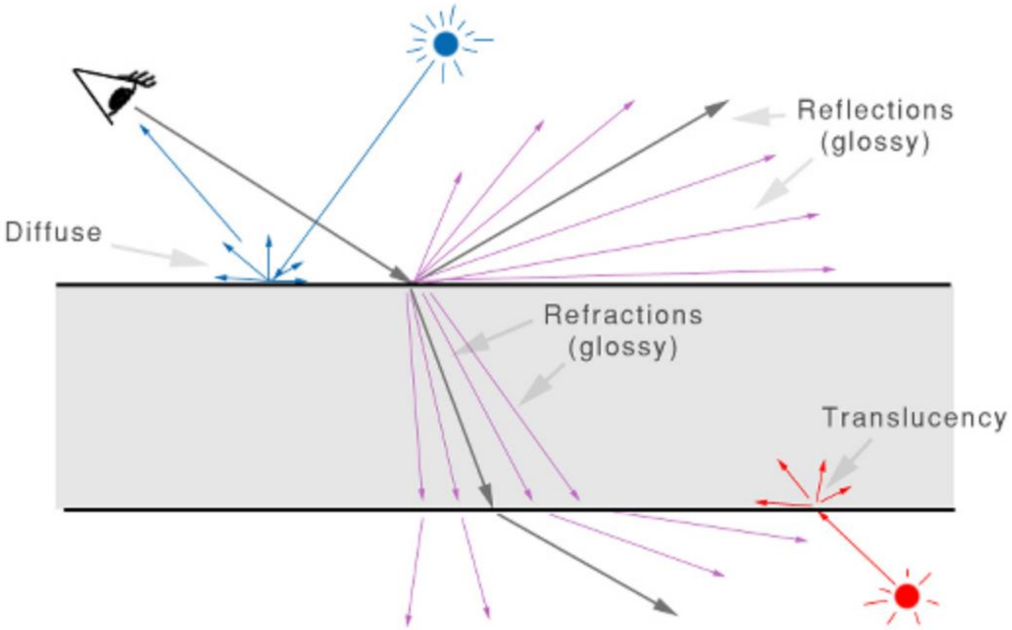
ภาพที่ 7 แสดงการเกิดการกระเจิงในแต่ละแบบ ก.) การสะท้อนกลับหมด ข.) การกระเจิงแบบสะท้อนที่ใกล้เคียงการสะท้อน ค.) การกระเจิงแบบสะท้อนแบบ Lambertain ง.) การกระเจิงแบบสะท้อนแบบ Quasi-Lambertain จ.) การกระเจิงแบบ Complex



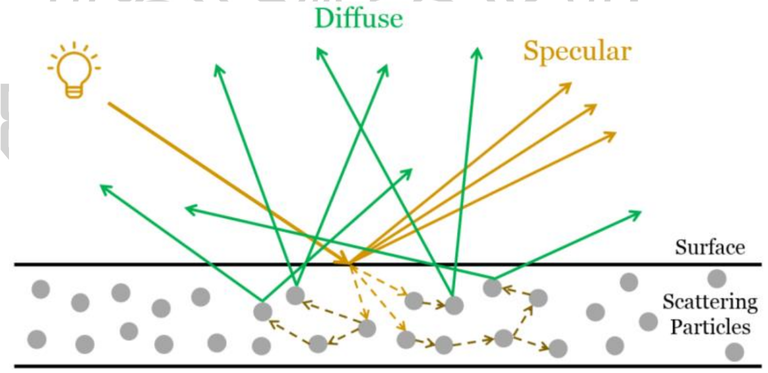
ภาพที่ 8 แสดงการเกิดการกระเจิงในแต่ละแบบในลักษณะพื้นผิวแบบต่าง ๆ ก.) ผิวเรียบ ข.) ผิวขรุขระ ค.) ผิวขรุขระมาก

2.1.2.3 การกระเจิงของแสง (Scattering)

ในกรณีของผิวที่มีความมันวาวจะเกิดการกระเจิงแสงดังภาพที่ 9 ซึ่งกลไกลการเกิดการกระเจิง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กในเมทริกซ์ของสารเคลือบผิวดังภาพที่ 10

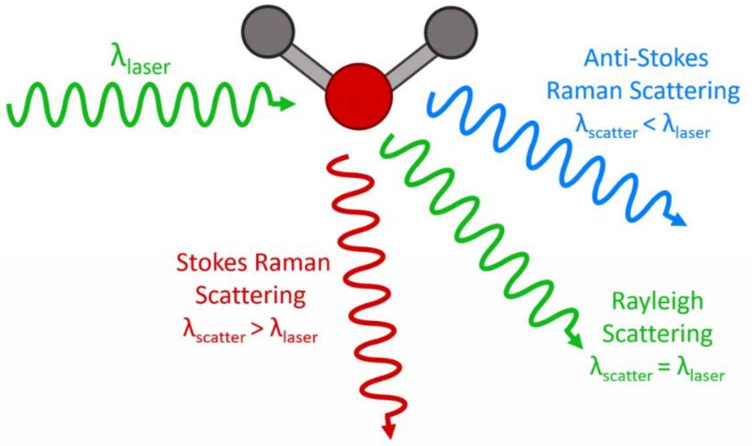


ภาพที่ 9 แสดงการกระเจิงแสงจากความมันวาว



ภาพที่ 10 แสดงกลไกการกระเจิงของแสงเนื่องจากความมันวาวของผิววัตถุที่ผ่านการเคลือบผิว

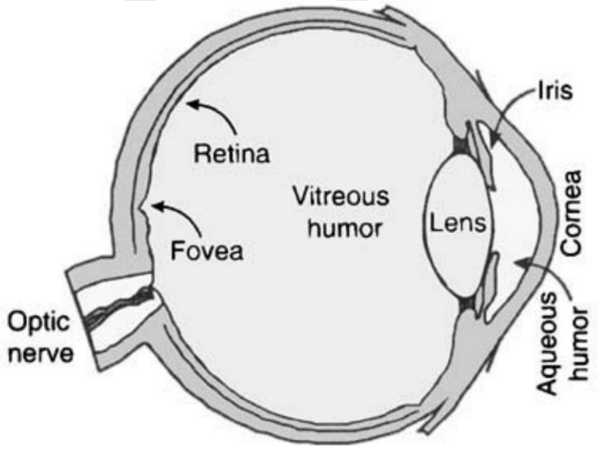
และการกระเจิงของแสงมีอยู่ 2 แบบหลัก ๆ คือการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) โดยการกระเจิงแบบยืดหยุ่นจะเป็นการกระเจิงแสงที่มีความยาวคลื่นเท่าเดิม ในส่วนของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นนั้นจะกระเจิงแสงในความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปดังภาพที่ 11 โดยพลังงานดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการสั่นไหวอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุล [7]



ภาพที่ 11 แสดงการกระเจิงของแสงทั้งแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น

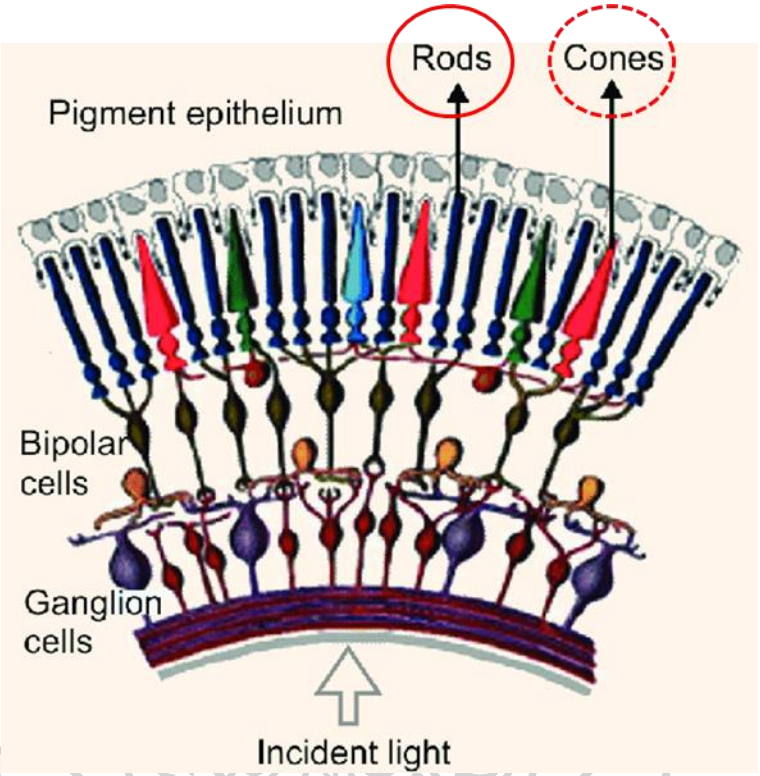
2.1.3 การรับสี[8-10]

มนุษย์สามารถมองเห็นสีได้จากการสะท้อนหรือปล่อยแสงเข้าสู่ดวงตาของมนุษย์ โดยในดวงตาของมนุษย์จะมีเซลล์ที่เป็นเซนเซอร์ในการรับแสงที่เรียกว่า เซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวย (cones) ซึ่งจะรับแสงได้ในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) โดยมีตำแหน่งตั้งอยู่บริเวณด้างหลังของดวงตาหรือเรตินา (Retina) โดยจะอยู่รอบๆ รอยบุ๋มดวงตา (Fovea) อยู่ร่วมกับเซลล์รับแสงลักษณะแบบแท่ง (Rods) ซึ่งจะรับแสงในช่วงแสงสีแต่จะเห็นเป็นขาว เทา และดำ หลังจากได้รับแสงแล้วจะมีการส่งไปยังสมองผ่านเส้นประสาทการมองเห็น (Optic nerve) ไปยังบริเวณกะโหลกศีรษะด้านหลังหรือสมองบริเวณกลีบท้ายทอย (Occipital lobe) โดยเซลล์ที่ทำหน้าที่แยกแยะสีคือเซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวย (Cones) ส่วนเซลล์รับแสงลักษณะแบบแท่ง (Rods) จะมีหน้าที่ส่วนใหญ่ในการปรับการรับแสงของดวงตา



ภาพที่ 12 ภาคตัดขวางของดวงตามนุษย์

ซึ่งเซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวยนั้น สามารถแยกออกได้อีก 3 ชนิด ตามความยาวคลื่นที่สามารถรับได้ ได้แก่ เซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวยแบบ L (L cones) เซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวยแบบ M (M cones) และเซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวยแบบ S (S cones) โดยความสามารในการรับแสงจะเป็นไปตามภาพที่ 14



ภาพที่ 13 แสดงลักษณะของเซลล์รับแสงรูปทรงกรวย (Cones) และเซลล์รับแสงแบบแท่ง (Rods)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

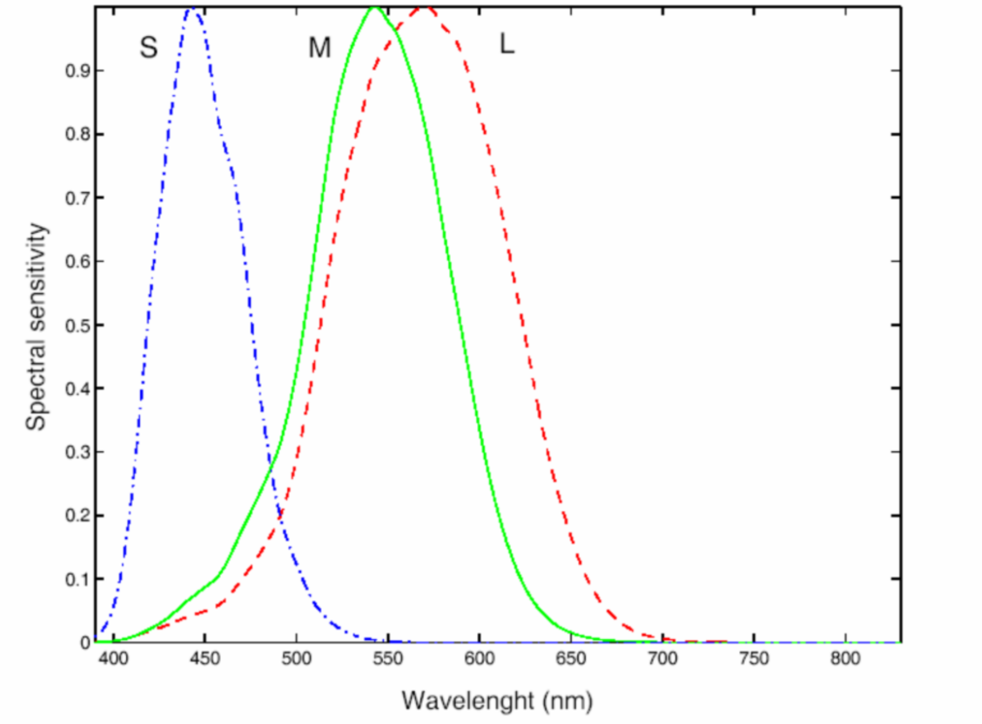
การตอบสนองของเซลล์ลักษณะทรงกรวยทั้ง 3 ชนิด สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ความว่องไวต่อการรับสเปกตรัมของ } L\ cones \\ \text{ความว่องไวต่อการรับสเปกตรัมของ } M\ cones \\ \text{ความว่องไวต่อการรับสเปกตรัมของ } S\ cones \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{n_\lambda} \end{bmatrix}$$

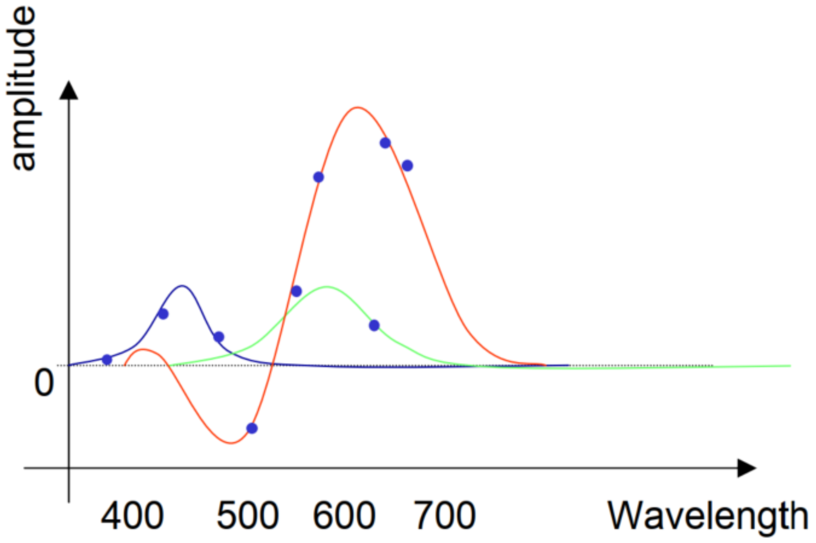
โดยที่

L, M และ S	คือ	ความสามารถในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของเซลล์ลักษณะทรงกรวยแต่ละชนิด (Amplitude, A(l_λ))
t	คือ	สเปกตรัมของแสงที่ใช้ทดสอบ (Stimulus, l_λ))

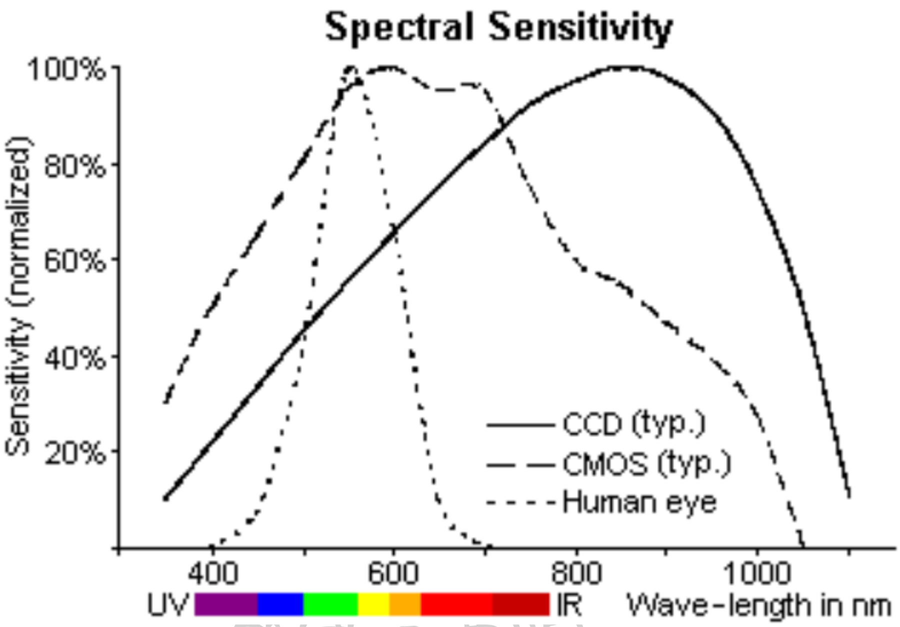
หากให้แสงที่ใช้ทดสอบเป็นแสงสีขาวอุดมคติ (Equal-energy illuminants หรือ Illuminant E) ซึ่งเป็นแสงขาวสำหรับใช้ในการอ้างอิงทางทฤษฎี มีค่าความสว่างเท่ากันในทุก ๆ ความยาวคลื่น จะทำให้ได้ความสามารถในการตอบสนองของเซลล์รับแสงลักษณะทรงกรวยเป็นดังภาพที่ 15



ภาพที่ 14 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับแสงในแต่ละความยาวคลื่นของเซลล์ลักษณะทรงกรวยทั้ง 3 ชนิด

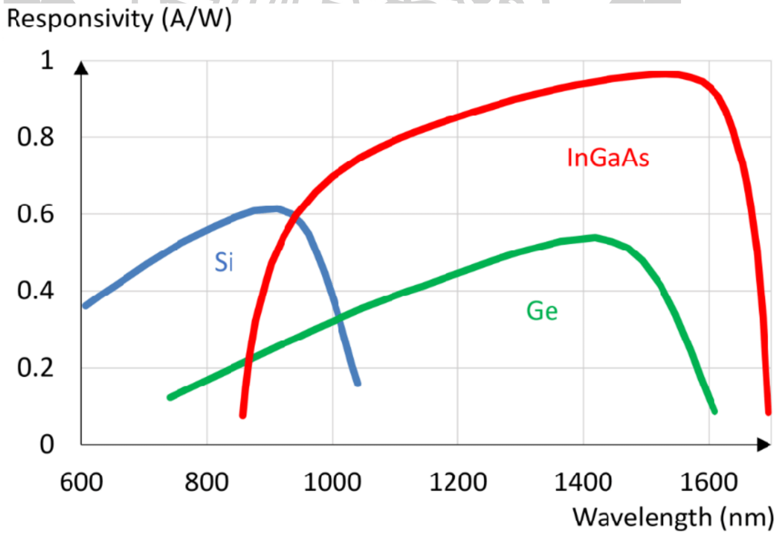


ภาพที่ 15 ความสามารถในการตอบสนองของเซลล์ลักษณะทรงกรวย

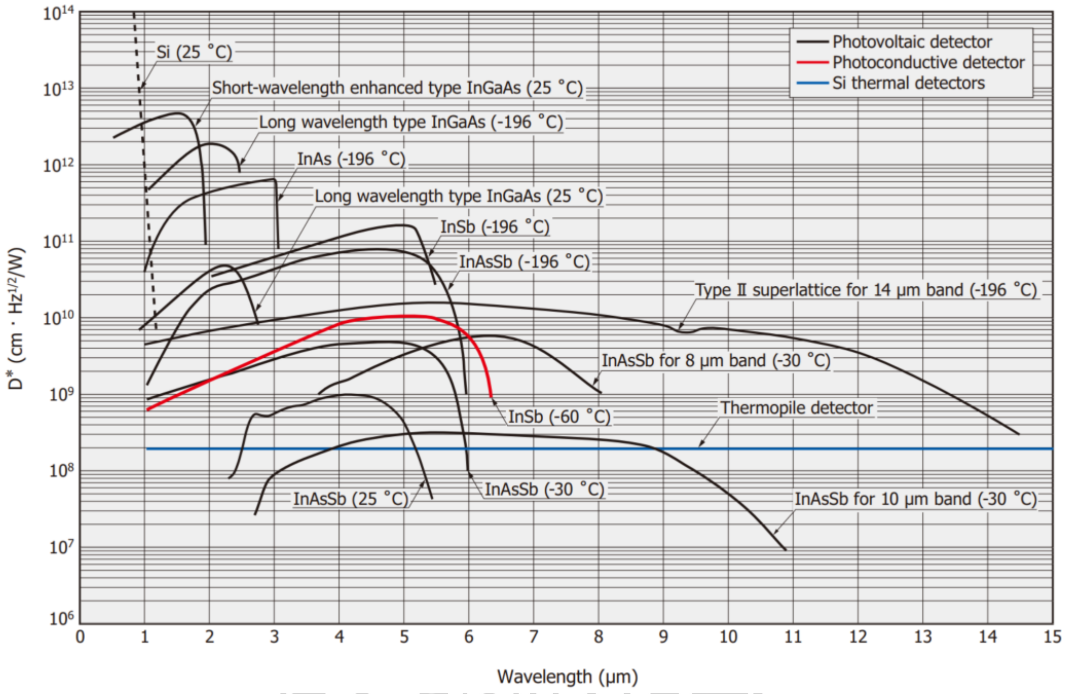


ภาพที่ 16 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับสเปกตรัมของตามนุษย์
เซนเซอร์ CCD และ เซนเซอร์ CMOS

โดยเมื่อนำความสามารถในการรับสเปคตรัมของตามนุษย์เทียบกับเซนเซอร์รับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ในปัจจุบันที่นิยมผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำอย่างซิลิคอนจะได้ดังภาพที่ 16 และเมื่อนำซิลิคอนเทียบกับวัสดุชนิดอื่นที่สามารถเป็นเซนเซอร์รับสเปคตรัมได้ เช่น เซนเซอร์ Ge ดังภาพที่ 17 และเซนเซอร์ InGaAs ภาพที่ 18



ภาพที่ 17 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับสเปกตรัมของวัสดุที่นิยมนำมาผลิตเป็น
เซนเซอร์รับภาพและแสง



ภาพที่ 18 แสดงความว่องไวและความสามารถในการรับแสงของเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ของบริษัท Hamamatsu Photonics K.K. ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำงานของเซนเซอร์นั้น ๆ

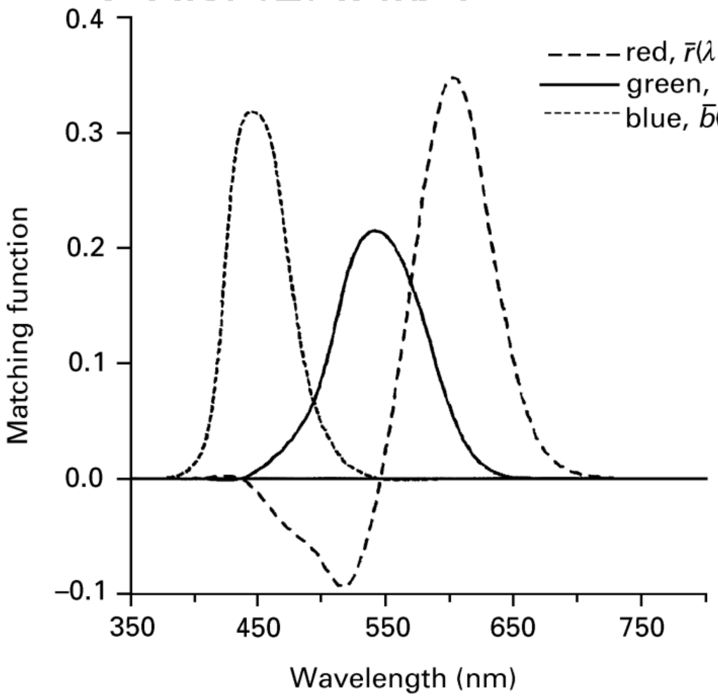
2.1.4 ค่าสี[11-14]

ค่าสี คือ ค่าที่ใช้บอกถึงสีของวัสดุ โดยการบ่งบอกสีสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 อย่างคือ เฉดสี (Hue) จะใช้ในการบอกถึงสีของวัสดุเช่น สีแดง, สีเขียว หรือสีน้ำเงิน ความสว่างของสี (Value หรือ Lightness) จะบอกได้ว่าสีมีความสว่างหรือมืด โดยความสว่างของสีจะเริ่มจากสีดำไปจนถึงสีขาวในเฉดสีเทา (gray) และความอิ่มตัวของสี (Chroma หรือ Saturation) จะบอกได้ถึงความเข้มของสีหรือความอิ่มตัวของสี ยกตัวอย่างเช่น แร่เหล็กมีความอิ่มตัวของสีแดงที่น้อย ในขณะที่กุหลาบสีแดงมีความอิ่มตัวของสีแดงที่มาก การบ่งบอกถึงสีโดยใช้ตัวเลข โดยตัวแปรเหล่านี้สามารถหาได้จากเทคโนโลยีการวัดค่าสี

ภาพที่ 19 แสดงสีแดงของแร่เหล็กที่มีความอิ่มตัวของสีน้อยกว่าสีของกุหลาบสีแดง

2.1.4.1 ระบบค่าสี RGB

ระบบค่าสีนี้จะเป็นการวัดค่าสีที่ใช้หลักการ Trichromatic theory ซึ่งจะเป็นให้แสงปฐมภูมิ (แสงสีแดง, แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน) เพื่อสร้างเป็นสีต่างๆ ที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ โดยจะให้ค่าแสงสีแดงเป็นตัวแปร R, ค่าแสงสีเขียวเป็นตัวแปร G และค่าแสงสีน้ำเงินเป็นตัวแปร B เนื่องจากระบบค่าสีนี้มีเพียง 3 ตัวแปร จึงทำให้การวิเคราะห์แยกสีนั้นเป็นไปได้ยากเพราะระบบสีดังกล่าวจะบอกได้เพียงเฉดสีเพียงเท่านั้น แต่ไม่สามารถบอกได้ถึงความสว่างและความอิ่มตัวของสีได้ สำหรับการคำนวณค่าสีในระบบค่าสี RGB ไม่สามารถคำนวณโดยตรงได้ เนื่องจากค่าสีในระบบ RGB ไม่ว่าจะเป็นค่า R, G และ B ทุกค่าจะเริ่มจาก 0 แต่หากอ้างอิงจากกราฟในภาพที่ 20 มีค่าที่ติดลบในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 440 ถึง 550 นาโนเมตร ทำให้ค่า $\bar{r}(\lambda)$ สามารถติดลบได้ ซึ่งไม่เป็นไปตามนิยาม



ภาพที่ 20 ฟังก์ชันของการหาค่าสีในระบบ RGB ของ Guild และ Wright

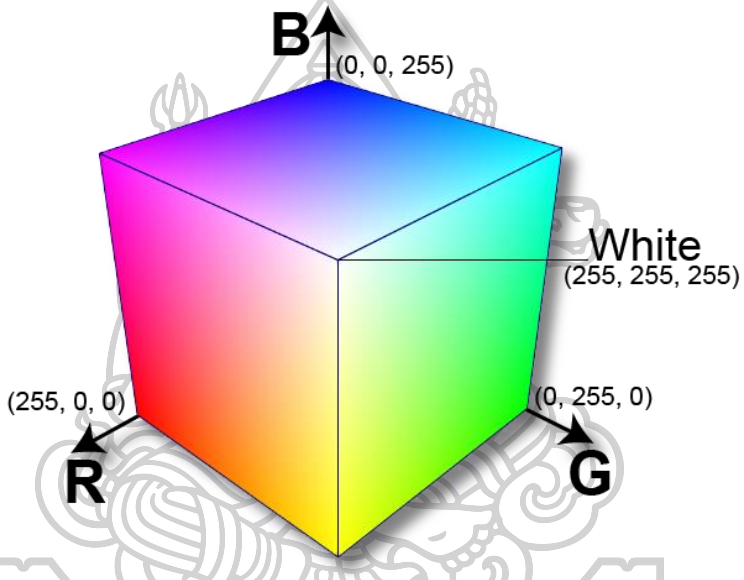
จึงต้องคำนวณผ่านค่าสีระบบ XYZ โดยการคำนวณค่า XYZ จะอยู่ในหัวข้อที่ 2.1.4.2 โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณค่า RGB จากค่า XYZ ซึ่งสามารถคำนวณได้ผ่านสมการ

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

โดยที่

X, Y และ Z	คือ	ค่าของสีในระบบสี XYZ
[M]	คือ	เมทริกซ์ของ RGB/XYZ Metrics (ภาคผนวก ก. ค่า RGB/XYZ Matrices)
r, g และ b	คือ	ค่าของสีในระบบ RGB แบบเส้น

ซึ่งค่าของสีใบระบบ RBG แบบเส้น (linear RGB) จะเป็นค่าสีที่มีค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 และมีพื้นที่กราฟเป็นทรงลูกบาศก์ดังภาพที่ 21 แต่เปลี่ยนค่าสูงสุดจาก 255 เป็น 1.0 หรือหารด้วย 255



ภาพที่ 21 RGB Color space เกิดมาจากการทำเป็นฟังก์ชัน 8 บิต

มหาวิทยาลัยศิลปากร

หากต้องการค่า RGB แบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear RGB) มีอยู่ 3 แบบ ดังนี้

กำหนดให้

$v \in \{r, g, b\}$ สำหรับระบบ linear RGB

$V \in \{R, G, B\}$ สำหรับระบบ nonlinear RGB

- แบบใช้ค่า Gamma (γ) (ภาคผนวก ข. ค่า Gamma)

$$V = v^{1/\gamma}$$

- แบบ sRGB

$$V = \begin{cases} 12.92v & \text{ถ้า } v \leq 0.0031308 \\ 1.055v^{1/2.4} - 0.055 & \end{cases}$$

- แบบ L*

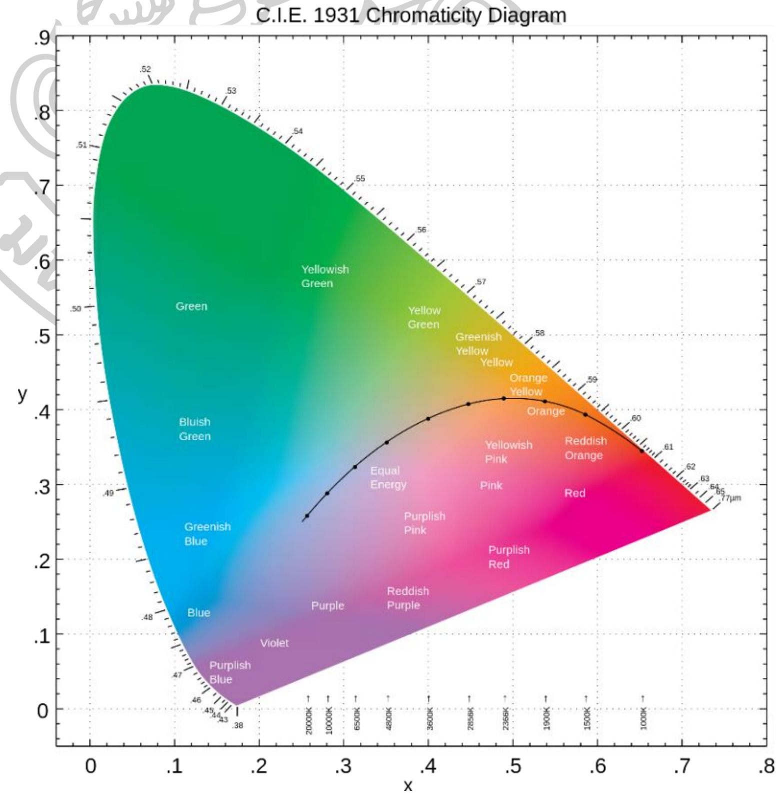
$$V = \begin{cases} \dfrac{v\kappa}{100} & \text{ถ้า } v \leq \epsilon \\ 1.16\sqrt[3]{v} - 0.16 \end{cases}$$

โดยที่

ϵ	เท่ากับ	0.008856 หรือ 216/24389
κ	เท่ากับ	903.3 หรือ 24389/27

2.1.4.2 ระบบค่าสี XYZ

ระบบค่าสีนี้เป็นระบบค่าสีที่ถูกแนะนำให้ใช้โดย CIE ในปี 1931 ซึ่งจะมีความใกล้เคียงกับระบบค่าสี RGB แต่จะแตกต่างกันที่ XYZ จะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ได้มาจากการคำนวณตามทฤษฎี ซึ่งจะมีความอิ่มตัวมากกว่าแหล่งกำเนิดแสงจริงที่ใช้ในระบบค่าสี RGB และให้ค่าสีที่เป็นค่าบวกทั้งหมด ทำให้สามารถคำนวณค่าผ่านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ โดยในการคำนวณในระบบค่าสีนี้จะมีตัวแปรอยู่ทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ X, Y และ Z



ภาพที่ 22 XYZ color space

โดยตัวแปร X จะถูกกระตุ้นได้ด้วยสเปกตรัมสีแดงและแสดงถึงความอิ่มตัวของสีแดง ในส่วนของตัวแปร Y จะถูกกระตุ้นได้ด้วยสเปกตรัมสีเขียวและแสดงถึงความอิ่มตัวของสีเขียว และตัวแปร Z จะถูกกระตุ้นได้ด้วยสเปกตรัมสีน้ำเงินและแสดงถึงความอิ่มตัวของสีน้ำเงิน และค่า X, Y และ Z จะให้ค่าที่เป็นค่าบวก ดังที่กล่าวมาข้างต้นระบบค่าสี XYZ จึงสามารถบอกได้ทั้งค่าเฉดสีและความอิ่มตัวของสี แต่ยังไม่สามารถบอกความสว่างของสีได้โดยตรง โดยสามารถคำนวณค่า XYZ จากสเปกตรัมที่สะท้อนออกจากวัตถุหรือส่องผ่านวัตถุได้จากสมการดังนี้

$$X = \frac{1}{N}\int_{\lambda} x(\lambda)S(\lambda)I(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \frac{1}{N}\int_{\lambda} y(\lambda)S(\lambda)I(\lambda)d\lambda$$

$$Z = \frac{1}{N}\int_{\lambda} z(\lambda)S(\lambda)I(\lambda)d\lambda$$

$$N = \int_{\lambda} y(\lambda)I(\lambda)d\lambda$$

เปลี่ยนรูปสมการจากการอินทิเกรตเป็นสมการผลรวม

$$X = \frac{1}{N}\sum_{i} x_i S_i I_i \Delta\lambda$$

$$Y = \frac{1}{N}\sum_{i} y_i S_i I_i \Delta\lambda$$

$$Z = \frac{1}{N}\sum_{i} z_i S_i I_i \Delta\lambda$$

$$N = \sum_{i} y_i I_i \Delta\lambda$$

โดยที่

x, y และ z	คือ	ฟังก์ชันของผู้สังเกตตามมาตรฐาน CIE (ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันผู้สังเกตมาตรฐาน CIE (CIE standard observer functions) ของ CIE 2° (1931) และ 10° (1964))
X, Y และ Z	คือ	ค่าสีในระบบสี XYZ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

S(**λ**) หรือ S_i คือ สเปกตรัมที่วัตถุสะท้อนออกมา ณ ความยาวคลื่นนั้น ๆ (หากเป็นการส่องผ่านจะแทนค่าตัวแปร S ด้วยตัวแปร T หรือค่าสเปกตรัมที่ส่องผ่านวัตถุ)

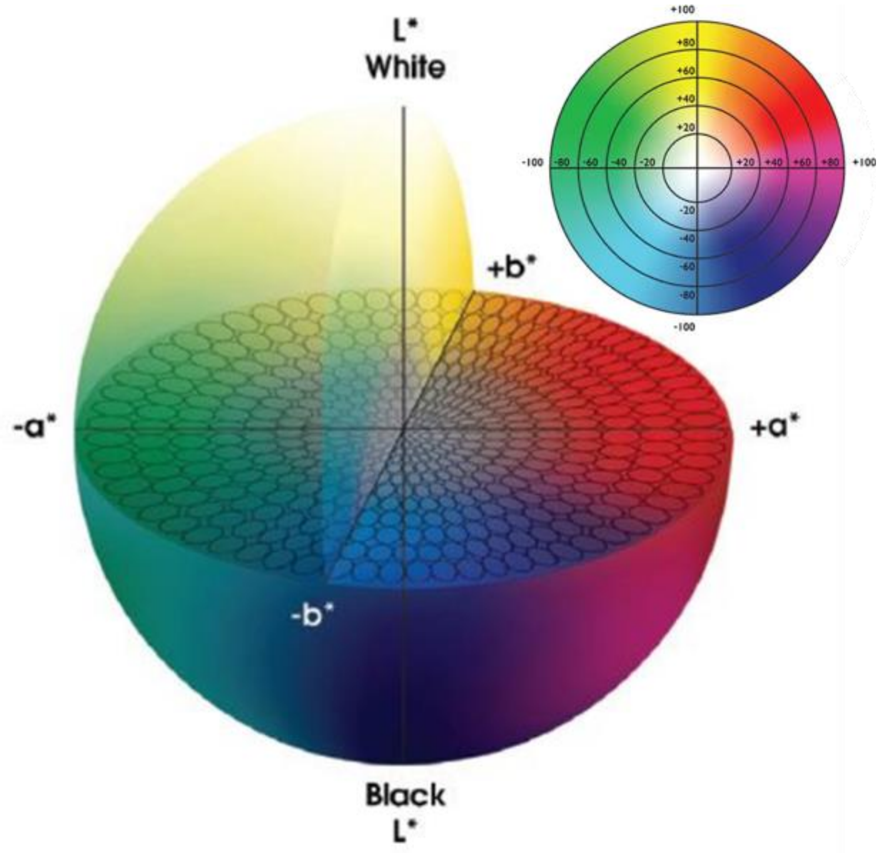
I(**λ**) หรือ I_i คือ สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง ณ ความยาวคลื่นนั้น ๆ

λ คือ ความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร

2.1.5 ระบบค่าสี CIE L*a*b* color space

ระบบค่าสีนี้มีพื้นฐานมาจากทฤษฎี Opponent theory ของการมองเห็นสี ซึ่งคิดค้นโดย Hering เนื่องจากเป็นการยากที่จะให้ชื่อเฉดสีได้ครบทุกเฉดสี Hering จึงได้ให้ความจำกัดความของทุกเฉดสีที่เป็นไปได้ว่าประกอบด้วยสี 4 สี นั่นคือ สีแดง, สีเขียว, สีเหลือง และสีน้ำเงิน และเมื่อเพิ่มความสว่างของสีเข้าไป ทำให้มีเฉดสีเพิ่มเข้ามาอีก 2 สี ได้แก่สีดำและสีขาว และจากใจความสำคัญของ opponent theory คือเมื่อผู้สังเกตการณ์มองไม่สามารถมองเห็นสีสองสีที่อยู่ตรงข้ามกันได้ จึงทำให้มีการจับคู่สีที่เป็นสีที่อยู่ตรงข้ามกันกัน ทำให้ระบบค่าสีดังกล่าวมีตัวแปรสีที่อยู่ตรงข้ามกัน 3 คู่ คือ สีขาวกับสีดำ, สีแดงกับสีเขียว, และสีเหลืองกับสีน้ำเงิน แล้วจึงนำคู่สีข้างต้นมาสร้างเป็นกราฟ 3 มิติ โดยให้แต่ละแกนประกอบด้วยคู่สีแกนละคู่ และกำหนดตัวแปรให้แต่ละแกนคือ

- ค่า L* เป็นแกนตั้งซึ่งจะแสดงในคู่ของสีขาวกับสีดำจึงทำให้ L* เป็นค่าที่แสดงถึงความสว่างของสีโดยจะมีค่า 0-100 ซึ่ง 100 จะแสดงเป็นสีขาวและ 0 จะแสดงเป็นสีดำ
- ค่า a* จะเป็นแกนตั้งฉากกับแกน L* ซึ่งจะแสดงถึงสีแดงและสีเขียว โดยหากค่า a* เป็นเป็นค่าบวกจะแสดงสีออกเป็นเฉดสีแดงและหากค่า a* เป็นลบจะแสดงออกเป็นเฉดสีเขียว
- ค่า b* จะเป็นแกนตั้งฉากกับทั้งแกน L* และแกน a* ซึ่งจะแสดงถึงความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยหากค่า b* เป็นบวกจะแสดงสีออกเป็นเฉดสีเหลืองและหากเป็นค่าลบจะแสดงสีออกเป็นเฉดสีน้ำเงิน



ภาพที่ 23 L*a*b* color space

จากตัวแปรข้างต้นทำให้ระบบค่าสีนี้สามารถบอกได้ทั้งเฉด, ความสว่าง และความอิ่มตัวของสี โดยการหาค่า L*a*b* สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$L = 116f_y - 16$$
$$a = 500(f_x - f_y)$$
$$b = 200(f_y - f_z)$$

เมื่อ

$$f_x = \begin{cases} \sqrt[3]{x_r} & \text{ถ้า } x_r > \epsilon \\ \dfrac{\kappa x_r + 16}{116} & \end{cases}$$

$$f_x = \begin{cases} \sqrt[3]{y_r} & \text{ถ้า } y_r > \epsilon \\ \dfrac{\kappa y_r + 16}{116} & \end{cases}$$

มหาวิทยาลัยศิลปากร

$$f_x = \begin{cases} \sqrt[3]{z_r} & \text{ถ้า } z_r > \epsilon \\ \dfrac{\kappa z_r + 16}{116} & \end{cases}$$

$$x_r = \frac{X}{X_r}$$

$$y_r = \frac{Y}{Y_r}$$

$$Z_r = \frac{Z}{Z_r}$$

$$\epsilon = 0.008856 \text{ หรือ } 216/24389$$

$$\kappa = 903.3 \text{ หรือ } 24389/27$$

โดยที่

X_r, Y_r และ Z_r	คือ	ค่าของแสงสีขาวอ้างอิงหรือแหล่งกำเนิดแสง
X, Y และ Z	คือ	ค่าสีในระบบสี XYZ
L, a และ b	คือ	ค่าสีในระบบสี CIE L*a*b*

2.2 สีและพลาสติก [15]

สีในพลาสติกนั่นใช้เพื่อบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ของวัสดุพอลิเมอร์ในช่วง visible color โดยการให้สีกับพลาสติกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ เม็ดสี (Pigment) และสีย้อม (Dye) ซึ่งเม็ดสีคืออนุภาคที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการผลิตและระหว่างระยะเวลาการใช้งานของผลิตภัณฑ์พลาสติก ส่วนสีย้อมเป็นสีที่สามารถละลายได้ในพอลิเมอร์หรือสารที่อยู่ในระบบพอลิเมอร์ ซึ่งเม็ดสีจะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ เม็ดสีอินทรีย์และเม็ดสีอนินทรีย์ โดยเม็ดสีอินทรีจะประกอบไปด้วย คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งหากนำมาวิเคราะห์ทางเคมีแล้ว เม็ดสีดังกล่าวจะพบสารจำพวกโลหะเล็กน้อย เนื่องจากสารดังกล่าวจะเป็น precipitating agent หรืออาจเป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับผิวของอนุภาค ส่วนในเม็ดสีอนินทรีย์จะประกอบไปด้วยธาตุโลหะหรือโลหะผสมออกซิเจน, ซัลเฟอร์ หรือซีลีเนียม ในส่วนของสีย้อมนั้นจะนิยมใช้มากในพลาสติกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตออกมาไม่มีส่วนผสมของโลหะ เนื่องจากนิยามคำว่าสีย้อมเป็นสารที่สามารถละลายได้ในระบบพอลิเมอร์ดังนั้นสีย้อมจึงเป็นสารอินทรีย์โดยที่ใช้เป็นส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 9 กลุ่มคือ anthrapyidone, anthraquinone, azo, nigrosine, perinone, pyrazolone quinolone, quinophthalone, และ xanthene สีย้อมโดยส่วนใหญ่มักจะทนต่อแสงได้ไม่ดีในโทนสี

อ่อนหรือสีพาสเทล แต่ในสีที่เป็น fulltone หรือ masstone หรือสีที่มีความอิ่มตัวของสีสูงจะมีสมบัติที่ดีกว่า อย่างที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสีย้อมนั้นสามารถละลายได้ในระบบพอลิเมอร์ ซึ่งอาจจะไม่ใช่การละลายในพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวแต่ยังสามารถละลายในองค์ประกอบของพลาสติกได้ไม่ว่าจะเป็นสารหล่อลื่น, สารเพิ่มความเสถียร, สารป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ หรือสารเติมแต่งต่างที่เติมลงไปในผลิตภัณฑ์พลาสติก อีกประการหนึ่งที่สีย้อมมักถูกใช้มากในพลาสติกเนื่องจากมีความสามารถในการให้สีสูงในขณะที่น้ำหนักของชิ้นงานพลาสติกเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ในทางกลับกันสีย้อมบางชนิดอาจให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีกับพลาสติกบางชนิด เนื่องจากอาจเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดตำหนิกับพลาสติกเช่น เกิดการตกของสี (bleeding) ของสีย้อมดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้สีย้อมให้เหมาะสมกับชนิดพลาสติกเพื่อไม่ให้เกิดตำหนิกับผลิตภัณฑ์พลาสติก

2.3 เครื่องวัดค่าสี[16]

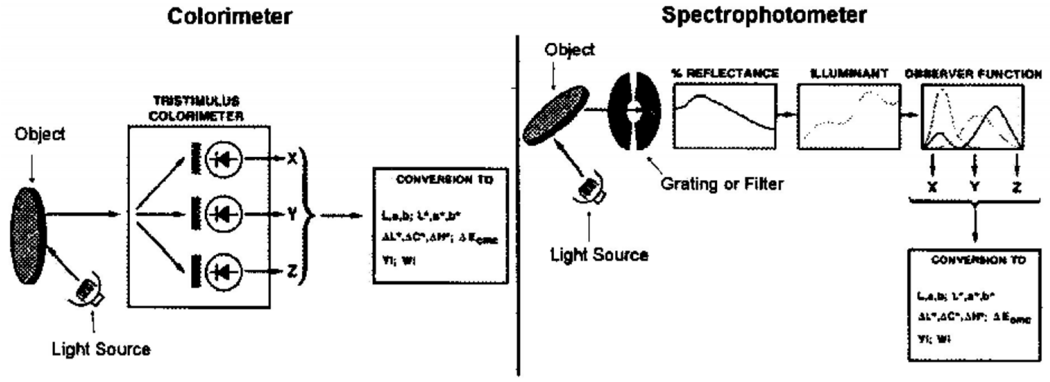
เครื่องวัดสีใช้เก็บข้อมูลของสีในเชิงตัวเลข เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้เป็นมาตรฐานในการสื่อสารเกี่ยวกับลักษณะของสีในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลก โดยเครื่องวัดสีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ Colorimeter และ Spectrophotometer ซึ่งจะมีความแตกต่างกันดังนี้

2.3.1 Colorimeter

เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีพื้นฐานมาจากการมองเห็นของมนุษย์ คือการใช้แสงส่องตัวอย่าง แล้วจึงทำการกรองด้วยฟิลเตอร์สีปฐมภูมิทั้งฟิลเตอร์สีแดง ฟิลเตอร์สีเขียว และฟิลเตอร์สีน้ำเงิน แล้วนำความเข้มของแสงที่ถูกฟิลเตอร์ไปวิเคราะห์ต่อ โดยวิธีดังกล่าวจะต้องมีข้อมูลค่ามาตรฐานแสงสีปฐมภูมิ ซึ่งข้อมูลที่ได้จาก Colorimeter นั้นจะได้มาเพียงค่าของสีของวัตถุเท่านั้น และหากความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลค่าสีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตาม

2.3.2 Spectrophotometer

เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างในเชิงฟิสิกส์โดยได้จากสเปกตรัมทั้งหมดที่วัตถุปลดปล่อยออกมาจากการให้แสงกับวัตถุ จากนั้นจึงนำลำแสงให้ผ่านเกรตติง เพื่อให้ลำแสงดังกล่าวแยกออกเป็นเส้นสเปกตรัมของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากวัตถุ ก่อนเข้าตัวตรวจจับ แล้วแปลงค่าออกมาเป็นค่าสี ซึ่งเป็นข้อมูลที่แม่นยำมากกว่าการมองเห็นของมนุษย์ เนื่องจากเป็นการเก็บข้อมูลจากสเปกตรัมทั้งหมด ซึ่งจะนำค่าสเปกตรัมดังกล่าวมาเทียบกับสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงก่อนนำไปแปลงค่า จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง



ภาพที่ 24 แสดงความแตกต่างระหว่าง colorimeter กับ spectrophotometer

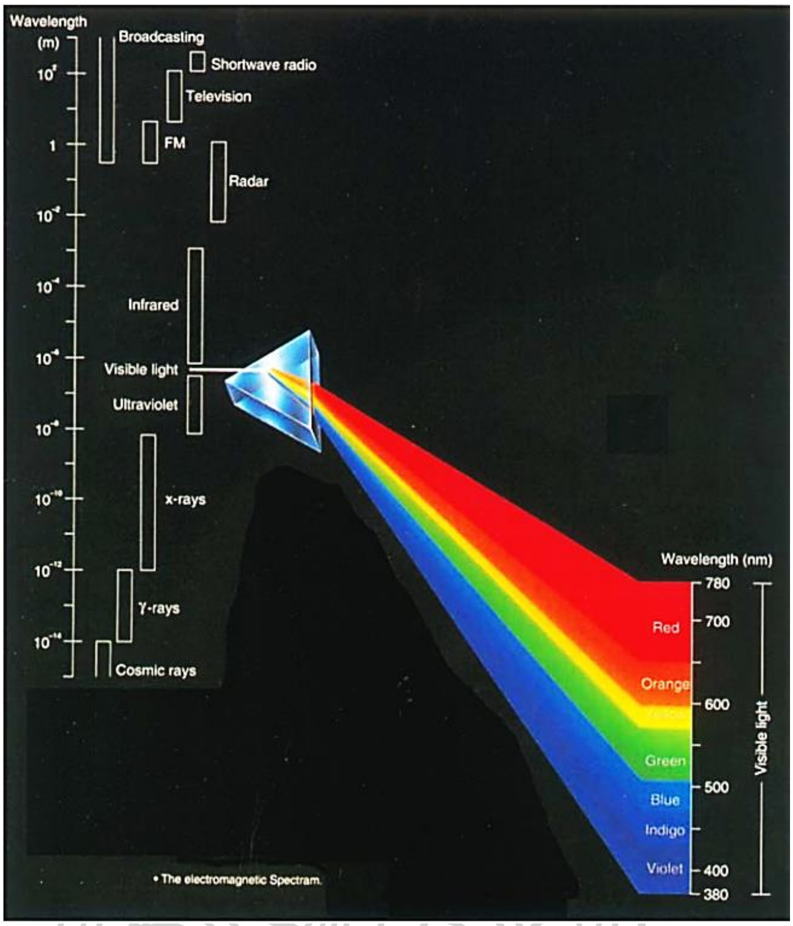
2.4 ส่วนประกอบของเครื่องวัดค่าสีจากสเปกตรัม

2.4.1 แหล่งกำเนิดแสง [8]

การที่จะมองเห็นสีได้นั้นจำเป็นต้องมีแสงมาตกกระทบกับวัตถุ ซึ่งแสงที่ทำให้สามารถมองเห็นสีของวัตถุได้นั้นจะเป็นแสงในช่วง Visible light ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380-780 นาโนเมตร โดยในช่วงความยาวดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสีต่าง ๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 25 และตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงสีที่ปรากฏในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ

ช่วงความยาวคลื่น (nm)	สีที่ปรากฏ
380-420	ม่วง
420-470	คราม
470-510	น้ำเงิน
510-570	เขียว
570-590	เหลือง
590-650	ส้ม
650-780	แดง



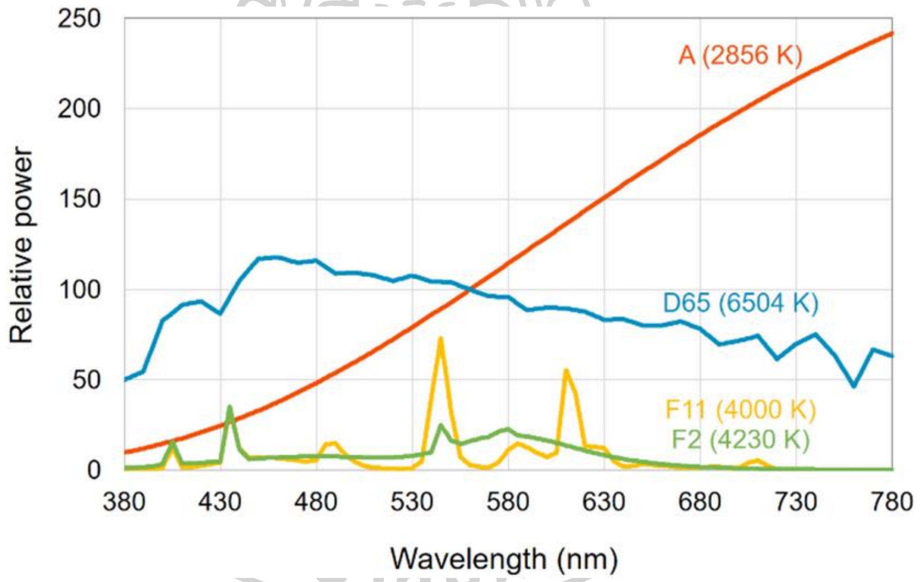
ภาพที่ 25 แสดงช่วงความยาวคลื่นที่เป็นช่วง Visible light และสีที่ปรากฏในความยาวคลื่นนั้นๆ

โดยในเครื่องมือที่ใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่าง ๆ ที่เป็นจำพวกสเปกโตรสโกปี จำต้องมีแหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้แสงกระทบกับชิ้นงานตัวอย่างแล้วนำสเปกตรัมที่ชิ้นงานตัวอย่างปลดปล่อยออกมาไปวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งในเครื่องมือการวัดสีส่วนใหญ่จะใช้แหล่งกำเนิดแสงตามที่องค์กร CIE (Commission Internationale de l’Eclairage) โดยได้กำหนดแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นมาตรฐานไว้มากมาย โดยทั่วไปมาตรฐานแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันมากดัง

ตารางที่ 4 และในแต่ละชนิดของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานจะให้สเปกตรัมที่แตกต่างกันดังภาพที่ 26

ตารางที่ 4 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กันมากในแสงช่วงคลื่น Visible light

มาตรฐาน	อุณหภูมิสี (K)	แหล่งกำเนิดแสง
มาตรฐาน D65 (Standard illuminant D65)	6500	แสงจากค่าเฉลี่ยของแสงแดดตอนกลางวัน
มาตรฐาน A (Standard illuminant A)	2856	แสงสีส้ม เช่น แสงจากหลอดทังสเตน (Tungsten)
แหล่งกำเนิดแสง F2 (Illuminant F2)	4230	แสงสีขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรซเซนต์ (Cool white fluorescent lamp (CWF))
แหล่งกำเนิดแสง F11 (Illuminant F11)	4000	แสงจากโคมไฟหลอดสามแถว (Triple-band lamp (TL))



ภาพที่ 26 แสดงสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงตามมาตรฐานของ CIE ที่พบบ่อย

2.4.2 เลนส์ (Lens) [17]

คืออุปกรณ์ที่โปร่งใส ส่วนใหญ่มักทำมาจากพลาสติกหรือแก้ว ใช้สำหรับการรวมแสงและจัดตำแหน่งภาพของวัตถุให้พอดีกับเซนเซอร์ เพื่อให้ได้ภาพที่มีขนาดตามที่ต้องการและมีความสมมาตร ซึ่งระยะภาพสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

โดยที่

f คือ ระยะโฟกัสของเลนส์

s_o คือ ระยะห่างระหว่างวัตถุจนถึงเลนส์

s_i คือ ระยะห่างระหว่างเลนส์จนถึงภาพที่ปรากฏ

โดยการเกิดภาพจะขึ้นอยู่กับชนิดของเลนส์และระยะวัตถุดังตารางที่ 5

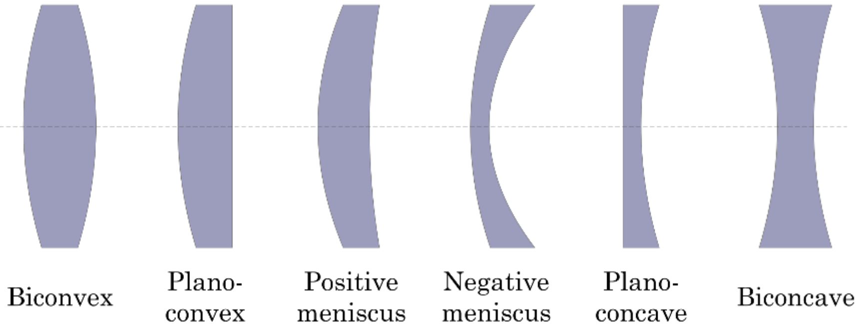
ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของระยะวัตถุ ประเภทของเลนส์ และการเกิดภาพ

ระยะวัตถุ	ประเภทของเลนส์	การเกิดภาพ
ระยะอนันต์ ($s_o \approx \infty$)	เลนส์นูน	เกิดภาพจริงขนาดเล็กมาก (เป็นจุด) บริเวณหลังเลนส์ ณ จุดโฟกัส
	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กมาก (เป็นจุด) บริเวณหน้าเลนส์ ณ จุดโฟกัส (f)
มากกว่าระยะ 2f แต่น้อยกว่าระยะอนันต์ ($2f<s_o<\infty$)	เลนส์นูน	เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดเล็กกว่าวัตถุบริเวณหลังเลนส์ ไม่เกิน 2f'
	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ บริเวณหน้าเลนส์ไม่เกินระยะโฟกัส (f)
ระยะ 2f (s_o=2f)	เลนส์นูน	เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดเท่ากับวัตถุ บริเวณหลังเลนส์ ณ จุด 2f'

	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ บริเวณหน้าเลนส์ไม่เกินระยะโฟกัส (f)
ระหว่างระยะ 2f และ f ($f<s_o<2f$)	เลนส์นูน	เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดใหญ่กว่าวัตถุบริเวณหลังเลนส์มากกว่า 2f'
	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ บริเวณหน้าเลนส์ไม่เกินระยะโฟกัส (f)
ระยะ f ($s_o=f$)	เลนส์นูน	เกิดภาพไม่ชัดขนาดใหญ่มากที่ระยะอนันต์
	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ บริเวณหน้าเลนส์ไม่เกินระยะโฟกัส (f)
ระยะน้อยกว่า f ($s_o<f$)	เลนส์นูน	เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขนาดใหญ่กว่าวัตถุด้านหน้าเลนส์บริเวณหลังวัตถุ
	เลนส์เว้า	เกิดภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ บริเวณหน้าเลนส์ไม่เกินระยะโฟกัส (f)

และเลนส์สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท ตามลักษณะของเลนส์ได้แก่ เลนส์นูนสองข้าง (biconvex lens) เลนส์นูนข้างเดียว (plano-convex lens) เลนส์แบบข้างนึงนูนข้างนึงเว้า (meniscus lens) เลนส์เว้าข้างเดียว (plano-concave lens) และเลนส์เว้าสองข้าง (biconcave lens) ซึ่งเลนส์แบบข้างนึงนูนข้างนึงเว้าสามารถแบ่งได้อีก 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่มีข้างนูนมากกว่าข้างเว้า (positive meniscus lens) และในลักษณะที่มีข้างเว้ามากกว่าข้างนูน (negative meniscus lens)

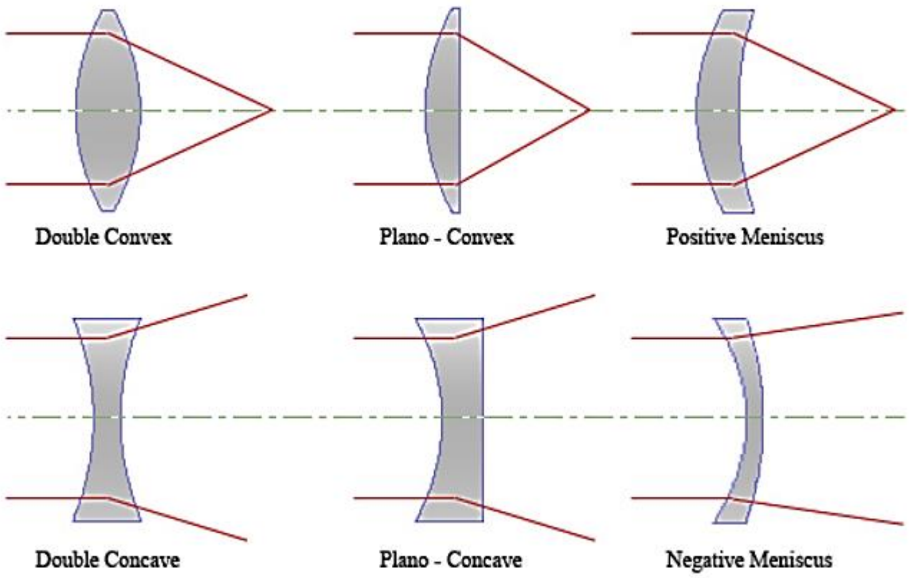
มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 27 ลักษณะและรูปร่างของเลนส์ชนิดต่าง ๆ

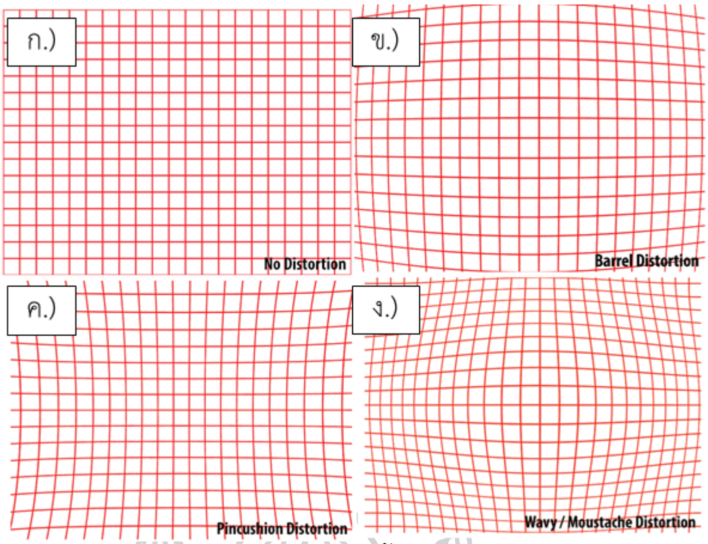
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ซึ่งเลนส์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการหักเหแสงดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 รูปแบบการหักเหแสงของเลนส์แต่ละชนิด

การเกิดภาพเนื่องจากแสงผ่านเลนส์ส่วนใหญ่มักจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Optical Distortion ซึ่งจะเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ภาพที่ปรากฏขึ้นจากเลนส์เกิดความโค้ง ไม่เป็นสี่เหลี่ยม เนื่องมาจากความโค้งของเลนส์ ดังนั้นในการนำมาคำนวณจึงจะต้องเผื่อขนาดของภาพบนเซนเซอร์กล้องเพื่อไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น โดยการเกิด distortion นั้น ส่วนใหญ่แบ่งออกได้เป็น 3 แบบหลัก ๆ คือ Barrel distortion จะเป็นการโค้งของภาพในลักษณะที่บริเวณตรงกลางของภาพจะยังตรงอยู่ แต่บริเวณขอบภาพจะเกิดความโค้งในลักษณะที่โค้งออกจากจุดศูนย์กลางของภาพ กล่าวคือทำให้ภาพพองขึ้น Pincushion distortion จะเป็นการโค้งของภาพในลักษณะที่บริเวณตรงกลางของภาพจะยังตรงอยู่ แต่บริเวณขอบภาพจะเกิดความโค้งในลักษณะที่โค้งเข้าหาจุดศูนย์กลางของภาพ กล่าวคือทำให้ภาพแฟบลงหรือยุบเข้าไป Wavy หรือ Moustache distortion คือการเกิดผสมกันทั้ง 2 แบบทั้ง Barrel และ Pincushion distortion [18] ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 รูปแบบความโค้งของภาพที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังเลนส์ ก.) ภาพที่ไม่มีตำหนิ ข.) ตำหนิแบบ Barrel ค.) ตำหนิแบบ Pincushion และ ง.) ตำหนิแบบ Wavy หรือ Moustache

การคำนวณภาพให้ตกกระทบบนเซนเซอร์ เพื่อให้เซนเซอร์สามารถแปลงค่าแสงไปเป็นรูปภาพได้ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f = v \times \frac{D}{V}$$

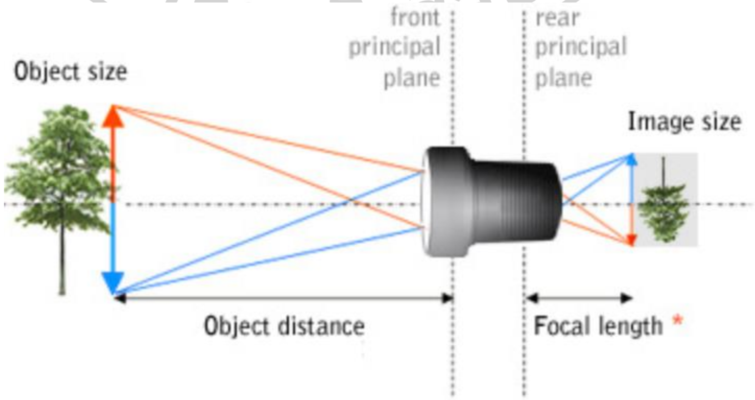
โดยที่

f คือ ระยะโฟกัสของระบบเลนส์

v คือ ความกว้างของเซนเซอร์

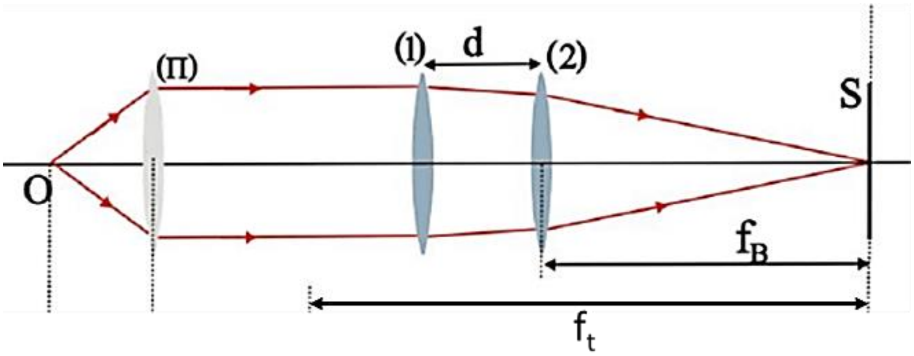
D คือ ระยะทางระหว่างวัตถุถึงเลนส์

V คือ ความกว้างของภาพจริง



ภาพที่ 30 การเกิดภาพหลังเลนส์

ซึ่งในบางกรณีการจัดหาเลนส์ให้มีระยะโฟกัสให้พอดีกับสมการข้างต้นอาจจะเป็นการยากเกินไป จึงจำเป็นต้องมีการใช้เลนส์ 2 ตัวเพื่อให้ได้ระยะโฟกัสที่เท่าหรือใกล้เคียงกับการคำนวณมากที่สุด



ภาพที่ 31 ระยะโฟกัสของระบบเลนส์ 2 ตัว

ซึ่งการคำนวณระยะโฟกัสของระบบเลนส์ 2 ตัวนั้น สามารถคำนวณผ่านสมการ ดังนี้

$$f_t = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$$

โดยที่

f_t คือ ระยะโฟกัสรวมของระบบ

f_1 คือ ระยะโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 1

f_2 คือ ระยะโฟกัสของเลนส์ตัวที่ 2

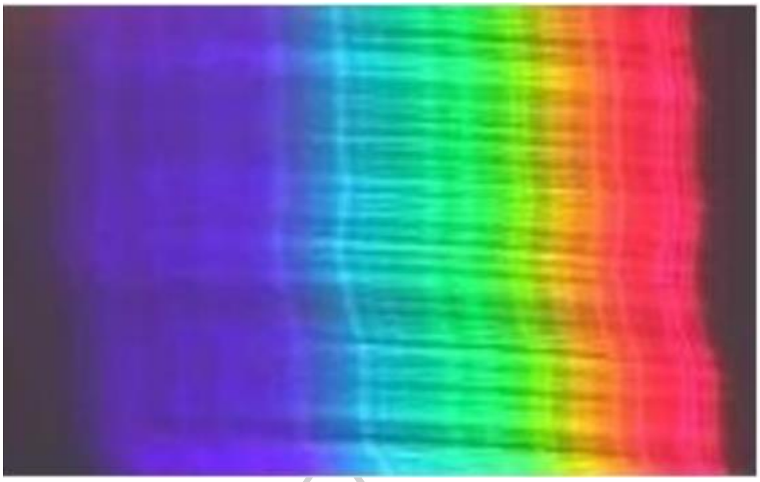
d คือ ระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้ง 2

2.4.3 อุปกรณ์แยกสเปกตรัม [19]

ในการวัดค่าสีจากสเปกตรัมนั้น จำเป็นต้องมีการแยกแสงขาวให้เป็นสเปกตรัมในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ เพื่อที่จะสามารถนำไปคำนวณต่อได้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีหลายชนิด ดังนี้

2.4.3.1 ปริซึม (Prism)

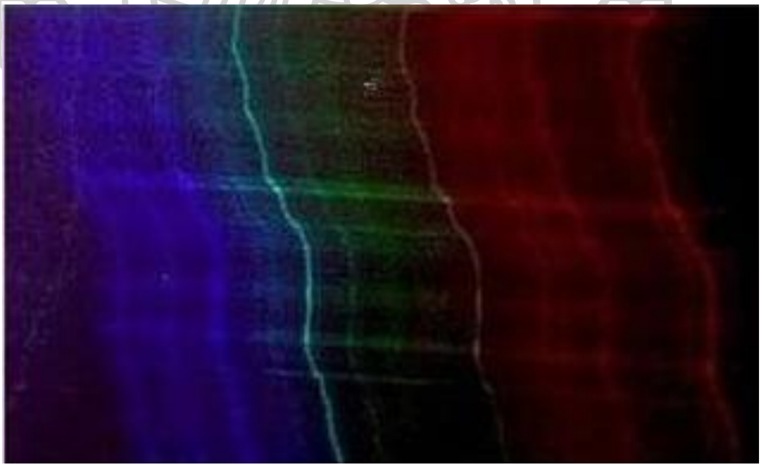
ส่วนประกอบหลักของปริซึมคือ NaCl หรือ KBr มักพบมากในเครื่องมือวัดสเปกตรัมชนิดต่าง ๆ เนื่องจากหาง่าย แต่ปริซึมจะมีการแยกสเปกตรัมออกมาเป็นแบบ non-linear representation กล่าวคือจะให้ช่วงสเปกตรัมที่ไม่ทำกัน โดยช่วงสีน้ำเงินจะมีช่วงที่ใหญ่กว่าช่วงสีแดง ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากปริซึม

2.4.3.2 เกรตติง (Diffraction grating)

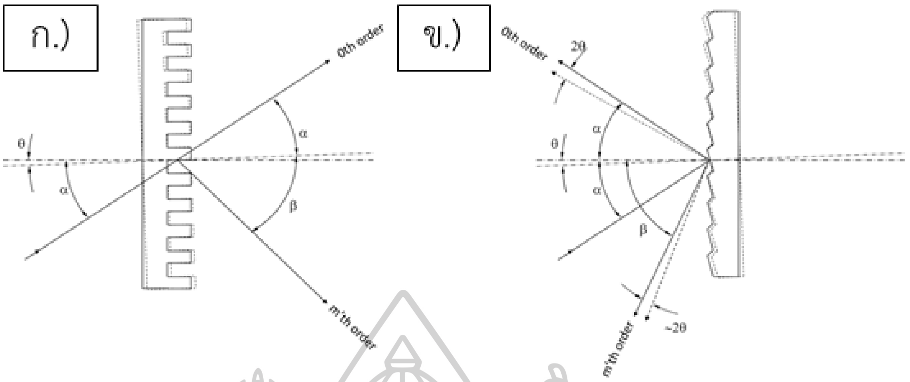
หลักการทำงานของเกรตติงคือแยกสเปกตรัมโดยการให้แสงผ่านร่องขนาดเล็ก ดังนั้น ประสิทธิภาพในการแยกสเปกตรัมจะขึ้นอยู่กับปริมาณร่อง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในหน่วยร่องต่อมิลลิเมตร เกรตติงจะแยกสเปกตรัมออกมาในแบบ linear representation คือแยกสเปกตรัมออกมาตามขนาดความยาวคลื่นจริงและยังสามารถทำให้เกิดสเปกตรัมได้หลายออเดอร์ ดังนั้นจึงอยากมีการปนกันของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นสูง ๆ กับสเปกตรัมของออเดอร์ถัดไปได้ จึงจำเป็นต้องมีฟิลเลอร์ตัดสเปกตรัมช่วงคลื่นที่ไม่ต้องการออก



ภาพที่ 33 สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากเกรตติง

เกรตติงมีอยู่ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เกรตติงแบบสะท้อน (Deflection diffraction grating) คือเกรตติงที่ทำการแยกสเปกตรัมโดยการสะท้อนแสง ซึ่งแสงที่สะท้อนออกจะเป็นแสงที่ผ่านการแยก

สเปกตรัมแล้ว และเกรตติงแบบส่องผ่าน (Transmission diffraction grating) คือเกรตติงที่จะแยกสเปกตรัมออกโดยการให้แสงส่องผ่าน ซึ่งจะเกิดเป็นสเปกตรัมในมุมต่าง ๆ



ภาพที่ 34 ตำแหน่งการเกิดสเปกตรัม ก.) เกรตติงแบบส่องผ่าน และ ข.) เกรตติงแบบสะท้อน

โดยสามารถคำนวณความยาวคลื่นที่ต้องการหรือมุมของสเปกตรัมที่แยกโดยเกรตติงได้ตามสมการดังนี้

$$m \times \frac{\lambda}{\Lambda} = \sin(\alpha) + \sin(\beta)$$

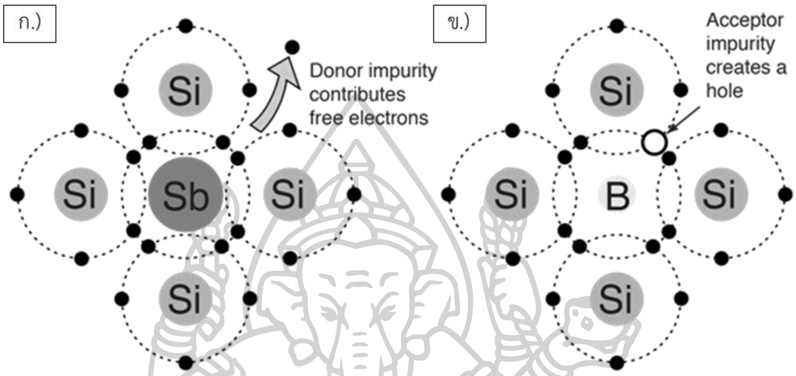
โดยที่

m	คือ จำนวนออเดอร์
λ	คือ ความยาวคลื่น
$\frac{1}{\Lambda}$	คือ จำนวนร่องของเกรตติงต่อมิลลิเมตร
α	คือ มุมตกกระทบของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
β	คือ มุมของสเปกตรัมที่ถูกแยกที่ออเดอร์ที่ m

2.4.4 อุปกรณ์รับสเปกตรัม (Detector) [20]

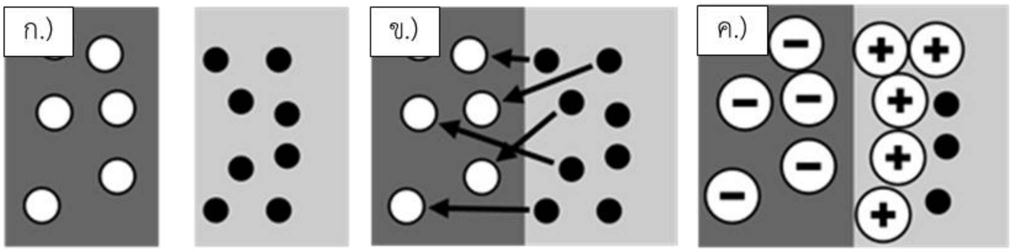
อุปกรณ์รับสเปกตรัมมีหลักการทำงานโดยการวัดความเข้มของรังสีหรือแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพในการวัดจะขึ้นอยู่กับเซนเซอร์ โดยส่วนใหญ่แล้วเซนเซอร์ที่มักใช้ในอุปกรณ์รับสเปกตรัมมักจะผลิตโดยสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นั้นจะจับตัวรวมกันเองเพื่อให้ตัวมันเองเสถียร ทำให้นำไฟฟ้าได้ไม่ดี จึงจำเป็นต้องผ่านการโดป (doping) หรือการเติมสารอื่น เพื่อให้สารกึ่งตัวนำดังกล่าวเกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเดิม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สารกึ่งตัวนำชนิด P (P-type semiconductor) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาเติมด้วยสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 3 ตัว ลงไป ทำให้เกิดช่องว่างของอิเล็คตรอนหรือ โฮล (hole) มากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้สารดังกล่าวมีสภาพประจุเป็นบวก
2. สารกึ่งตัวนำชนิด N (N-type semiconductor) เป็นการเติมสารที่มีอิเล็กตรอนวงนอก 5 ตัว ให้กับสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากกว่าการเกิดโฮล ทำให้สารดังกล่าวมีประจุเป็นลบ



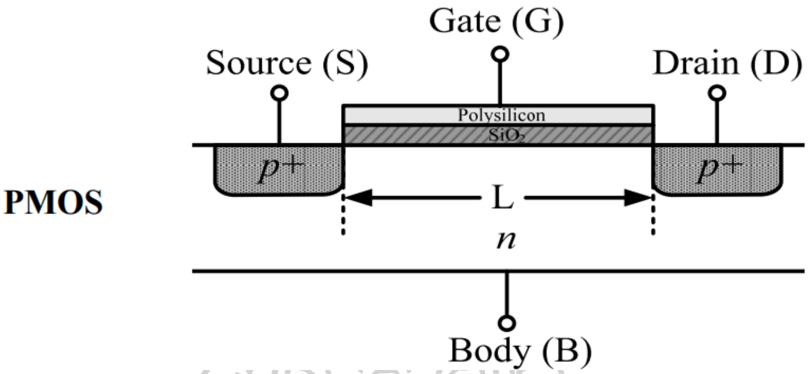
ภาพที่ 35 ประเภทของสารกึ่งตัวนำ ก.) สารกึ่งตัวนำชนิด N และ ข.) สารกึ่งตัวนำชนิด P

และเมื่อนำสารทั้ง 2 ชนิดมาเชื่อมต่อกันจะทำให้ได้ไดโอด (diodes) โดยหลักการทำงานของไดโอดดังกล่าวคือ การที่อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำประเภท n-type ถูกกระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวมีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ p-n (p-n junction) หรือ depletion region และไปเข้ากับโฮลของ p-type ทำให้โฮลที่ถูกเติมด้วยอิเล็กตรอนอิสระกลายเป็นขั้วลบและตำแหน่งเดิมของอิล็กตรอนฝั่ง n-type กลายเป็นประจุบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งเรียกวิธีดังกล่าวว่า การไบอัสตรง (forward bias) และหากมีการสลับขั้ว โดยต่อแบตเตอรี่ขั้วบวกเข้ากับด้าน n-type และต่อขั้วลบเข้ากับ p-type จะทำให้เกิด การไบอัสกลับ (reveres bias) คือการดึงโฮลและอิเล็กตรอนอิสระออกจากกัน ทำให้ไม่เกิดกระแสไฟฟ้า



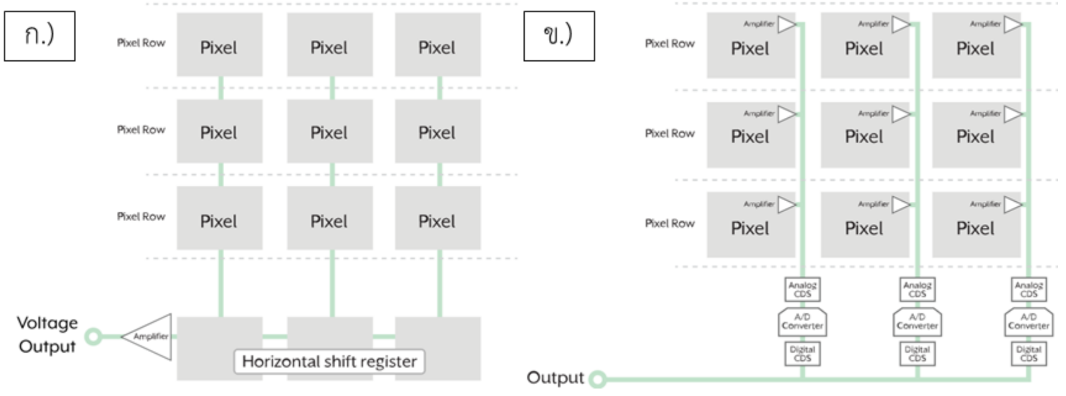
ภาพที่ 36 กลไกการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ก.) ไม่มีการให้พลังงานกระตุ้นสารกึ่งตัวนำ ข.) ให้พลังงานกระตุ้นแก่สารกึ่งตัวนำ และ ค.) สารกึ่งตัวนำเกิดประจุขึ้น

โดยในเซนเซอร์รูปภาพส่วนใหญ่จะมี 2 เซนเซอร์คือ เซนเซอร์แบบ CCD (charge-coupled device) และเซนเซอร์แบบ CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) ซึ่งสามารถแปลงค่าแสงให้เป็นแรงดันไฟฟ้าต่อหนึ่งพิกเซลได้ ก่อนกระแสไฟภายในตัวกล้องจะแปลงแรงดันไฟให้เป็นข้อมูลดิจิตอล โดยการใช้ตัวเก็บประจุแบบ p-dope MOS (metal-oxide-semiconductor)



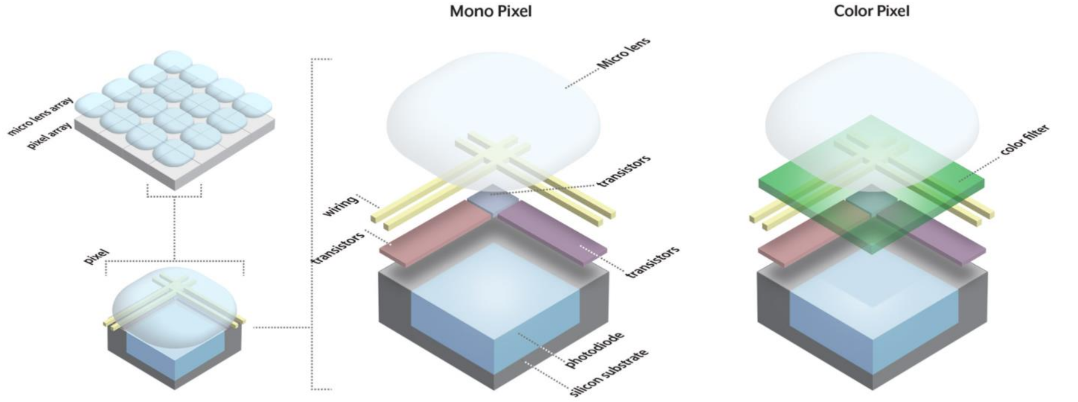
ภาพที่ 37 โครงสร้างของเซนเซอร์ประเภท PMOS

ซึ่งจะใช้หลักการของ p-i-n junction มีหลักการคล้าย ๆ แบบ p-n junction แต่จะมีการเพิ่มความหนาบริเวณ depletion region โดยใน p-dope MOS จะมีการเพิ่ม เกท (gate) ให้กับสารกึ่งตัวนำให้เป็นตัวขั้นระหว่าง n-type และ p-type โดยบริเวรเกทกล่าวจะเป็นบริเวรที่มีการแอคทีฟกับแสง (photoactive region) ซึ่งเมื่อได้รับแสงบนบริเวณดังกล่าวจะทำให้เกิด depletion region ก่อนจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของโฮลที่เป็นพาหะทำให้เกิดแรงดันไฟจำเพาะขึ้น โดยใน CCD นั้นจะทำการแปลงค่าแรงดันทีละพิกเซล ส่วนในสถาปัตยกรรมที่ใหม่กว่าอย่างเซนเซอร์แบบ CMOS นั้น ในแต่ละพิกเซลจะมีการเพิ่มตัวเก็บประจุ (capacitor) และตัวขยาย (amplifier) ทำให้สามมารถเก็บค่าได้เป็นทีละแถว (array) ดังนั้นจึงทำให้เซนเซอร์แบบ CMOS จะมีความเร็วในการประมวลผลมากกว่าเซนเซอร์แบบ CCD เนื่องจากมีหน่วยความจำในการช่วยเก็บค่าในแต่ละพิกเซล



ภาพที่ 38 รูปแบบการทำงานของเซนเซอร์ ก.) เซนเซอร์แบบ CCD และ ข.) เซนเซอร์แบบ CMOS

โดยพิกเซลก็ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ พิกเซลแบบโมโน (mono pixel) และ พิกเซลสี (color pixel) ความแตกต่างระหว่าง 2 ประเภทข้างต้นคือ ในพิกเซลสีจะมีการเพิ่มชั้นของฟิลเตอร์คัดสีบริเวณด้านบนของเกททำให้พิกเซลดังกล่าวรับแต่ความเข้มแสงของสีนั้นๆ ส่วนใหญ่มันจะเป็นฟิลเตอร์สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 39 รูปแบบและประเภทของพิกเซล

2.4.5 ซอฟต์แวร์ (Software)

ซอฟต์แวร์โดยส่วนใหญ่จะพัฒนาด้วยตัวของบริษัทผู้จัดจำหน่ายเอง ซึ่งส่วนใหญ่นั้นซอฟต์แวร์จะมีการเขียนออกมาให้ใช้งานง่าย แต่ในเรื่องของรายละเอียดต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่นการปรับแต่งสเปกตรัมเพื่อให้ได้ค่าสีที่ถูกต้องมักจะเป็นความลับของทางบริษัท จึงทำให้การนำสเปกตรัมมาใช้แบบตรง ๆ กับเครื่องวัดที่ไม่ได้ผลิตขึ้นโดยบริษัทเดียวกันหรือแม้กระทั่งรุ่นต่างกันนั้นเป็นเรื่องยาก

2.5 การวิเคราะห์ค่าสเปกตรัม [21-23]

การวิเคราะห์สเปกตรัมจะใช้วิธีทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

2.5.1 Covariance (COV)

ค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) คือค่าสถิติที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัว ซึ่งค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยวนั้นสามารถเป็นได้ทั้งค่าลบและค่าบวก โดยค่าดังกล่าวจะบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$COV(x,y) = \frac{\sum(x-\bar{x}) \times \sum(y-\bar{y})}{n-1}$$

โดยที่

x คือ ค่าตัวแปรที่ 1

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลของตัวแปร x

y คือ ค่าตัวแปรที่ 2

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลตัวแปร y

n คือ จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด

COV เป็นบวก (+) แสดงว่าชุดข้อมูลทั้ง 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

COV เป็นลบ (-) แสดงว่าชุดข้อมูลทั้ง 2 มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน

COV เป็น 0 แสดงว่าข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กัน

และค่ามากหรือน้อยจะแสดงได้ถึงระดับของความสัมพันธ์ (magnitude หรือ strength) ของข้อมูลได้อีกด้วยและหาเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์จะได้ดังสมการ

$$COV(\vec{x},\vec{y}) = \frac{1}{n-1}(\vec{x}-\bar{\vec{x}})'(\vec{y}-\bar{\vec{y}})$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการ

กำหนดให้

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1_n} & \cdots & x_{p_n} \end{bmatrix}$$

$$COV(X) = \frac{1}{n-1}(X' \cdot X)$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์จะได้ดังสมการ

$$COV(\vec{x},\vec{y}) = \frac{1}{n-1}(\vec{x}-\bar{\vec{x}})'(\vec{y}-\bar{\vec{y}})$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการ

กำหนดให้

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1_n} & \cdots & x_{p_n} \end{bmatrix}$$

$$COV(X) = \frac{1}{n-1}(X' \cdot X)$$

หากขนาดของข้อมูล (data dimension) มีเพียง X,Y หรือเป็นข้อมูล 2 มิติ จะมี COV ที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ COV(X,X) COV(X,Y) COV(Y,Y) และ COV(Y,X) ทำให้ได้เมทริกซ์ COV ดังสมการ

$$COV\ Matrix = \begin{bmatrix} \mathrm{COV}(X,X) & \mathrm{COV}(X,Y) \\ \mathrm{COV}(Y,X) & \mathrm{COV}(Y,Y) \end{bmatrix}$$

2.5.2 Correlation (COR)

Correlation coefficient หรือ Pearson Product Moment Correlation Coefficient หรือค่าสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ คือการ normalization ค่า COV ให้มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 และยังคงการคิดรูปแบบความสัมพันธ์และระดับความสัมพันธ์เช่นเดียวกันกับ COV โดยจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$COR(x,y) = \frac{COV(x,y)}{\sigma_x \times \sigma_y}$$

โดยที่

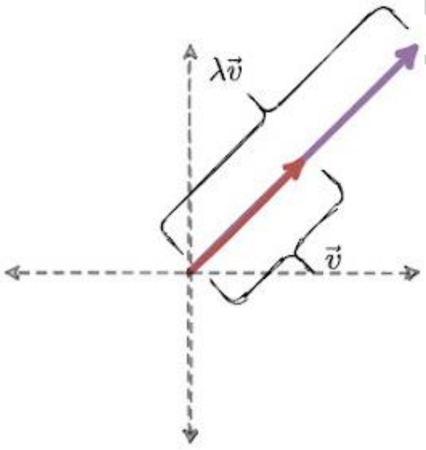
σ_x คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล x
σ_y คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล y

หากกำหนดให้ $\hat{X}$ คือ เมทริกซ์ที่เป็น normalized form ของชุดข้อมูล X จะได้ดังสมการ

$$COR(\hat{X}) = \hat{X}' \cdot \hat{X}$$

2.5.3 Eigenvector และ Eigenvalue

คือเครื่องมือในการคำนวณเพื่อใช้บอกทิศทางและขนาดของความแปรปรวน



ภาพที่ 40 กราฟสมการเส้นตรงของ Eigenvector และ Eigenvalue

โดยผลการคำนวณจะออกมาเป็นคู่อันดับและมีจำนวนคู่อันดับเท่ากับจำนวนของคอลัมน์ของเมทริกซ์ข้อมูลเสมอสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

กำหนดให้ $\vec{v}$ คือ Eigenvector และ λ คือ Eigenvalue

โดยที่ $\vec{v} \in \mathbb{R}, \vec{v} \neq \vec{0}, A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ และ λ เป็นปริมาณสเกลาร์ (Scalar)

$$A \cdot \vec{v} = \lambda \vec{v}$$

จากสมการข้างต้นและ จะทำให้ A เป็นเมทริกซ์การแปลงเชิงเส้น (Linear Transformation matrix) หรือ $A\vec{v}_n$

$$A \cdot \vec{v} - \lambda \vec{v} = \vec{0}$$

เปลี่ยนปริมาณสเกลาร์ให้เป็นเมทริกซ์ โดยการคูณสเกลาร์ด้วยเมทริกซ์เอกลักษณ์ (I)

$$(A - \lambda I)\vec{v} = \vec{0}$$

$$A - \lambda I = 0$$

ซึ่ง $A - \lambda I$ ต้องเป็นเมทริกซ์ที่มีค่า det(A) เท่ากับ 0 หรือเป็นเมทริกซ์เอกฐาน (Singular matrix)

$$det(A - \lambda I) = 0 = \rho(\lambda)$$

หาก $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$ จะได้

$$det\begin{pmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{nn-\lambda} \end{pmatrix} = 0$$

จากนั้นจึงหาตัวค่าประกอบของ λ หรือ Eigenvalue แล้วจึงนำค่า Eigenvalue ไปแทนค่าในสมการ $A \cdot \vec{v} = \lambda \vec{v}$ เพื่อหาเมทริกซ์ Eigenvector ในแต่ละ Eigenvalue โดยที่หากนำ Eigenvector มารวมกันเป็นเมทริกซ์ V ซึ่งเมทริกซ์แบบคอลัมน์เวกเตอร์ (column vector) จะได้ว่าเมทริกซ์ V เป็น orthogonal matrix หรือ $V' \cdot V = I$

2.5.4 Principal Component Analysis (PCA)

Principal Component Analysis หรือ PCA เป็นอัลกอริทึม (algorithm) ที่ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการลดมิติของข้อมูล (Dimension reduction) โดยสร้างตัวแปรใหม่ขึ้นมาเรียกว่า component ซึ่ง component แต่ละตัวแปรจะไม่มีความสัมพันธ์กันหรือเมทริกซ์ค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (Covariance Matrix) ของ component เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix) และเรียงลำดับ component จาก component ที่มีค่าความแปรปรวณมากที่สุดเป็น component ตัว

แรกสุด โดยในปกติมักนิยมใช้ component ครอบคลุมความแปรปรวณประมาณ 80 ถึง 90 เปอร์เซ็น เพื่อความหลากหลายของตัวแปรต้น โดยการหา component จะหาได้ด้วยการย้ายตำแหน่งตัวแปรต้นให้ตำแหน่ง (0,0) เป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มข้อมูลดังสมการ

$$X_c = X - \bar{X}$$

ก่อนนำ X_c ไปหา COV

$$COV(X_c) = \frac{1}{n} X_c{}' \cdot X_c$$

ก่อนนำ COV(X_c) ไปคำนวณ Eigen value และ Eigen vector โดย Eigen vector เมื่อนำมาพล็อตกราฟ Eigen vector จะตั้งฉากต่อกันหรือนำมาหาผลคูณภายใน (inner product) จะได้ค่าเป็น 0 ดังนั้น Eigen vector จึงเป็นอิสระต่อกัน หากนำข้อมูลตัวแปรต้นเดิมมาฉาย (Project) ลงบนปริภูมิเวกเตอร์ (Vector space) ใหม่ที่เป็นของ Eigen vector ดังภาพที่ 41 หรือทำการหาผลรวมเชิงเส้น (Linear combination) ระหว่างชุดของมูลของตัวแปรต้นกับเมทริกซ์ Eigen vector ดังสมการ

$$X_{\text{ใหม่}} = X_{\text{เก่า}} \cdot V_b$$

เปลี่ยนรูปเป็นแบบเมทริกซ์

$$x_{\text{ใหม่}_1} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{1_1} \\ \vdots \\ v_{1_m} \end{bmatrix}$$

$$\vdots$$

$$x_{\text{ใหม่}_p} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{p_1} \\ \vdots \\ v_{p_m} \end{bmatrix}$$

คูณเข้าเมทริกซ์ V

$$x_{\text{ใหม่}_1} = v_{1_1} \times \begin{bmatrix} x_{11} \\ \vdots \\ x_{m1} \end{bmatrix} + \cdots + v_{1_m} \times \begin{bmatrix} x_{1n} \\ \vdots \\ x_{mn} \end{bmatrix}$$

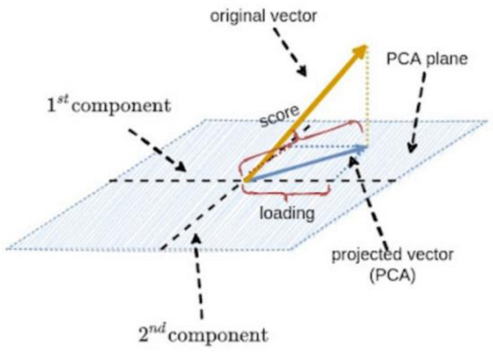
$$\vdots$$

$$x_{\text{ใหม่}_p} = v_{p_1} \times \begin{bmatrix} x_{11} \\ \vdots \\ x_{m1} \end{bmatrix} + \cdots + v_{p_m} \times \begin{bmatrix} x_{1n} \\ \vdots \\ x_{mn} \end{bmatrix}$$

จากสมการข้างต้นสมาชิกของ Eigen vector จะทำหน้าที่เป็นค่าน้ำหนักหรือค่าสัมประสิทธิ์ (loading factor หรือ coefficient) จึงทำให้เมทริกซ์ของ Eigen vector คือเมทริกซ์ค่าน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยศิลปากร

(Loading matrix) และค่าความยาว (length หรือ magnitude) ของการฉายเวกเตอร์ลงบนปริภูมิเวกเตอร์ คือค่าคะแนน (score) ซึ่งจะทำหน้าที่บ่งบอกถึงอิทธิพลของ component ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 แสดงการทำงานของ PCA

2.5.5 Partial Least Squares regression

Partial Least Squares regression (PLS) คือโมเดลสำหรับการทำนายค่าเป้าหมาย ที่มีการพัฒนามาจาก Principal component regression (PCR) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) แบบหนึ่ง โดยใน PLS จะเป็นโมเดลแบบ Supervised learning หรือเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอน กล่าวคือเป็นการทำให้ตัวโมเดลหาคำตอบหรือค่าเป้าหมายด้วยตัวโมเดลเองหลังจากผ่าการสอนหรือให้คำตอบหรือค่าเป้าหมายของชุดข้อมูลตัวอย่างไปแล้วระยะหนึ่ง แต่ใน PCR ที่ใช้หลักการ Principal Component Analysis (PCA) นั้นจะเป็นโมเดลแบบ Unsupervised learning หรือการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน กล่าวคือการให้ตัวโมเดลหาคำตอบเองโดยไม่ได้ป้อนค่าเป้าหมายของชุดข้อมูลตัวอย่างให้ โดยการใช้เทคนิค PCA นั้น มักจะใช้ Eigen equation เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นการหาค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) จากตัวแปรต้นของชุดข้อมูลเพียงตัวแปรต้นตัวแปรเดียว ในขณะที่เทคนิค PLS จะนำตัวแปรที่เป็นค่าเป้าหมายหรือตัวแปรตามมาเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาด้วย จึงทำให้การหาค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยวนั้น มีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปรจึงทำให้ค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ลดลงได้ยากขึ้นกว่าเทคนิค PCA ซึ่งเทคนิค PLS จะใช้ตัวแปรแฝง (Latent Variable) หรือส่วนประกอบ (component) สามารถคำนวณได้ดังสมการดังนี้

สมการความสัมพันธ์ภายนอก (outer relations)

$$X = TP' + E$$

$$Y = UQ' + F$$

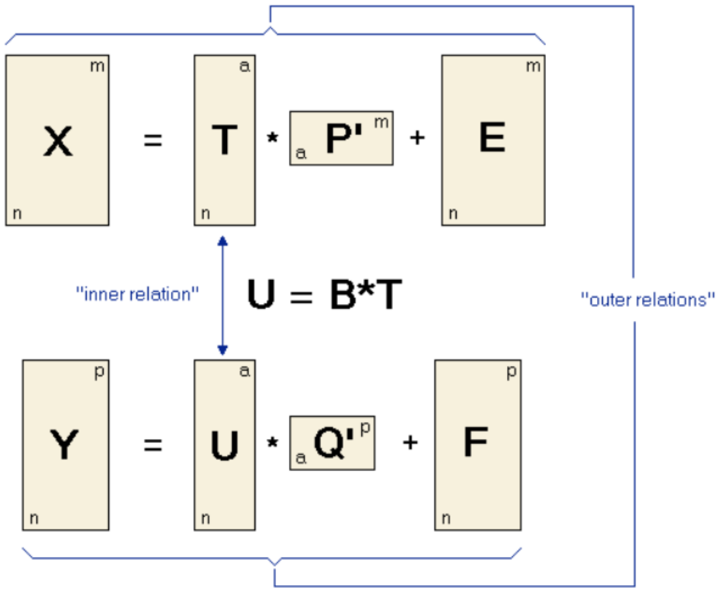
โดยที่

X	คือ	เมทริกซ์ขนาด n×m ของตัวแปรต้น
Y	คือ	เมทริกซ์ขนาด n×p ของตัวแปรตาม
P	คือ	เมทริกซ์ Loading ขนาด m×l ของ X
Q	คือ	เมทริกซ์ Loading ขนาด p×l ของ Y
T	คือ	เมทริกซ์ค่า score ขนาด n×l ของ X
U	คือ	เมทริกซ์ค่า score ขนาด n×l ของ Y
E และ F	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อน

หากมองจากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเป็นการใช้ PCA กับทั้งตัวแปรต้นและตัวแปรตาม แต่ใน PLS จะมีการหาค่าความสัมพันสัมพันธ์ระหว่างค่า Loading ของตัวแปรทั้งสองหรือเรียกว่าความสัมพันธ์ภายใน (inner relation) ดังสมการต่อไปนี้

สมการความสัมพันธ์ภายใน (inner relation)

$$U = BT$$



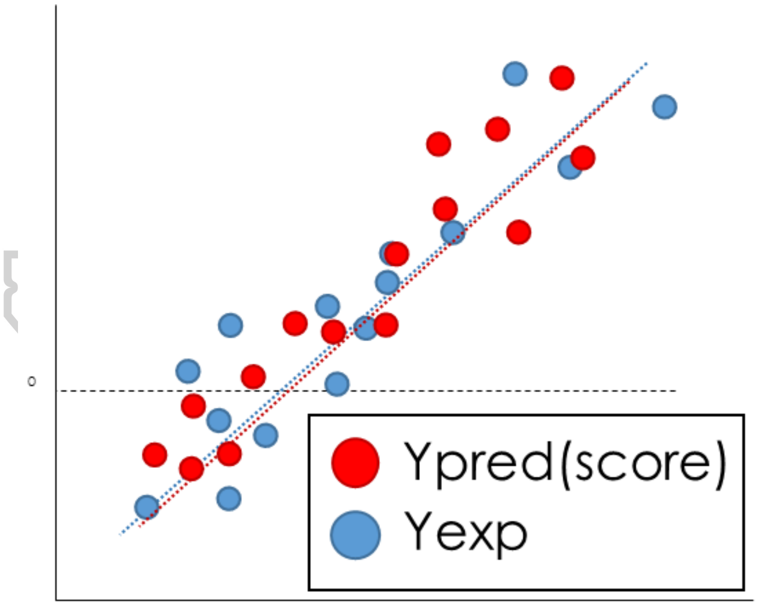
ภาพที่ 42 แผนภาพการหาความสัมพันธ์แบบเทคนิค PLS

เป้าหมายของ PLS คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสกอร์ของ X และ Y ให้เป็นสมการความสัมพันธ์ภายใน (inner relation) หรือใกล้เคียงมากที่สุด หากมีค่าตัวแปรตามเพียงค่าเดียวต่อ 1 ชุดข้อมูลค่าตัวแปรต้นอาจทำได้โดยการเปลี่ยนเมทริกซ์ของ Loading ของตัวแปรต้นไปเรื่อย ๆ จนค่าคะแนน (score) กับค่าตัวแปรตามหรือค่า Y มีความใกล้เคียงกับสมการเส้นตรงมากที่สุดดังภาพที่ 43 โดยอาจมีการบวกค่าคงที่ เพื่อให้ค่าที่ทำนายมีความใกล้เคียงค่าที่ได้จากการทดลองมากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์จะได้เมทริกซ์ Loading และค่าคงที่สำหรับการทำนายค่าตัวแปรตาม ดังสมการ

$$Y_{\text{ใหม่}} = X \cdot B + B_0$$

โดยที่

$Y_{\text{ใหม่}}$	คือ	เมทริกซ์ตัวแปรตามที่คำนวณจากเทคนิค PLS
X	คือ	เมทริกซ์ของชุดข้อมูลตัวแปรต้น
B	คือ	เมทริกซ์ Loading ของสมการความสัมพันธ์ภายใน
B_0	คือ	ค่าคงที่เมื่อตัวแปรต้นมีค่าเป็น 0



ภาพที่ 43 แสดงกราฟของค่าคะแนน (score) กับค่าตัวแปรตามที่ได้จากการทำการทดลอง ซึ่งสามารถนำตัวแปรตามที่ผ่านการทำนายมาหาประสิทธิภาพของเทคนิคได้ต่อไป

2.5.6 Error vector (EV)

Error หรือ residuals คือส่วนต่างของค่าตัวแปรตามหรือค่าเป้ามายระหว่างตัวแปรที่ได้จากการทดลองจริงกับตัวแปรตามหรือค่าเป้าหมายที่ทำนายโดยโมเดล PLS จากสมการ

$$EV = Y_{\text{ทดลอง}} - Y_{\text{ทำนาย}}$$

โดยที่

$Y_{\text{วัดจริง}}$ คือ ค่าตัวแปรตามที่ได้มาจากการทำการทดลอง

$Y_{\text{ทำนาย}}$ คือ ค่าตัวแปรตามที่โมเดลทำนาย

2.5.7 Relative Error (RE) และ Percent Error (PE)

Relative Error คือค่า EV ที่อยู่ในรูปของร้อยละ สามารคำนวณได้ตามสมการ

$$RE = \frac{EV}{Y_{\text{ทดลอง}}}$$

ในทำนองเดียวกันค่า Percent Error คือค่า EV ที่อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$PE = RE \times 100$$

2.5.8 Sum of Squared Error (SSE)

Sum of Squared Error คือความแปรปรวนภายในกลุ่มของข้อมูล กล่าวคือเป็นค่าความแปรปรวนระหว่างตัวแปรตามที่ได้จากการทดลองและตัวแปรตามที่ได้จากการคำนวณผ่านโมเดล สามารถเรียกอีกอย่างได้ว่า Sum Square within Group ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} EV_i^2$$

โดยที่ n คือ จำนวนตัวแปรตามทั้งหมด

2.5.9 Mean Absolute Error (MAE)

Mean Absolute Error คือเทคนิคในการมองความน่าเชื่อถือของโมเดล หาได้โดยการนำค่าสัมบูรณ์ (absolute) มาทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เป็นค่าบวก กล่าวคือการทำให้ค่า EV เป็นค่าสัมบูรณ์ก่อนนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |EV_i|$$

2.5.10 Total Sum of Squared (SST หรือ TSS)

Total Sum of Squared คือค่าความแปรปรวนของข้อมูลทุก ๆ กลุ่ม กล่าวคือค่าความแปรปรวนของข้อมูลกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SST = \sum_{i=1}^{n} (Y_{i,\text{ทดลอง}} - \bar{Y}_{\text{ทดลอง}})^2$$

โดยที่

$\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามทั้งหมด

2.5.11 Mean Square Error (MSE)

Mean Square Error คือเทคนิคหนึ่งที่ใช้สำหรับการมองความน่าเชื่อถือของโมเดล เช่นเดียวกับ MAE แต่จะมีความแตกต่างที่ MSE จะมีความว่องไว (sensitive) ต่อข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ๆ (ข้อมูลที่มีความเป็น outliner สูง) มากกว่า MAE สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} SSE$$

2.5.12 Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error คือเทคนิคการมองประสิทธิภาพของโมเดลที่มีความคล้ายคลึงกับ MSE โดยการใช้รากที่สองเข้ามาช่วย ทำให้ตีความได้ง่ายขึ้น โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} SSE}$$

2.5.13 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

Normalized Root Mean Square Error คือการ normalized เทคนิค RMSE ทำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยที่หาก NRMSE เข้าใกล้ 0 แสดงว่าการทำนายของโมเดลมีความแม่นยำสูงและและมีข้อมูลที่เป็น outliner น้อย ซึ่ง NRMSE สามารถคำนวณได้ผ่านสมการ

$$NRMSE = (Y_{ทดลอง,max} - Y_{ทดลอง,min})\left(\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} SSE}\right)$$

โดยที่

$Y_{ทดลอง,max}$ คือ ค่าตัวแปรตามมากสุดที่ได้จากการทดลอง

$Y_{ทดลอง,min}$ คือ ค่าตัวแปรตามน้อยสุดที่ได้จากการทดลอง

2.5.14 Root Mean Squared Relative Error (RMSRE)

Root Mean Squared Relative Error คืออีกหนึ่งเทคนิคในการมองประสิทธิภาพของโมเดล ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับข้อมูล ทำให้มีความว่องไวต่อ outliner มากกว่า MSE สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$\text{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} RE_i^2}$$

2.5.15 R-Squared (R^2)

R^2 คือค่าที่ใช้ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรตามทั้ง 2 คือตัวแปรตามที่ได้จากการทดลองและตัวแปรตามที่โมเดลทำนายไว้ โดยจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 หากยิ่งเข้าใกล้ 1 นั้นแสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันหรือมีความใกล้เคียงกันมาก สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

โดยค่า R^2 จะเป็นค่าที่เทคนิค PLS ใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า ซึ่งค่า R^2 จะมีมาตรฐานในการรับรองการนำไปใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงการแปลความหมายของค่า R^2

ค่า R^2	การแปลความหมาย
ถึง 0.25	ไม่ควรใช้ในการทำนาย
0.26-0.49	ความสัมพันธ์ไม่ดี ควรหาเหตุผล
0.50-0.64	ใช้ในการทำนายเพื่อการแบ่งระดับปริมาณอย่างหยาบๆ
0.66-0.81	ใช้ในการทำนายเพื่อแบ่งระดับปริมาณหรือประมาณค่าเบื้องต้น
0.83-0.90	ใช้ในการทำนายเพื่องานวิจัยและงานทั่วไป
0.92-0.96	ใช้ในการทำนายเพื่อการประกันคุณภาพ
0.98 ขึ้นไป	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกงาน

2.5.16 การปรับแต่งสเปกตรัม

เทคนิคการปรับแต่งสเปกตรัมนั้นมีอยู่หลายเทคนิคไม่ว่าจะเป็นการทำให้สเปกตรัมเรียบ (Smoothing) ด้วยเทคนิคของ S.Golay การทำปรับให้เป็นปกติ (Normalization) การปรับเลื่อนสเปกตรัมในแกน y (Baseline shift) การปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค SNV การปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค MSC การปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค First derivative และการปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิค Second derivative โดยจะมีการพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ในการเลือกใช้เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น ดังนี้

2.5.16.1 Savitzky–Golay Filter [24]

หากสเปกตรัมมีสัญญาณรบกวนมาก ควรจะพิจารณาการใช้เทคนิค Smoothing โดยเทคนิค S.Golay ซึ่งจะใช้หลักการการประมาณค่าแบบพหุนามเป็นช่วง ๆ และการหาค่าเฉลี่ยเป็นช่วงๆ โดยสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$g_i = \sum_{K=-K_L}^{K_R} c_K f_{i+K} \qquad ; i = \cdots, -2, -1, 0, 1, 2, \ldots$$

โดยที่

f_{i+K} คือ สัญญาณขาเข้า (input)

g_i คือ สัญญาณขาออก (output)

K_L คือ จำนวนข้อมูลก่อนหน้าชุดข้อมูล i (ฝั่งซ้าย)

K_R คือ จำนวนข้อมูลถัดจากชุดข้อมูล i (ฝั่งขวา)

c_K คือ สัมประสิทธิ์ของตัวกรอง

ซึ่งสัมประสิทธิ์ c_K จะเป็นการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุดของพหุนามลำดับที่ M ซึ่งอยู่ในรูป $a_0 + a_1 i + a_2 i + \cdots + a_M i^M$ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง S.Golay ได้ดังนี้

$$A \cdot a = f \, ; a = (a_0 a_1 a_2 \ldots a_M)^T$$

$$(A^T \cdot A) \cdot a = A^T \cdot f \qquad a = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot f)$$

เนื่องจากเป็นการประมาณค่าแบบน้อยที่สุด ทำให้ได้เป็นข้อมูลเชิงเส้น ทำให้สามารถแทนค่า f ได้ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector, e_K) ทำให้

$$c_K = \{(A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot e_K)\}_0 = \sum_{m=0}^{M} \{(A^T \cdot A)^{-1}\}_{0m} K^m$$

โดยที่

$$K = 2K_L + 1 \text{ หรือ } K = 2K_R + 1 \text{ (จำนวนคี่)}$$

$$A = K^m = \begin{bmatrix} 1 & -K_L & \cdots & (-K_L)^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & K_R & \cdots & K_R^M \end{bmatrix}$$

2.5.16.2 Normalization

หากมีการรบกวนเนื่องจากอิทธิพลของขนาดของชิ้นงานตัวอย่าง ควรพิจารณาการใช้วิธีการปรับให้เป็นปกติ (Normalization) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$X_{norm} = \frac{(X_{data} - X_{min})}{(X_{max} - X_{\min})}$$

โดยที่

X_{norm} คือ เมทริกซ์ข้อมูลขาออก (output)

X_{data} คือ เมทริกซ์ข้อมูลขาเข้า (input)

X_{min} คือ เมทริกซ์ข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุด

X_{max} คือ เมทริกซ์ข้อมูลที่มีค่ามากที่สุด

2.5.16.3 Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV)

หากข้อมูลมีอิทธิพลของการกระเจิงของแสง (Scattering) ทำให้ข้อมูลเกิดการเลื่อนตัวตามแกนความเข้มแสง (Intensity) และเกิดการหมุนทำให้ตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นสูงกว่ามีค่าเบี่ยงเบนของค่าความเข้มแสงมากกว่าตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า สามารถเลือกได้ 2 เทคนิคนั่น คือ Standard Normal Variate (SNV) และ Multiplicative Scatter Correction (MSC) โดยความต่างของ 2 เทคนิคดังกล่าวจะแตกต่างกันที่ MSC ต้องมีชุดข้อมูลที่เป็นชุดข้อมูลอ้างอิง ซึ่งการใช้เทคนิค MSC นั้น สามารถคำนวณได้โดย ให้ X_{mean} คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลทั้งหมด เมื่อนำมาเข้าสมการการถดถอย (Least square equation) และ X_i คือค่าของข้อมูลแต่ละข้อมูล จะได้

$$X_i \approx a_i + b_i X_{mean}$$

สามารถคำนวณชุดข้อมูลที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค MSC ได้จากสมการ ดังนี้

$$X_{i,msc} = \frac{(X_i - a_i)}{b_i}$$

ในขณะที่เทคนิค SNV จะสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$X_{i,SNV} = \frac{(X_i - \bar{X}_i)}{\sigma_i}$$

โดยที่

$\bar{X}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

σ_i คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลแต่ละข้อมูล

ทั้งนี้การปรับปรุงสเปกตรัมไม่ควรใช้หลายเทคนิค ในชุดข้อมูลชุดเดียว เนื่องจากจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มแสง (แกน Y) ของสเปกตรัม จึงควรพิจารณาจากสเปกตรัมดิบโดยรวมก่อน จึงตัดสินใจใช้เทคนิคต่าง ๆ

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความต้องการในการสร้างเครื่องวัดสีในระบบมาตรฐาน CIE L*a*b* โดยจะเป็นการวัดค่าแบบเส้น โดยบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการวัดค่า เครื่องมือทั้งหมด การสร้างเครื่องวัดสี ขั้นตอนการวิเคราะห์และการสร้างสมการสำหรับใช้ในการทำนาย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้วัดค่าสี

3.1.1 ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในการทำนาย

ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นพอลิเมอร์ Polyvinyl Chloride (PVC) มีด้วยกันทั้งหมด 4 สีได้แก่ สีขาว สีแดงอ่อน สีเขียวอ่อน และสีฟ้า ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression Molding) ให้มี 3 ระดับความหนาดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การขึ้นรูป PVC ด้วยเทคนิคการกดอัด

ชนิดพอลิเมอร์	ความหนา (เซนติเมตร)	ปริมาณ (กรัม)	อุณหภูมิการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส)	เวลาในการขึ้นรูป (นาที)			
				Heat	Venting	Compress	Cooling
PVC	1	70	220	4	2	2	3
	3	200					
	5	450					

จากนั้นจึงนำชิ้นงานพอลิเมอร์ดังกล่าวมาตัดให้มีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร

3.1.2 ตัวอย่างสีมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ใช้ในการวัดค่า CIE L*a*b* จะเป็นแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD) ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสีทาเรือ โดยมีจำนวน 79 แผ่น แผ่นละ 8 เฉดสี รวมเป็นสีทั้งหมด 632 เฉดสี (ภาคผนวก จ) การวัดสเปกตรัมจำเป็นต้องมีซองใส่ เนื่องจากแผ่นพื้นหลังเป็นสีขาว ซึ่งเป็นสิ่งรบกวนในการวัดสเปกตรัมของเครื่อง LineScan Color Meter จึงต้องมีการทำซองใส่ที่มีสีเดียวกับพื้นหลังของเครื่อง LineScan Color Meter

ภาพที่ 44 ซองใส่แผ่นสีมาตรฐานสำหรับนำไปวัดสเปกตรัม

3.1.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์สีที่มีขายอยู่ทั่วไป

โดยชิ้นงานพอลิเมอร์ดังกล่าวมีอยู่ทั้งหมด 14 เฉดสี ได้แก่ สีฟ้า สีฟ้าด้าน สีเหลือง สีเหลืองด้าน สีส้ม สีส้มด้าน สีเขียวอ่อนด้าน สีชมพู สีชมพูด้าน สีน้ำเงินด้าน สีม่วง สีม่วงด้าน สีขาว และสีขาวด้าน ซึ่งผ่านการตัดเป็นชิ้น ๆ เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร

3.2 การออกแบบเครื่อง LineScan Color Meter สำหรับสีในระบบมาตร CIE L*a*b*

3.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

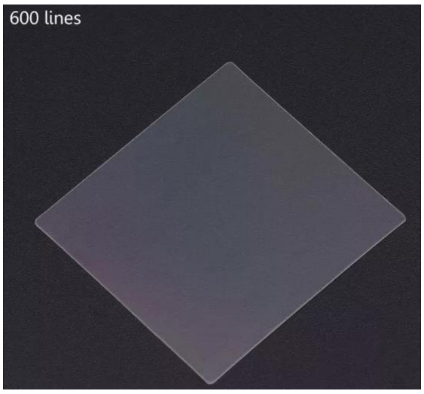
กำหนดประเภทและอุณหภูมิสีของแหล่งกำเนิดแสง แหล่งจ่ายไฟให้แหล่งกำเนิดแสง ตำแหน่งและองศาของการติดตั้ง โดยประกอบไปด้วยหลอด LED ขนาด 5 วัตต์ มีอุณหภูมิแสงเท่ากับ 6500K เรียงกันบนแผ่นวงจรขนาด 30 เซนติเมตร จำนวน 12 หลอด

3.2.2 ระบบเลนส์

ใช้ระบบเลนส์เป็นแบบ 2 เลนส์ โดยเลนส์หน้าวัตถุตัวแรกจะเป็นเลนส์นูนสองข้างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร และมีระยะโฟกัสเท่ากับ 5 เซนติเมตร ส่วนเลนส์ตัวที่สองเป็นเลนส์นูนข้างเดียว ระยะโฟกัสมีค่าประมาณ 14.28 เซนติเมตรหรือมีค่า diopter เท่ากับ 7 และตัวเลนส์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 5 เซนติเมตร เช่นเดียวกับเลนส์ตัวแรก

3.2.3 ขนาดกับชนิดของเกรตติง

เกรตติงในระบบนี้จะเป็นเกรตติงแบบส่องผ่าน โดยเป็นแผ่นเกรตติง PET ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 36×38 มิลลิเมตร และเป็นเกรตติงที่มีขนาด 600 เส้นต่อมิลลิเมตร ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 เกรตติงแบบส่องผ่านที่ใช้ในงานวิจัย

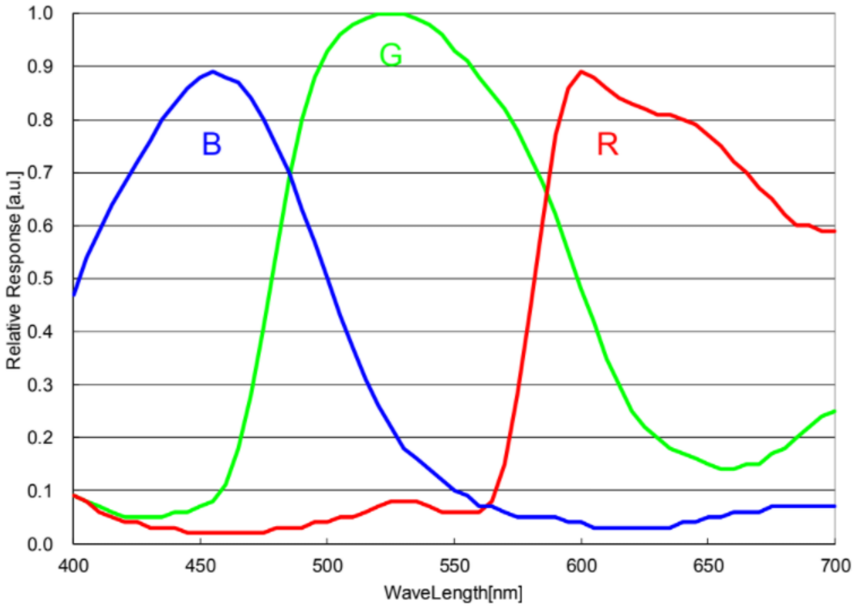
3.2.4 อุปกรณ์รับภาพ

สำหรับระบบกล้องจะใช้ Raspberry Pi 4b ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์ที่มีลักษณะเป็น single-board กล่าวคือเป็นแผ่นบอร์ดที่มีการติดตั้ง CPU, RAM, GPU และช่องสำหรับเชื่อต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ (port) ไม่ว่าจะเป็น multimedia port, USB ports, wireless หรือ wired connectivity, Camera interface, microSD card slot และ General Purpose Input/Output Pins โดย Raspberry Pi 4b ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นรุ่นที่มี RAM เป็นแบบ LPDDR4 ขนาด 4 GB และทำการติดตั้งระบบปฏิบัติการ Debian ซึ่งเป็นหนึ่งในระบบปฏิบัติการของ Linux ที่มีไว้ติดตั้งให้กับ Raspberry Pi เนื่องจากระบบปฏิบัติการดังกล่าวค่อนข้างเหมาะกับการใช้งานในงานวิจัยนี้ เพราะค่อนข้างมีฟังก์ชันที่เหมาะสม มีขนาดเล็ก และการประมวลผลที่ค่อนข้างเร็ว จึงเหมาะกับการใช้งานร่วมกับ Raspberry Pi

Ref: https://th.element14.com/productimages/large/en_GB/3051885-40.jpg

ภาพที่ 46 ไมโครคอมพิวเตอร์ Raspberry Pi 4b

ในส่วนของตัวกล้องในงานวิจัยนี้เป็นกล้องรุ่น Raspberry Pi High Quality Camera Module ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 12.3 Megapixels จำนวนพิกเซลทั้งหมดอยู่ที่ 4056*3040 ใช้เซนเซอร์เป็น Sony IMX477 ซึ่งเป็นเซนเซอร์แบบ CMOS และตัวเซนเซอร์ยังมีการเคลือบฟิล์มที่มีหน้าที่ในการตัดแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เป็น IR ออก ซึ่งจะมีความว่องไว (sensitivity) ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ความว่องไว (sensitivity) ในแต่ละความยาวคลื่นของเซนเซอร์

ในส่วนของเลนส์ที่ใช้กับเซนเซอร์จะเป็นเลนส์ขนาด 6-60 mm 1/3" ซึ่งได้ผ่านการปรับโฟกัสและปรับระยะเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 48 โมดูลกล้อง Raspberry Pi High Quality Camera Module

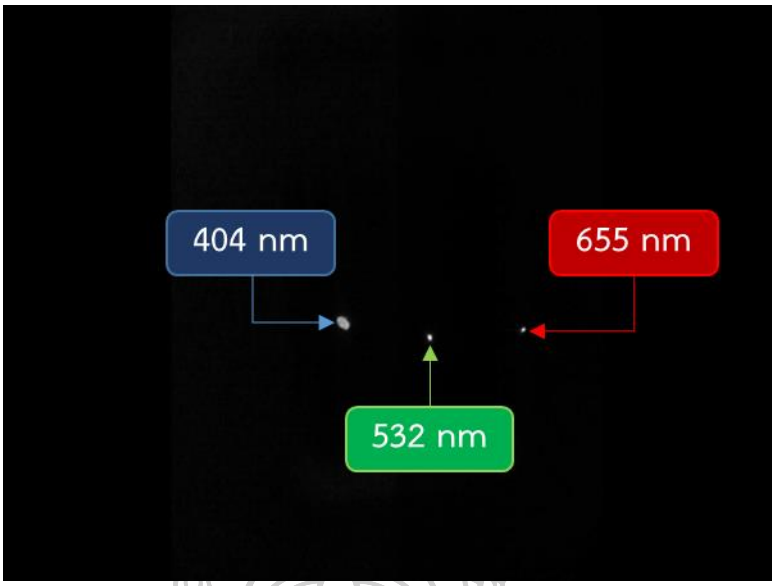
ซึ่งวิธีการทำ Raspberry Pi และ โมดูลกล้อง Raspberry Pi High Quality Camera ให้เป็นกล้องวงจรปิดไร้สาย (IP Camera) โดยตัว Raspberry Pi จะใช้ระบบปฏิบัติการ Debian ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการของ Raspberry Pi โดยเฉพาะ ก่อนจะทำการติดตั้งโมดูล Motion package จากนั้นจึงทำการตั้งค่าดังภาพที่ 49 ทำให้ตัวโมดูลกล้องสามารถจับภาพแล้วนำภาพดังกล่าวเข้าไปอยู่ในระบบ LAN (Local Area Network)

```
# Start in daemon (background) mode and release terminal (default: off)
daemon on

# Image width (pixels). Valid range: Camera dependent, default: 320
width 640

# Image height (pixels). Valid range: Camera dependent, default: 240
height 480
############################################################
# Live Stream Server
############################################################

# The mini-http server listens to this port for requests (default: 0 = disabled)
stream_port 8081

# 50% scaled down substream (default: 0 = disabled)
# substream_port 8082

# Quality of the jpeg (in percent) images produced (default: 50)
stream_quality 100

# Output frames at 1 fps when no motion is detected and increase to the
# rate given by stream_maxrate when motion is detected (default: off)
stream_motion off

# Maximum framerate for stream streams (default: 1)
stream_maxrate 100

# Restrict stream connections to localhost only (default: on)
stream_localhost off
```

ภาพที่ 49 แสดงการตั้งค่า Motion package ของ Raspberry Pi

3.2.5 การปรับเทียบเครื่องวัด

สเปกตรัมที่ได้มาจากเครื่อง LineScan Color Meter นั้น จะเป็นสเปกตรัมที่อยู่ในรูปความเข้มแสงกับค่าพิกเซล จึงจำเป็นต้องมีการทำการเทียบมาตรฐาน เพื่อให้ทราบความยาวคลื่นที่แน่นอนของพิกเซลนั้น ๆ โดยการนำเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียว ซึ่งทราบความยาวคลื่นแล้ว นำมาวัดค่าสเปกตรัมโดย Multispectrometer โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เลเซอร์ทั้งหมด 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 404 นาโนเมตร (สีม่วง) 532 นาโนเมตร (สีเขียว) และ 655 นาโนเมตร (สีแดง) ตามลำดับ พร้อมทั้งวัดค่าสเปกตรัมของเลเซอร์ดังกล่าวด้วยเครื่อง LineScan Color Meter



ภาพที่ 50 ภาพถ่ายเลเซอร์โดยเครื่อง LineScan Color Meter

จากนั้นจึงนำมาหาค่าความยาวคลื่นของแต่ละพิกเซลของเครื่อง LineScan Color Meter เนื่องจากลักษณะแสงที่แทรกสอดออกมาจากเกรตติงในแต่ละความยาวคลื่นจะมีมุมที่ออกมาต่างกัน ทำให้ภาพที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งของแต่ละความยาวคลื่นต่อตำแหน่งพิกเซลไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามสมการแบบ Power law จึงได้สมการดังนี้

$$Wavelength\ (nm) = \beta x^{n_l} + W_{mean}$$

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$Pixel\ number > x_{center}\ , x = |Pixel\ number - x_{center}|$$

$$Pixel\ number < x_{center}\ , x = -|Pixel\ number - x_{center}|$$

ซึ่งวิธีการคำนวณนั้นจะใช้ฟังก์ชัน Solver ของโปรแกรม Excel ในการคำนวณ โดยจะนำค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่วัดจากเครื่อง Multispectrometer กับความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่วัดจาก LineScan Color Meter เป็น Set Objective ให้มีค่าน้อยที่สุด และค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้คือ ค่า β, ค่า n_l, ค่า x_{center} และค่า W_{mean} โดยเมื่อผ่านการทำ Solver

3.2.6 การใช้เครื่องมือวัดมาตรฐานในการปรับเทียบเครื่องมือวัดสเปกตรัมที่สร้างขึ้น

การปรับตำแหน่งความยาวคลื่นของระบบรับภาพและปรับตำแหน่งของภาพ โดยใช้เครื่อง Multispectrometer เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการปรับเทียบความยาวคลื่น

3.3 การสร้างสมการการทำนายค่า CIE L*a*b*

3.3.1 การเก็บค่า CIE L*a*b* และสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors เพื่อนำมาสร้างสมการการทำนาย

ทำการวัดค่า CIE L*a*b* และสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors โดยเครื่อง ColourFlex EZ พร้อมทั้งวัดค่าสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors โดยเครื่อง LineScan Color Meter

3.3.2 หาความสัมพันธ์ของสเปกตรัมและค่า CIE L*a*b* ของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors

หาความสัมพันธ์โดยใช้เทคนิค PLS ระหว่างค่าสเปกตรัมและค่า CIE L*a*b* ของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของเครื่องมือมาตรฐานหรือเครื่อง ColourFlex EZ โดยหาความสัมพันธ์ผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB

3.3.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors จากเครื่อง LineScan Color Meter กับค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง ColourFlex EZ

หาความสัมพันธ์โดยใช้เทคนิค PLS ระหว่างสเปกตรัมที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter กับค่า CIE L*a*b* ของเครื่องมือมาตรฐานหรือเครื่อง ColourFlex EZ ผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งจะได้ค่าเมทริกซ์ของ loading และค่า B_0 สำหรับใช้ในการสร้างสมการการทำนาย

3.3.4 นำสมการการทำนายไปแทนค่าในซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้น

โดยนำเมทริกซ์ของสเปกตรัมที่วัดค่าโดยเครื่อง LineScan Color Meter คูณกับเมทริกซ์ loading ที่ได้มาจากการทำ PLS ของหัวข้อที่ 3.3.3 และบวกกับ B_0 ที่ได้มาจากหัวข้อเดียวกัน

3.3.5 วัดค่า CIE L*a*b* ด้วยเครื่อง LineScan Color Meter

วัดค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง LineScan Color Meter ที่ผ่านการใส่สมการทำนายตามหัวข้อที่ 3.3.4

3.4 ทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือที่ออกแบบ

หาคุณภาพหรือความแม่นยำของสมการทำนาย โดยหาค่า R^2 ระหว่างค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่อง LineScan Color Meter และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่างที่วัดด้วยเครื่อง ColourFlex EZ

3.4.1 ทดสอบการวัดค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่าง PVC และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการวัดค่าของเครื่อง LineScan Color Meter

โดยการเปรียบเทียบค่า R^2 ของชิ้นงานตัวอย่าง PVC ที่มีความแตกต่างกันของลักษณะทางกายภาพ

3.4.1.1 ผลของความหยาบของชิ้นงานพลาสติก

โดยใช้เครื่อง LineScan Color Meter ทำการวัดค่า CIE L*a*b* และค่าสเปกตรัม ของชิ้นงานตัวอย่าง PVC ที่มีความหยาบของผิวชิ้นงานต่างกันในตำแหน่งเดียวกัน โดยการนำกระดาษทรายไปขัดถูผิวของชิ้นงานตัวอย่าง PVC ซึ่งกระดาษทรายจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ กระดาษทรายเบอร์ 0 และกระดาษทรายเบอร์ 10 โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ขัดถูด้วยกระดาษทรายเบอร์ 0 จะตั้งชื่อว่า Roughness I และชิ้นงานตัวอย่างที่ขัดถูด้วยกระดาษทรายเบอร์ 10 จะตั้งชื่อว่า Roughness II ซึ่ง Roughness I จะมีความหยาบของผิวมากกว่า Roughness II ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับค่า CIE L*a*b* ที่วัดค่าโดยเครื่องมือ ColourFlex EZ ในรูปของค่า R^2

3.4.1.2 ผลของความหนาของชิ้นงานพลาสติก

โดยใช้เครื่อง LineScan Color Meter ทำการวัดค่า CIE L*a*b* และค่าสเปกตรัม ของชิ้นงานตัวอย่าง PVC ที่มีความหนาของชิ้นงานต่างกันในตำแหน่งเดียวกัน ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับค่า CIE L*a*b* ที่วัดค่าโดยเครื่องมือ ColourFlex EZ ในรูปของค่า R^2

3.4.2 ทดสอบการวัดค่า CIE L*a*b* ของตัวอย่างพอลิเมอร์สีที่มีขายอยู่ทั่วไปของเครื่อง LineScan Color Meter

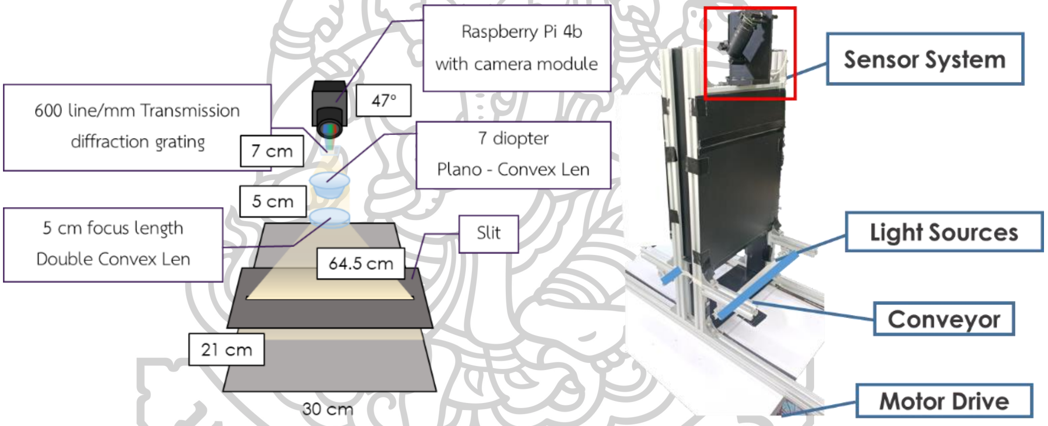
โดยใช้เครื่อง LineScan Color Meter ทำการวัดค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานตัวอย่างพอลิเมอร์สีที่มีขายอยู่ทั่วไป ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับค่า CIE L*a*b* ที่วัดค่าโดยเครื่องมือ ColourFlex EZ ในรูปของค่า R^2

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของเครื่องวัดค่า CIE L*a*b แบบ LineScan Color Meter

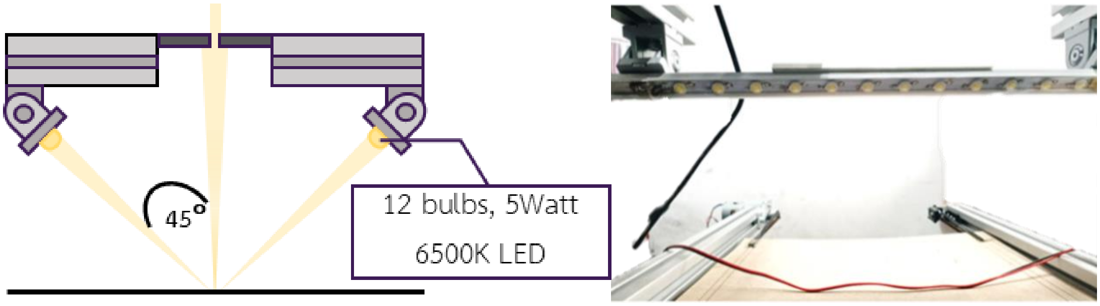
4.1.1 โครงของเครื่อง LineScan Color Meter และแหล่งกำเนิดแสง

เครื่อง LineScan Color Meter จะติดตั้งโดยเริ่มจากความกว้างในการวัดค่าอยู่ที่ 30 เซนติเมตร โดยโครงเครื่องส่วนใหญ่จะใช้อลูมิเนียมโปรไฟล์ประกอบกัน โดยใช้อลูมิเนียมที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 30×30 มิลลิเมตร ถัดจากพื้นหลังจะเป็นสลิตขนาด 300×3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันแสงส่วนเกิน ซึ่งเป็นเหตุที่จะทำให้สเปกตรัมที่ได้ปนกัน โดยสลิตกับพื้นวางชิ้นงานตัวอย่างจะมีระยะห่างเท่ากับ 21 เซนติเมตร ดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 เครื่องวัดค่า CIE L*a*b* แบบ LineScan Color Meter

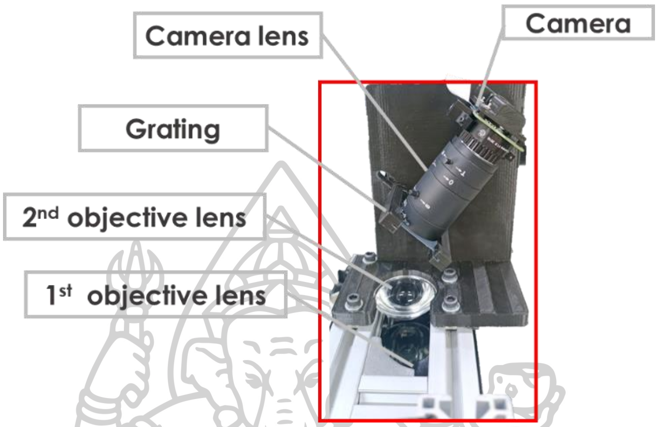
ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงห่างจากพื้นวางตัวอย่าง 9 เซนติเมตร และทำมุม 45 องศากับตำแหน่งตัวอย่าง ดังภาพที่ 52 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของ Commission International del’Eclairage



ภาพที่ 52 แหล่งกำเนิดแสงของเครื่องวัดค่า CIE L*a*b* แบบ LineScan Color Meter

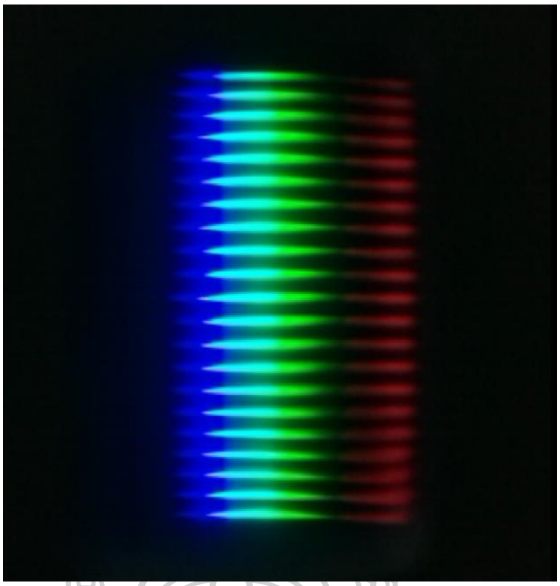
4.1.2 ระบบเลนส์และเกรตติง

เริ่มจากติดตั้งเลนส์ตัวแรกให้มีระยะห่างจากสลิต 43.5 เซนติเมตร ส่วนเลนส์ตัวที่สองจะมีระยะห่างจากเลนส์ตัวแรกเท่ากับ 5 เซนติเมตร (จากกลางเลนส์ตัวแรกถึงหลังเลนส์ตัวที่สอง) โดยหันด้านนูนไปทางสลิตดังภาพที่ 51



ภาพที่ 53 ระบบเลนส์ เกรตติง และกล้องของเครื่อง

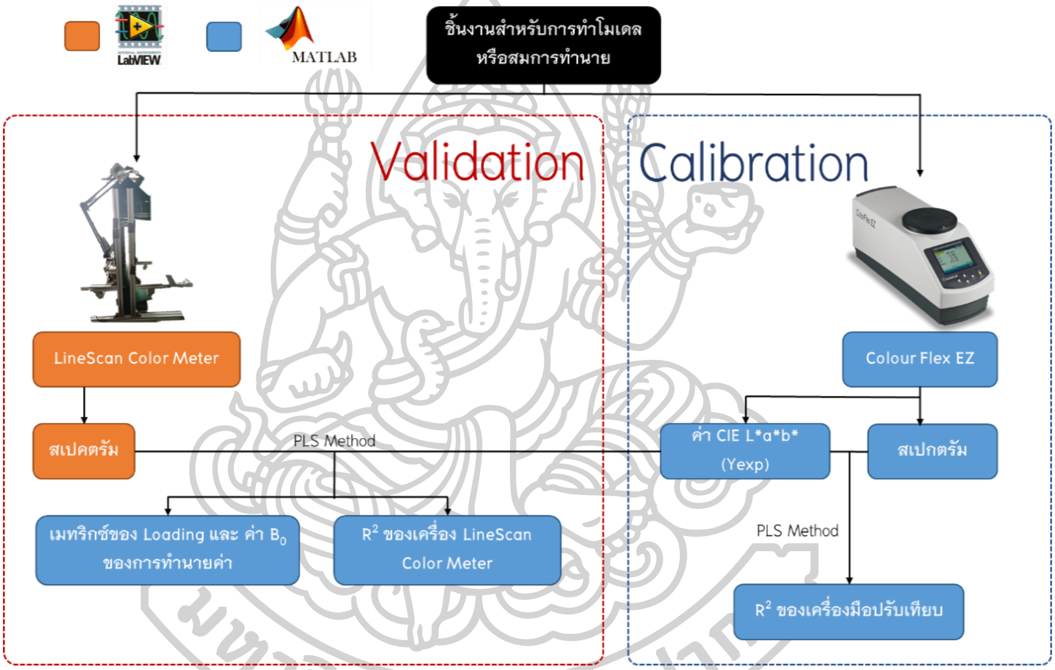
เหตุที่ต้องใช้เลนส์นูนด้านเดียวเพื่อลดปรากฏการณ์ Barrel distortion ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้ภาพของแถบสีที่ปรากฏบนเซนเซอร์คลาดเคลื่อน ทำให้ยากต่อการปรับเทียบความยาวคลื่น โดยหากเกิดปรากฏการณ์ข้างต้นจะทำให้ภาพแถบสีที่ปรากฏอยู่เลื่อมกันเป็นลักษณะของเส้นโค้ง จึงทำให้ภาพชิ้นงานที่ปรากฏไปปรากฏอยู่บริเวณขอบทั้งสองข้างของฐานวางชิ้นงาน ในส่วนของเกรตติง เกรตติงจะทำมุม 47 องศากับพื้นระนาบและกล้องทำมุม 17 องศากับพื้นระนาบ โดยภาพที่ผ่านการปรับตำแหน่งแล้ว เมื่อทำการถ่ายภาพสเปกตรัมของหลอด LED ที่เป็นการผสมไดโอดแสง 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จะปรากฏดังภาพที่ 54 จะเห็นได้ว่าภาพที่ปรากฏค่อนข้างตรงและสมมาตร กล่าวคือมีขนาดค่อนข้างเท่ากันในแถบสีที่เป็นสีเดียวกัน



ภาพที่ 54 ภาพถ่ายสเปกตรัมของหลอด LED จากไฟ LED แบบเส้น

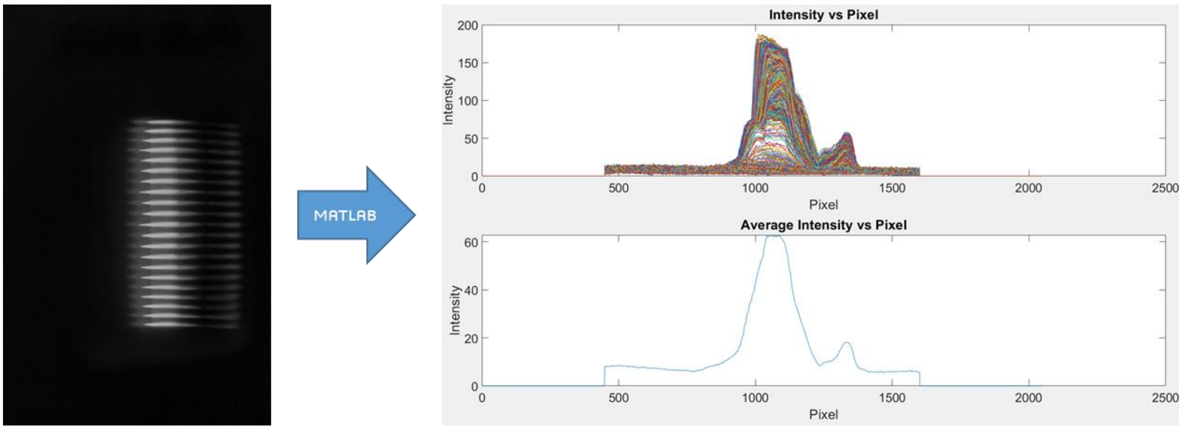
4.1.3 ซอฟต์แวร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์หลัก ๆ อยู่ทั้งหมด 2 ซอฟต์แวร์ ได้แก่ MATLAB และ Labview โดย MATLAB จะมีการเขียนขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่ 2 หน้าที่คือ การหาสเปกตรัมจากพิกเซล และหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมและค่า CIE L*a*b การปรับปรุงสเปกตรัม รวมถึงการสร้างสมการการทำนายค่า ส่วน Labview นั้นจะทำหน้าที่เป็นโปรแกรมวัดค่า CIE L*a*b* จากชิ้นงานโดยตรง ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการจับภาพสเปกตรัมของชิ้นงานตัวอย่าง แล้วนำไปเข้าสมการทำนายที่หาได้จากโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยซอฟต์แวร์ MATLAB



ภาพที่ 55 แผนภาพการใช้ซอฟต์แวร์

ขั้นแรกหลังจากได้ภาพพิกเซลแล้ว จะนำภาพดังกล่าวไปเข้า MATLAB ที่เขียนขึ้นให้แปลงค่าความเข้มของแสงในแต่ละพิกเซลให้เป็นตัวเลข ซึ่งจะได้ค่าของความเข้มแสงแต่ละพิกเซลออกมาเป็นไฟล์สกุล Comma Separated Value (.csv) เหตุที่ทำการเขียนให้ออกมาเป็นไฟล์สกุลดังกล่าวเพราะไฟล์ที่ได้จะมีขนาดเล็ก สามารถเปิดได้หลายโปรแกรมไม่ว่าจะเป็น Notepad Text Editor และ Microsoft Excel ก่อนจะนำไปแปลงค่าพิกเซลเป็นค่าความยาวคลื่นต่อไปในขั้นตอนการเทียบมาตรฐาน



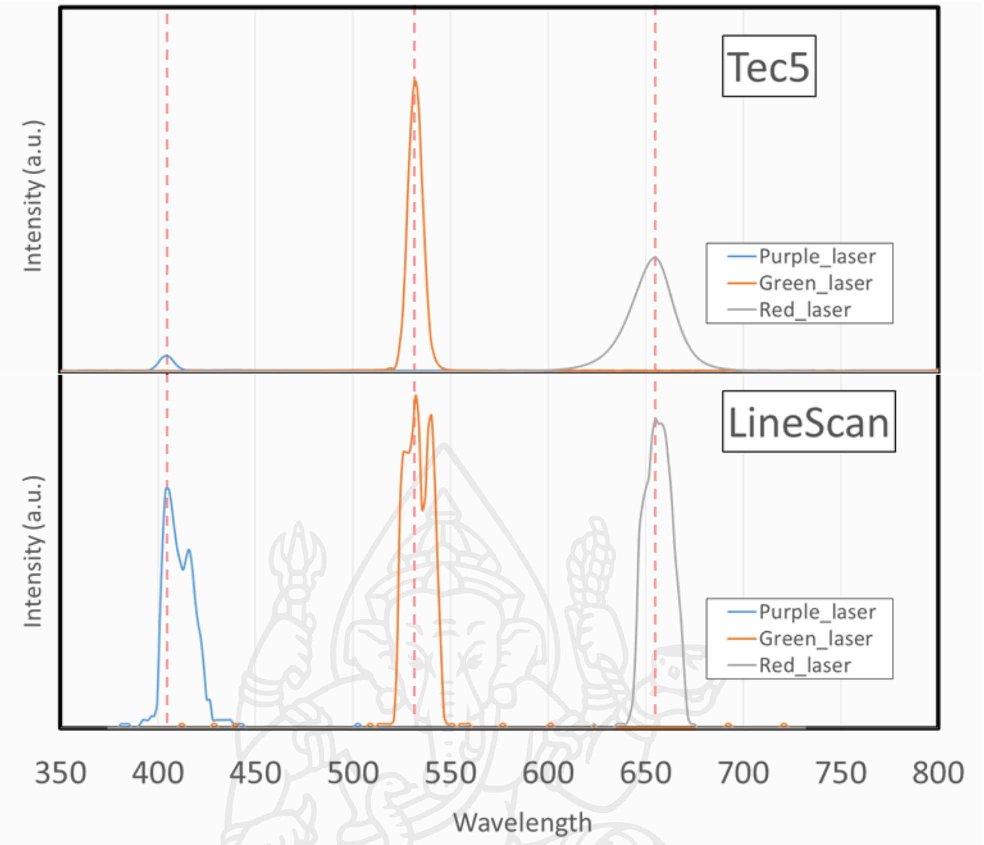
ภาพที่ 56 การแปลงรูปภาพเป็นค่าความเข้มแสงของแต่ละพิกเซล

4.2 การเทียบมาตรฐาน

ทำการปรับเทียบโดยวิธีตามแบบในหัวข้อที่ 3.2.5 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ในแต่ละเครื่องและพารามิเตอร์ต่าง ๆ หลังผ่านการใช้ Solver

Laser	Tec5	LineScan	SqrtError	ค่าพารามิเตอร์ในสมการ Power law			
				beta	n_l	Xcenter	Wmean
Blue	404	432.99	0.023	1.199613	1.052689	0	374.4153
Green	532	532.15					
Red	655	654.98					

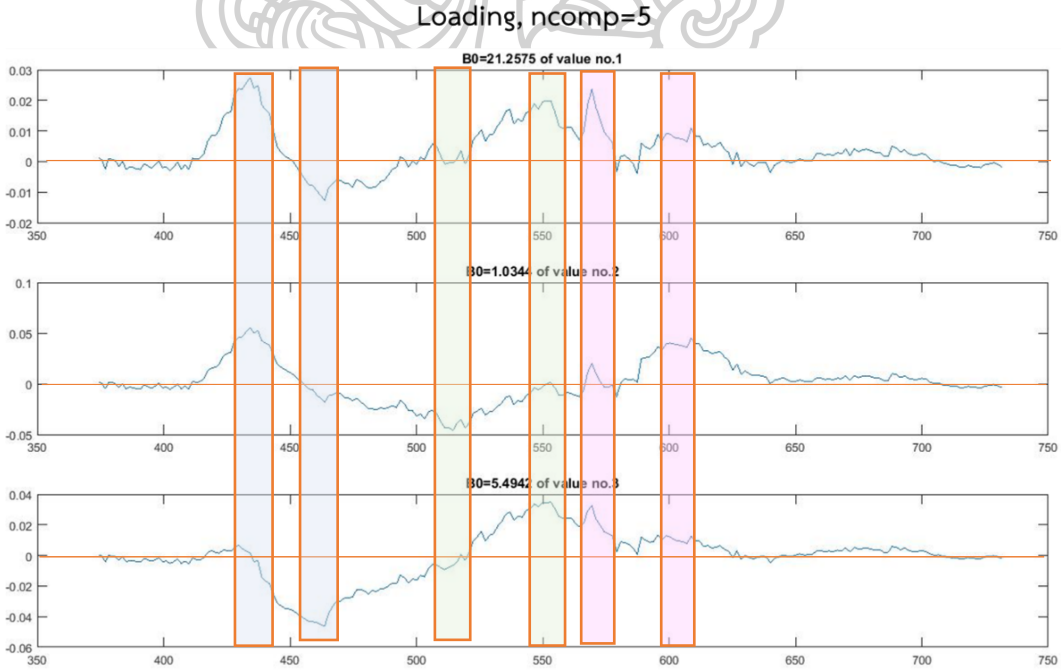


ภาพที่ 57 กราฟแสดงค่าความยาวคลื่นของเครื่องมือทั้งสองที่ผ่านฟังก์ชัน Solver

จากภาพที่ 57 จะเห็นว่าค่าความยาวคลื่นจากเลเซอร์ทั้ง 3 ชนิด ระหว่างเครื่อง Multispectrometer และ LineScan Color Meter มีค่าใกล้เคียงกันทำให้สามารถนำชุดค่าความยาวคลื่นไปแทนในเลขพิกเซลของเครื่อง LineScan Color Meter ได้ ซึ่งมีความละเอียดเฉลี่ยเท่ากับ 1.5954 นาโนเมตรต่อพิกเซล โดยเริ่มพิกเซลแรกที่ 374.4153 นาโนเมตร และพิกเซลสุดท้ายที่ 731.7878 นาโนเมตร

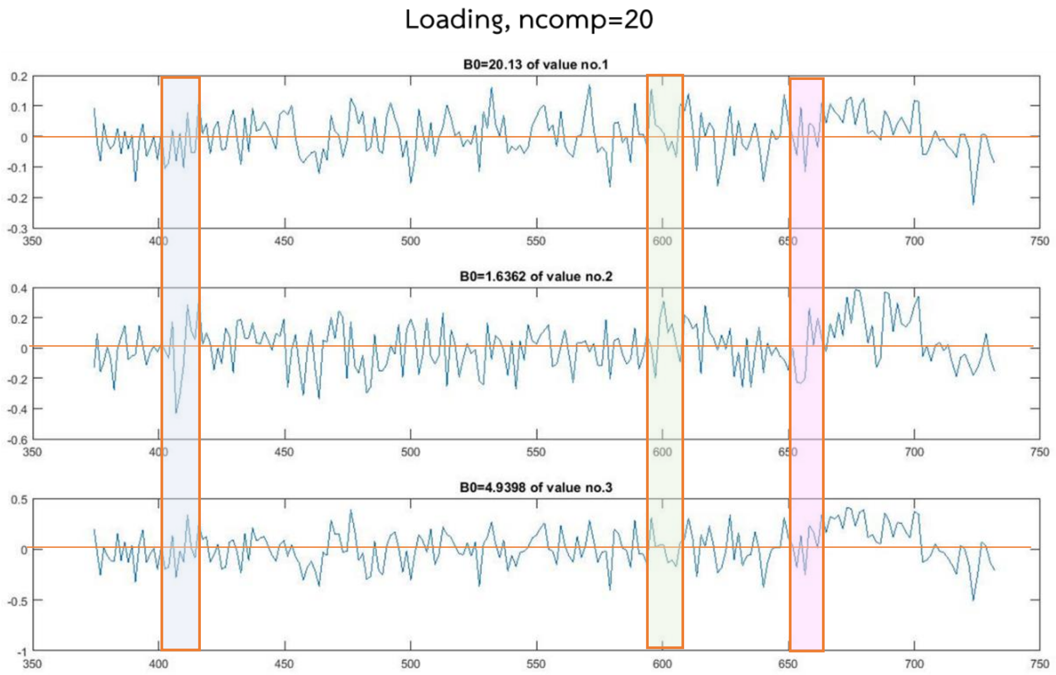
4.3 การสร้างสมการการทำนายของเครื่อง LineScan Color Meter

การสร้างสมการทำนายโดยใช้เทคนิค Partial Least Squares regression (PLS) กับแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors โดยให้ค่าเป้าหมายเป็นค่า CIE L*a*b และค่าตัวแปรต้นเป็นค่าสเปกตรัม ทำให้ได้ค่า Loading ออกมาในรูปของเมทริกซ์ขนาด 1 คูณกับจำนวนของจุดทั้งหมดใน 1 เส้นสเปกตรัม และ B_0 คือค่าเริ่มต้นเมื่อตัวแปรต้นมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากข้อจำกัดในการวัดที่มีฐานวางชิ้นงานเป็นสีดำทำให้เครื่อง LineScan Color Meter ไม่สามารถวัดสเปกตรัมจากชิ้นงานที่มีสีดำได้ เนื่องจากสเปกตรัมกลืนไปกับพื้นหลัง ทำให้ต้องตัดเฉดสีดำที่มีความใกล้เคียงกับพื้นหลังออกทั้งหมด 7 สี ซึ่งสเปกตรัมที่เครื่อง LineScan Color Meter สามารถวัดค่าได้นั้น จะไม่ผ่านการปรับปรุงสเปกตรัมหรือการฟิลเตอร์ออก เนื่องจากการใช้การปรับปรุงสเปกตรัมโดยเทคนิค Normalization, SNV และ MSC ไม่มีค่าต่างกันมากนักกับการใช้สเปกตรัมดิบ อีกทั้งการปรับปรุงสเปกตรัมจะไปรบกวนความแม่นยำของค่า L* เนื่องจากเทคนิคต่าง ๆ ทำการปรับความเข้มของเส้นสเปกตรัมให้อยู่ในช่วงเส้นฐาน(Baseline) เดียวกัน ส่วนการใช้ฟิลเตอร์ S.Golay จะส่งผลทำให้ค่า R^2 มีค่าลดลงเล็กน้อย ดังนั้นจึงเลือกใช้สเปกตรัมดิบในการคำนวณ เพราะในแง่ของความเร็วในการประมวลผลของโปรแกรมที่เขียนขึ้นจะเร็วกว่าการใช้เทคนิคการปรับปรุงและฟิลเตอร์



ภาพที่ 58 แสดงค่า Loading ที่ได้จากเทคนิค Partial Least Squares regression (PLS) โดยให้อัลกอริทึมมี ncomp เท่ากับ 5

จากภาพที่ 58 เป็นกราฟแสดงค่า Loading โดยให้จำนวนค่า PC score สำหรับให้อัลกอริทึมเลือกใช้ 5 ค่าพบว่า ค่า Loading ของค่า L* จะให้ความสำคัญเป็นบวกที่ประมาณช่วงความยาวคลื่น 420-450 นาโนเมตร 500-570 นาโนเมตร และ 590-630 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของสีปฐมภูมิของแสงคือ สีน้ำเงิน สีเขียว และสีส้มแดง ตามลำดับ เหตุที่ให้ความสำคัญที่ค่าความยาวคลื่นในช่วงสีส้มแดงมากกว่าสีแดงเป็นเพราะเซนเซอร์ของกล้องใช้ในงานวิจัยนี้ มีความว่องไวต่อค่าความยาวคลื่นที่ประมาณ 610 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 47 ซึ่งตามนิยามเมื่อรวมสีปฐมภูมิของแสงจะได้เป็นสีขาวดังแสดงในภาพที่ 2 ก.) หรือตามแหล่งกำเนิดแสงของเครื่องที่มีอุณหภูมิสี 6500 K สอดคล้องกับค่า L* ที่เป็นค่าความสว่างหรือความเป็นสีขาวของสี ในส่วนของ Loading ของค่า a* จะให้ความสำคัญเป็นค่าบวกที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 410-460 นาโนเมตร และ 580-640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของสีน้ำเงินกับสีส้มแดงตามลำดับ เนื่องจากค่า a* จะให้ค่าบวกกับเฉดสีแดง จึงทำให้ความยาวคลื่นของแสงที่เป็นสีแดงสามารถทำให้ค่า a* เป็นบวกได้ สำหรับค่าความสำคัญของ Loading ของค่า a* ที่เป็นบวกในช่วงความยาวคลื่นที่เป็นแสงสีน้ำเงินนั้น เป็นเพราะแสงสีน้ำเงินผสมกับแสงสีแดงจะให้แสงที่เป็นแสงสีบานเย็น (สีชมพูอมม่วง) ซึ่งอยู่ในเฉดสีแดง ในส่วนของการให้ความสำคัญเป็นค่าลบนั้นจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 460-550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของแสงสีเขียวเป็นไปตามนิยามของค่า a* ที่จะเป็นลบในเฉดสีเขียว และ Loading ของค่า b* จะให้ความสำคัญเป็นค่าบวกที่ค่าความยาวคลื่นประมาณช่วงความยาวคลื่น 520-630 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่ให้สีเขียวอมเหลืองจนไปถึงสีส้มตามลำดับ เนื่องจากค่า b* จะเป็นค่าบวกที่เฉดสีเหลืองทำให้ให้สีเขียวอมเหลืองจนถึงสีส้มมีค่าเป็นบวก ในส่วนของค่าลบนั้นจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 430-520 นาโนเมตรหรือแสงสีน้ำเงินจนถึงสีฟ้าบนสีเขียว ซึ่งเป็นไปตามนิยามของค่า b* ที่มีค่าเป็นลบกับเฉดสีน้ำเงิน เพื่อความละเอียดในการทำนายค่าที่มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีการเพิ่มจำนวนค่า PC score (ncomp) ให้เป็น 20 ค่า



ภาพที่ 59 แสดงค่า Loading และค่า B_0 ที่ได้จากเทคนิค Partial Least Squares regression (PLS)

จากภาพที่ 59 จะเป็นการคำนวณหาสมการโดยตั้งค่าให้อัลกอริทึมจำกัดจำนวน PC score 20 ค่า ทำให้เมทริกซ์ค่า Loading ที่ได้ อย่างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-415 นาโนเมตร 595-610 นาโนเมตร และ 650-665 นาโนเมตรที่ได้ไฮไลท์ไว้ในภาพที่ 59 จะมีการให้ความสำคัญที่ถี่และความละเอียดที่สูงมาก ทำให้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ยาก เพื่อที่จะสามารถแยกเฉดสีที่มีความใกล้เคียงกันสูงได้ ซึ่งค่า Loading และค่า B_0 จะถูกนำมาแทนค่าในโปรแกรมที่เขียนขึ้นผ่านซอฟต์แวร์ Labview ตามสมการดังต่อไปนี้

$$[Y_{L*,a*,b*}]_{3\times n} = [L_1 \quad L_2 \quad \cdots \quad L_n]^T_{3\times n} \times [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]_{m\times n} + [B_0]_{3\times 1}$$

โดยที่

$Y_{L*,a*,b*}$	คือ	ค่า L*, a* หรือ b*
$[L_1\ L_2\ \ldots\ L_n]^t$	คือ	เมทริกซ์ของ Loading ของค่า L*, a* หรือ b* ที่ผ่านการทรานสโพส
$[x_1\ x_2\ \ldots\ x_n]$	คือ	ค่าสเปกตรัมที่วัดได้
$[B_0]$	คือ	ค่าคงที่ของแต่ละ Loading

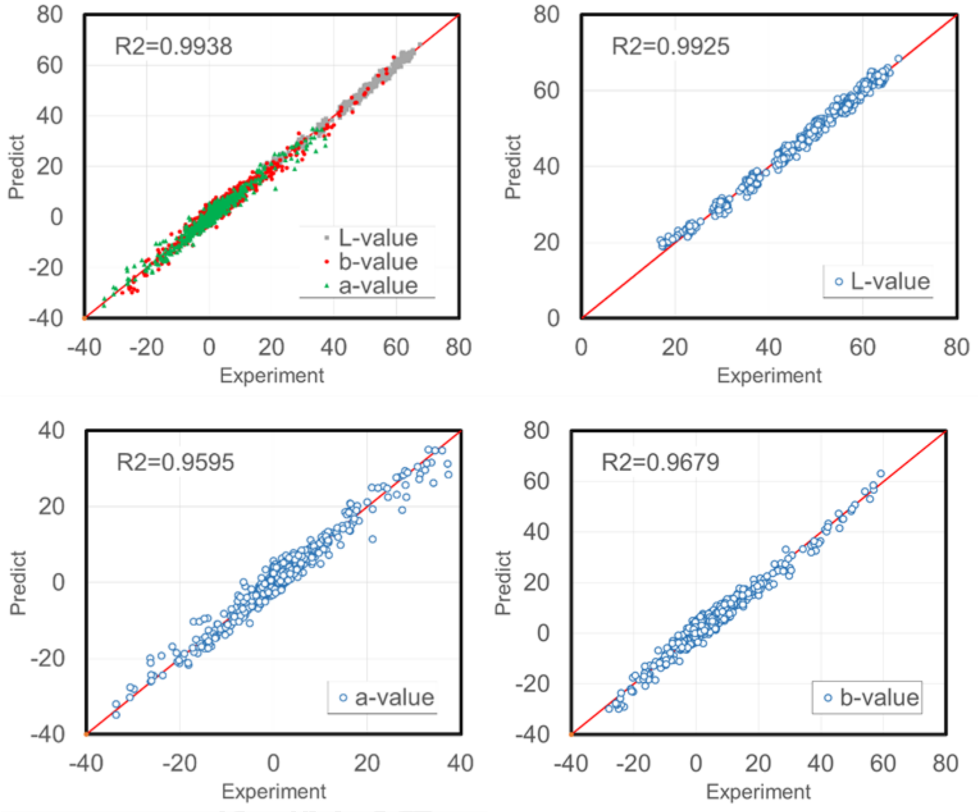
โดยค่า Loading ที่ใช้เป็นค่าที่ได้มาจากการใช้เทคนิค PLS ระหว่างค่า CIE L*a*b* ของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ กับค่าสเปกตรัมที่วัดโดย

เครื่อง LineScan Color Meter จากนั้นทำการหาประสิทธิภาพของการใช้เทคนิค PLS โดยผลการคำนวณจะเป็นไปดังตารางที่ 9 และการหาค่า R^2 ระหว่างค่า CIE L*a*b* ที่ทำนายโดยเทคนิค PLS และค่า CIE L*a*b* จากเครื่อง ColourFlex EZ โดย R^2 ที่คำนวณได้มีค่ามากถึง 0.9938 อีกทั้งค่า L* a* และ b* ทุกค่ายังมีค่า R^2 มากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ในการใช้สำหรับการทำนายค่าในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 9 ค่าที่ได้จากการคำนวณประสิทธิภาพของสมการการทำนายของแผ่นสีมาตรฐาน

2017 Standard Paint Colors	
Residual of Sum of Square (RSS)	6267.9871
Standard Error of Estimated or Root mean square error (RMSE)	1.8284
Mean Absolute Error (MAE)	1.3842
Normalized Root mean square error (NRMSE)	0.0181
Root mean squared relative error (RMSRE)	14.5273
R-squared (R^2)	0.99378

มหาวิทยาลัยศิลปากร

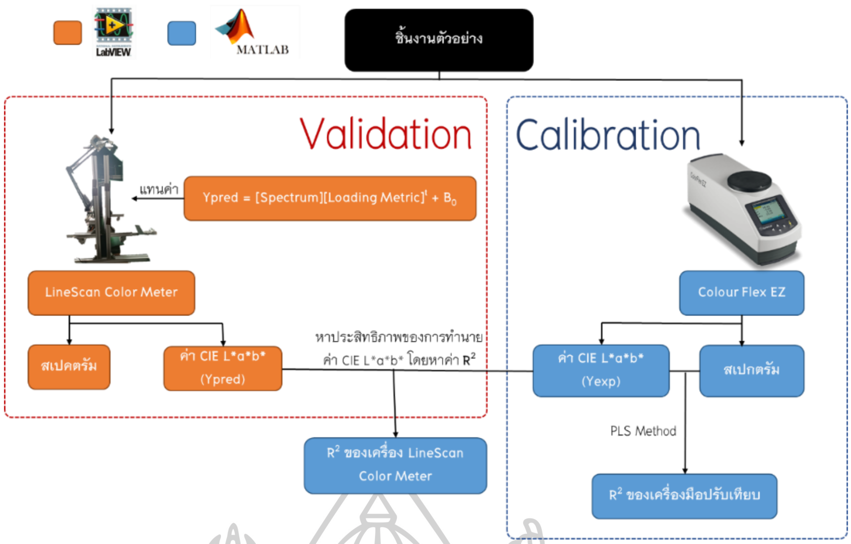


ภาพที่ 60 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ที่วัดโดย ColourFlex EZ (Calibration) และค่าที่ทำนายด้วยเทคนิค PLS (Validation) และค่าที่ทำนายด้วยเทคนิค PLS (Validation) แบบแยกค่า L* a* และ b*

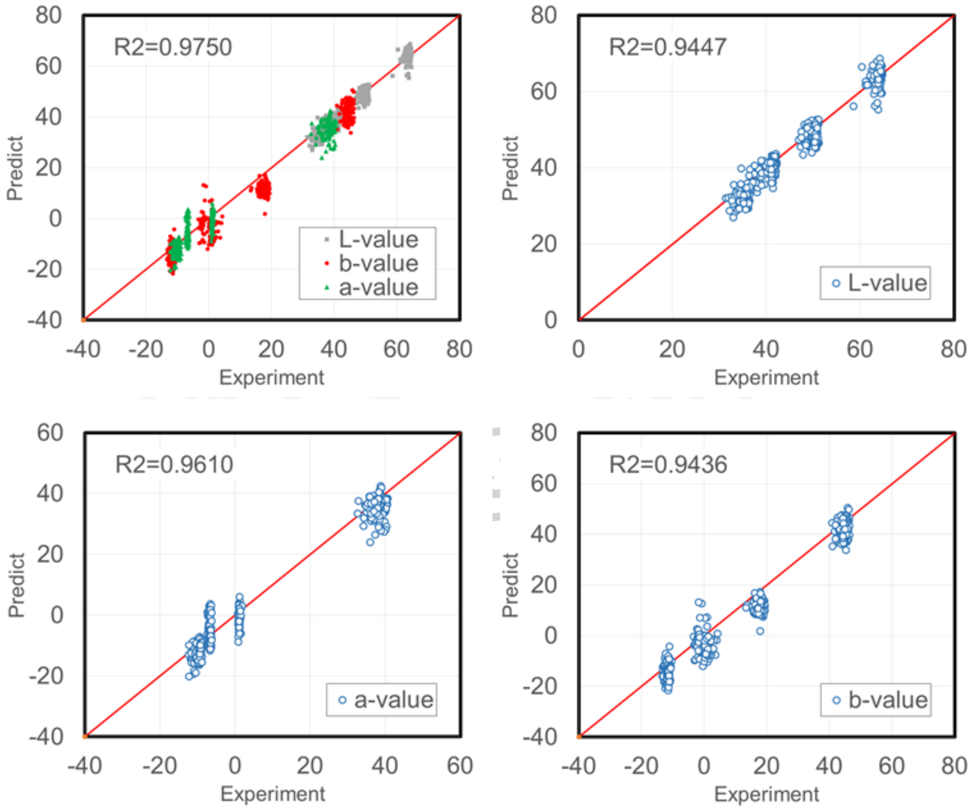
4.4 ผลการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter

4.4.1 ผลของการทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC

หลังจากการนำสมการมาใส่ในโปรแกรมที่เขียนขึ้นผ่าน Labview เพื่อทำนายค่าสีในแต่ละพิกเซลแล้วดึงค่าออกมาเป็นไฟล์ CSV ก่อนนำไปเข้าโปรแกรมที่เขียนผ่าน MATLAB เพื่อตัดพีคนำมาเป็นค่า CIE L*a*b* ของแต่ละชิ้นงาน ก่อนนำค่า CIE L*a*b* ดังกล่าวไปหาค่า R^2 เพื่อทดสอบความแม่นยำในการทำนายค่าของเครื่อง LineScan Color Meter ดังภาพที่ 61

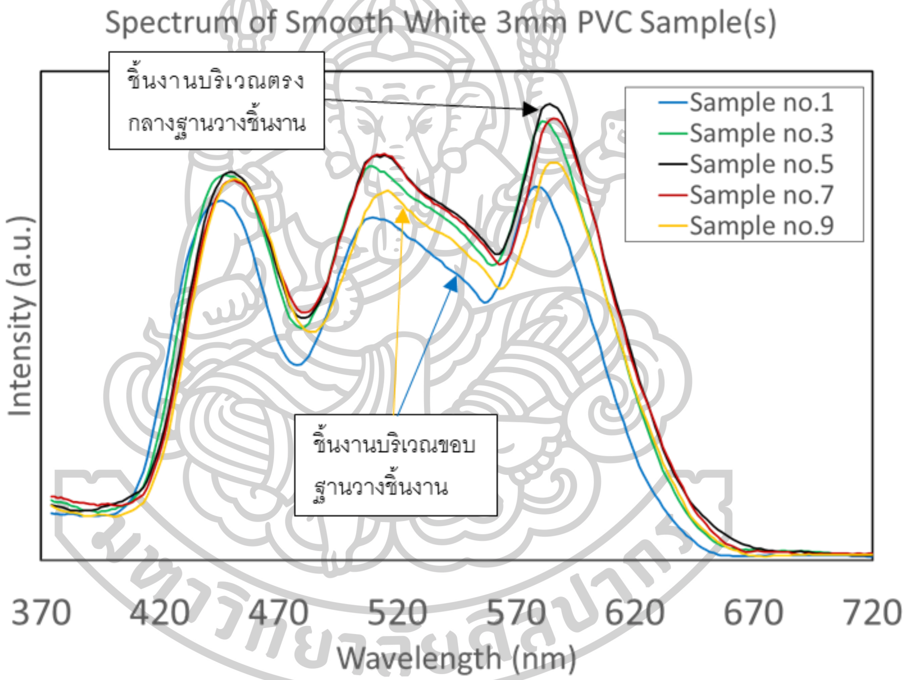


ภาพที่ 61 แผนภาพการทำนายค่า CIE L*a*b* และหาประสิทธิภาพของสมการการทำนายโดยผลของการทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่ผ่านการขึ้นรูปเอง



ภาพที่ 62 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) กับค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

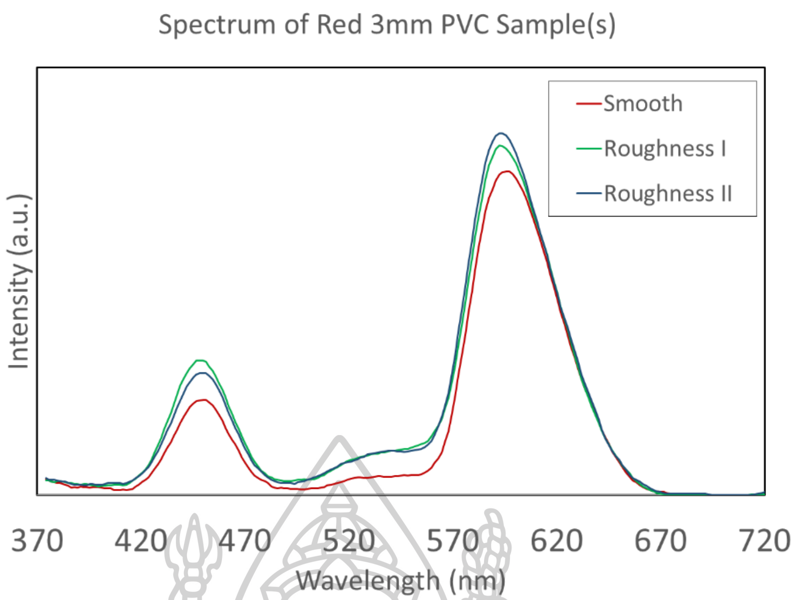
จากภาพที่ 62 พบว่าผลความแม่นยำในการทำนายค่าหรือค่า R^2 ที่ค่อนข้างสูง แต่หากพิจารณาแบบแยกค่า L*, a* และ b* พบว่ายังมีค่าคลาดเคลื่อนออกจากเส้นแนวโน้มอยู่ กล่าวคือค่าที่ได้จากการทำนายโดยเครื่อง LineScan Color Meter จะมีค่าที่ต่างจากค่าที่วัดได้จากเครื่อง ColourFlex EZ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับชิ้นงานที่มีตำแหน่งอยู่บริเวณด้านข้างของฐานวางชิ้นงาน เนื่องมาจากแสงของแหล่งกำเนิดแสงบริเวณดังกล่าวจะอ่อนกว่าบริเวณตรงกลางของฐานวางชิ้นงานทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความเข้มที่อ่อนกว่าดังภาพที่ 63 ทำให้เป็นปัจจัยหนึ่งของความคลาดเคลื่อนของการวัดค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter



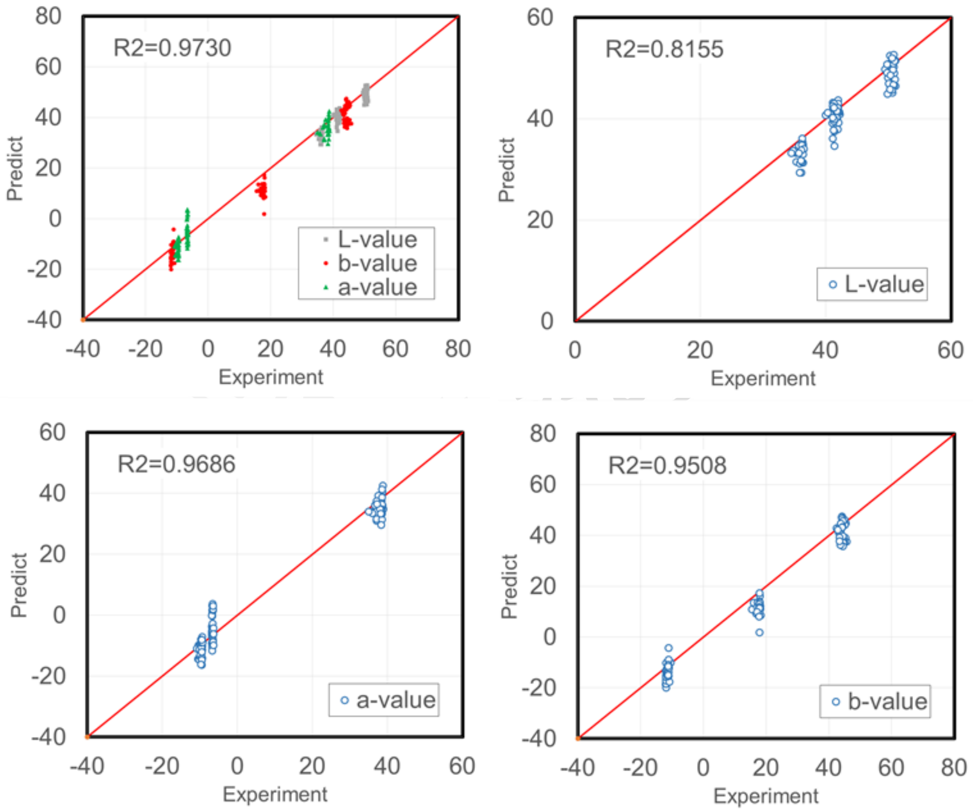
ภาพที่ 63 ตำแหน่งของชิ้นงานที่มีผลต่อสเปกตรัมที่วัดด้วยเครื่อง LineScan Color Meter

4.4.2 ผลของความหยาบของผิวชิ้นงานต่อการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter

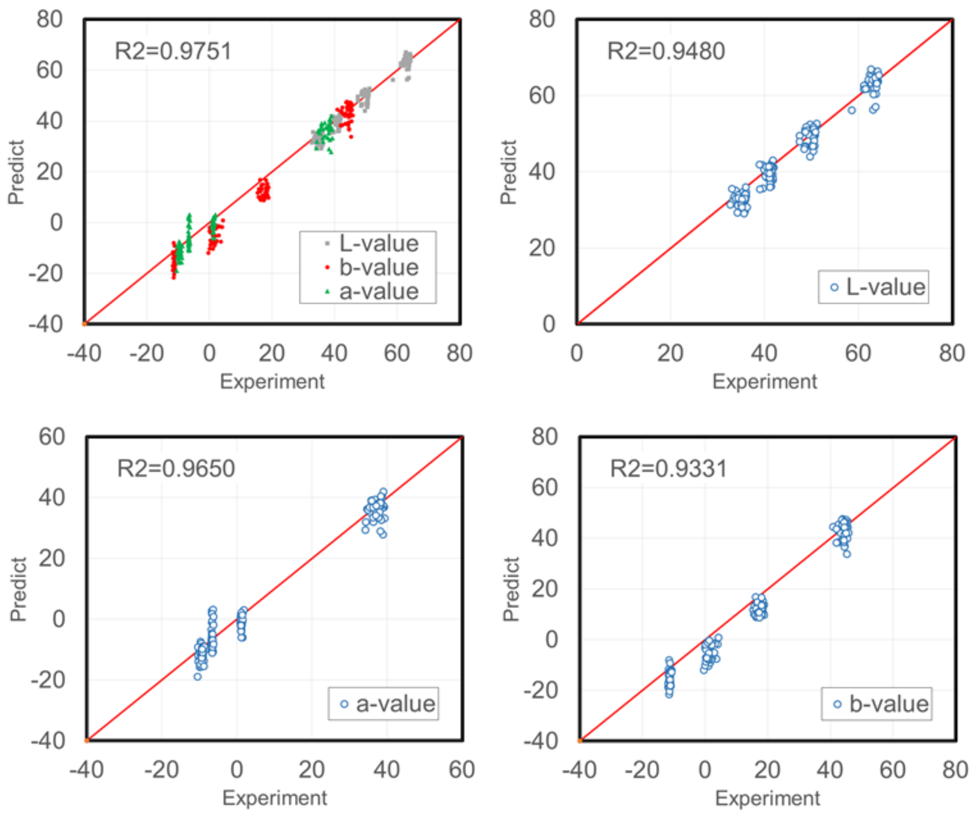
การทดสอบผลกระทบของความเรียบของผิวชิ้นงานตัวอย่าง PVC เมื่อใช้การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมดังภาพที่ 64 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างของสเปกตรัมของชิ้นงานที่มีความเรียบของผิวชิ้นงานต่างกัน โดยแบ่งออกเป็นชิ้นงานที่ผิวเรียบ (Smooth หรือ Non-Roughness) ชิ้นงานผิวหยาบระดับที่ 1 (Roughness I) และชิ้นงานผิวหยาบระดับที่ 2 (Roughness II) ลักษณะของสเปกตรัมทั้ง 3 แบบ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่ชิ้นงานที่ถูกขัดผิวด้วยกระดาษทรายจะมีค่าความ



ภาพที่ 64 สเปกตรัมของชิ้นงานพลาสติก PVC สีแดงความหนา 3 มิลลิเมตร ที่มีความเรียบของผิวชิ้นงานต่างกัน วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter



ภาพที่ 65 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีผิวหยอบระดับที่ 1 ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

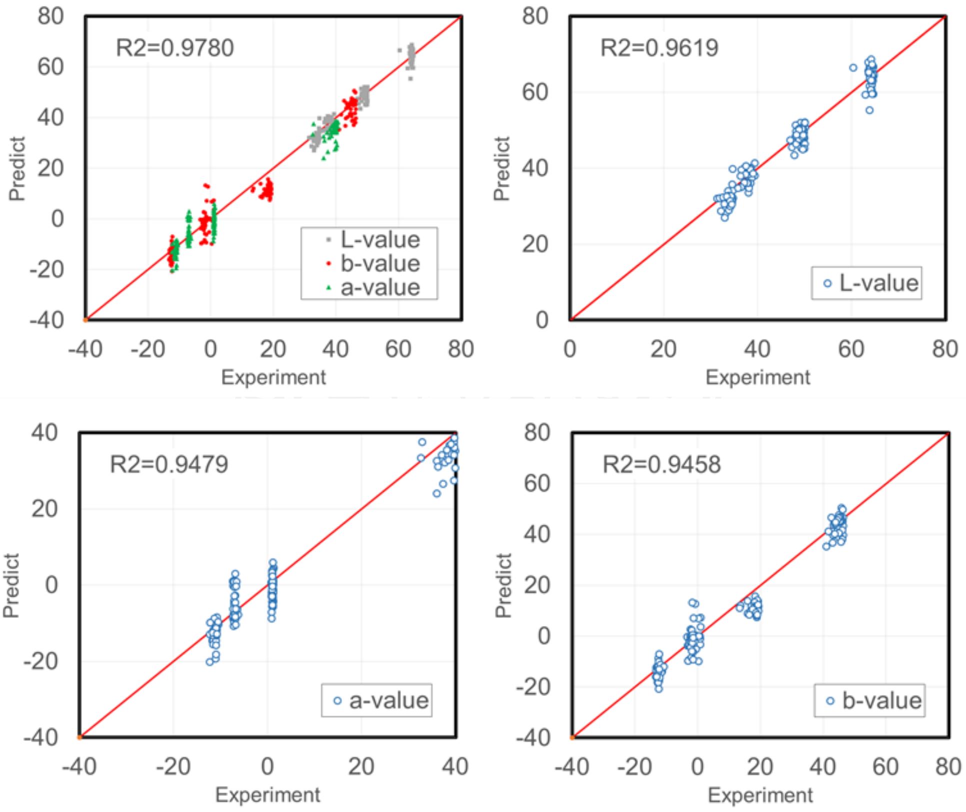


ภาพที่ 66 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีความหยาบระดับ 2 ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

เข้มของสเปกตรัมที่มากกว่าชิ้นงานตัวอย่างที่มีผิวเรียบ เนื่องจากการขัดถูผิวชิ้นงานตัวอย่างด้วยกระดาษทรายทำให้มุมตกกระทบของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไป ทำให้เกิดการกระเจิงของแสง ส่งผลให้ค่า L* a* และค่า b* มีค่าเปลี่ยนแปลง

และหากใช้การแยกชุดข้อมูลตามความเรียบของผิวชิ้นงานมาหาค่า R^2 ผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB จะได้ค่า R^2 ของชิ้นงานพลาสติก PVC ในแต่ละความหยาบของผิวชิ้นงาน โดยค่า R^2 ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีผิวเรียบมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9760 ดังแสดงในภาพที่ 67 ชิ้นงานที่มีผิวหยาบระดับที่ 1 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9730 ดังแสดงในภาพที่ 65 และชิ้นงานที่มีผิวหยาบระดับ 2 ค่า R^2 เท่ากับ 0.9751 ดังแสดงในภาพที่ 66 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วจะส่งผลต่อการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบลงบนชิ้นงาน ส่งผลต่อสเปกตรัมโดยเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวน แต่หากพิจารณาโดยใช้ค่า R^2 พบว่าผิวชิ้นงานแต่ละแบบมีค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นชิ้นงานตัวอย่างที่มีความขรุขระระดับที่ 1 ซึ่งมีค่า R^2 ของค่า L* น้อยกว่าชิ้นงานแบบอื่นอยู่ที่ 0.8155 เนื่องจากผิวของชิ้นงานตัวอย่างชนิด

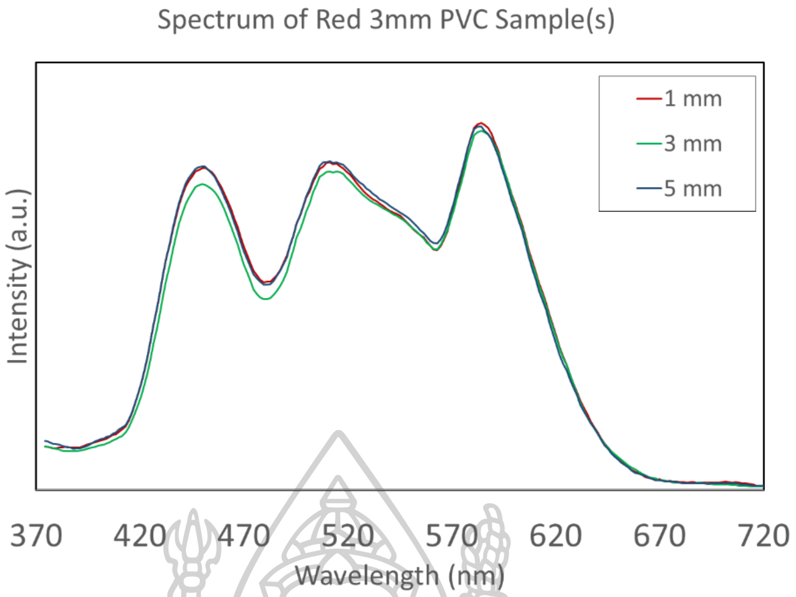
ดังกล่าว มีความขรุขระที่มากกว่าชิ้นงานชนิดอื่น ทำให้การกระเจิงของแสงเปลี่ยนทิศทางของแสงไปในทิศทางอื่นมากกว่าชิ้นงานชนิดอื่น ทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนที่เข้าสู่เซนเซอร์เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ค่า L* ของการทำนายมีค่าน้อยกว่าค่า L* ที่วัดด้วยเครื่อง ColourFlex EZ ซึ่งเป็นการวัดแบบระบบปิด ดังแสดงในภาพที่ 65



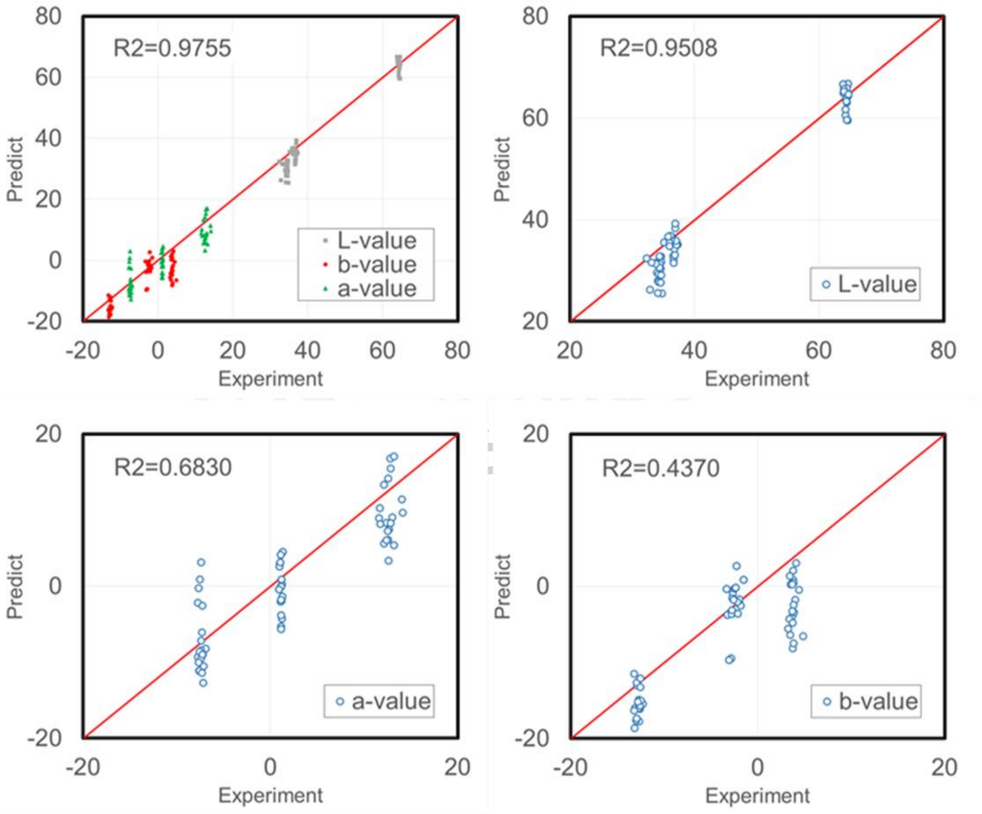
ภาพที่ 67 แสดงค่าแสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีผิวเรียบ ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

4.4.3 ผลของความหนาของชิ้นงานต่อการทำนายค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter

การทดสอบผลกระทบของความหนาของชิ้นงาน PVC เมื่อใช้การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม ดังภาพที่ 68 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างของสเปกตรัมของชิ้นงานที่มีความหนาต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 1 3 และ 5 มิลลิเมตร จากลักษณะของสเปกตรัมทั้ง 3 แบบ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันในด้านของความเข้มของสเปกตรัม ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับค่า L* ทำให้ชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร มีค่า L* มากกว่าชิ้นงานที่หนา 3 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่มีความหนา



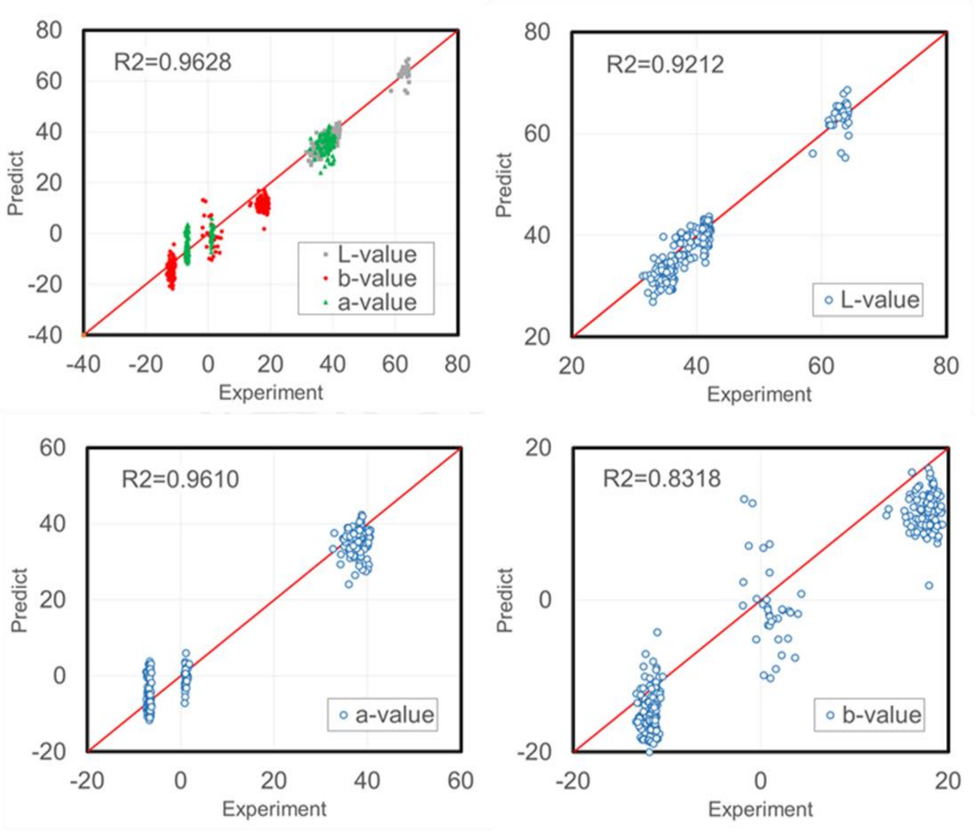
ภาพที่ 68 สเปกตรัมของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนาของชิ้นงานต่างกัน วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter



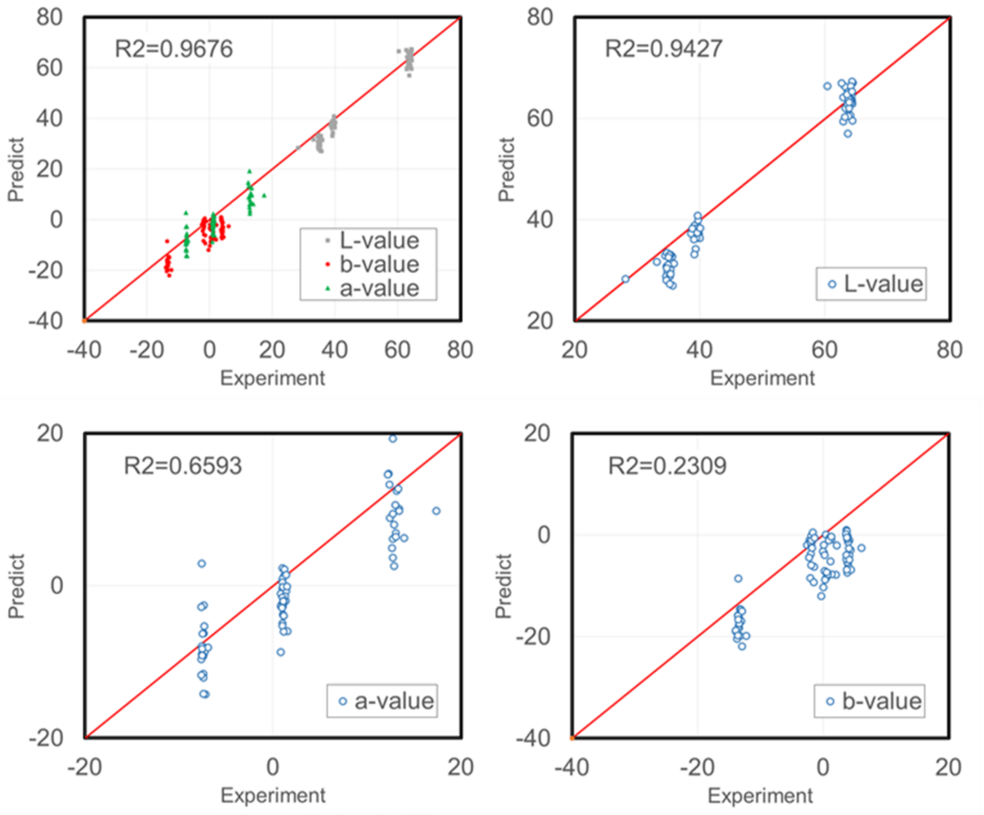
ภาพที่ 69 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

3 มิลลิเมตรมีความใกล้เคียงกับแผ่นสีมาตรฐานที่ใช้ในการปรับเทียบหาสมการการทำนายที่ใส่ซองดังภาพที่ 44 ทำให้มีสภาวะใกล้เคียงกับการวัดแผ่นสีมาตรฐาน

สำหรับสเปกตรัมชิ้นงานที่มีความหนาทั้ง 1 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตรมีความเข้มมากขึ้นเป็นเพราะในชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตรจะใกล้กับกล้องมากกว่าชิ้นงานความหนาอื่นจึงส่งผลให้สเปกตรัมมีความเข้มสูงขึ้น ในส่วนของชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร เนื่องจากอยู่ใกล้กับฐานวางชิ้นงานมากกว่าชิ้นงานความหนาอื่น ทำให้ได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมากขึ้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น หากวิเคราะห์ค่า R^2 ของแต่ละความหนา

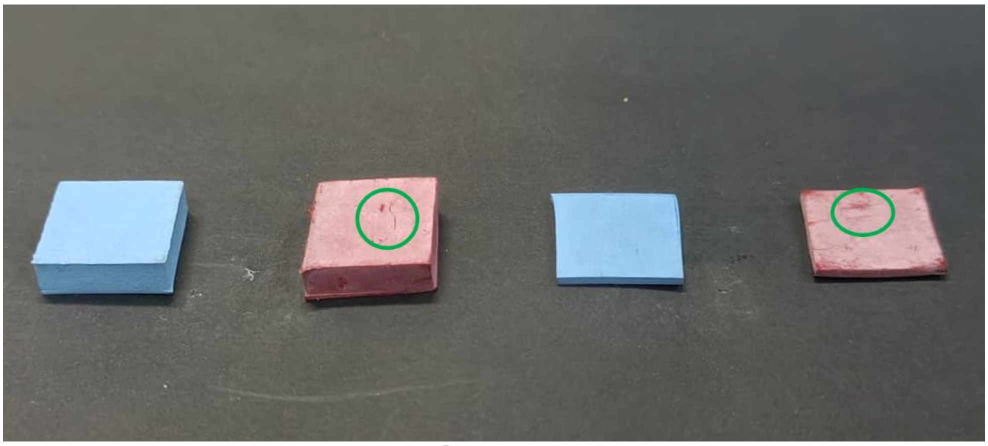


ภาพที่ 70 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)



ภาพที่ 71 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* และค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก PVC สีขาวที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

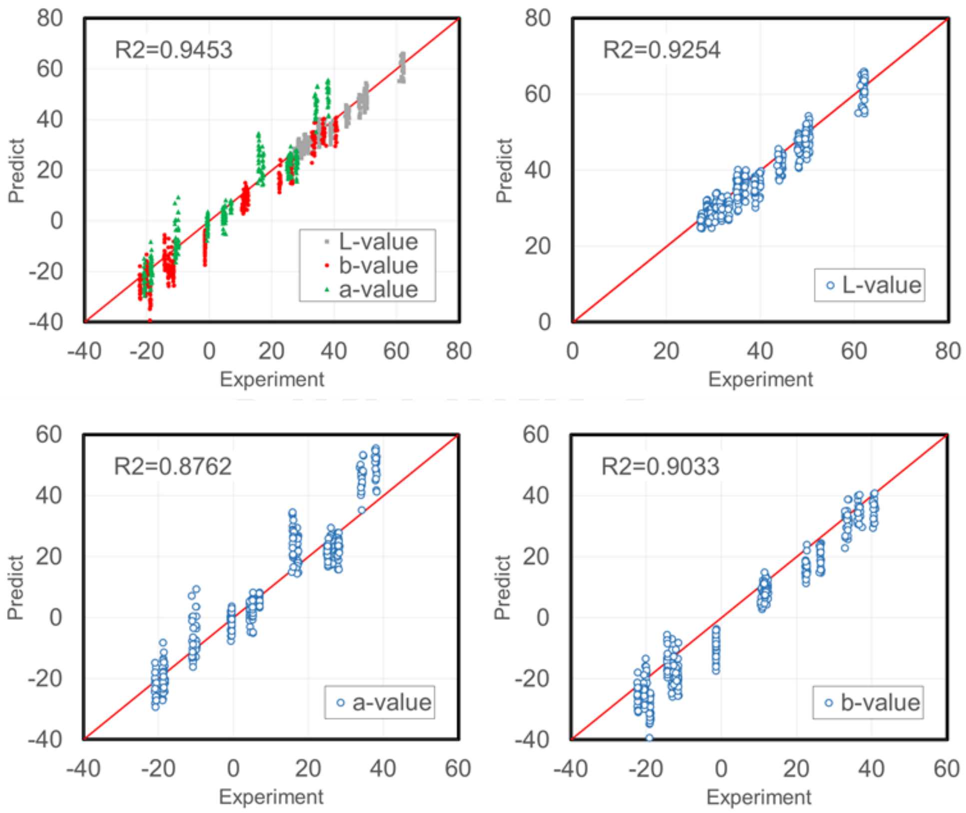
พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9910 ดังแสดงในภาพที่ 69 ชิ้นงานพลาสติก PVC ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตรมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9764 ดังภาพที่ 70 และค่า R^2 เท่ากับ 0.9820 สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 71 หากพิจารณาจากค่า R^2 พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรจะมีความแม่นยำในการทำนายสูงกว่า แต่หากพิจารณาค่า a* และค่า b* แบบแยกค่า พบว่าค่า R^2 จากการทำนายของชิ้นงานที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร จะมีค่าที่สูงกว่าค่าอื่น เนื่องจากชิ้นงานขนาด 1 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร มีสีของผิวชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่สม่ำเสมอกันดังที่แสดงในภาพที่ 72



ภาพที่ 72 แสดงภาพของชิ้นงานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร

4.4.4 ผลของการทำนายค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก Unknown

การทดลองการวัดค่าสีของชิ้นงานพลาสติกที่ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดและมีเฉดสีต่างจากชิ้นงาน PVC ที่ขึ้นรูปเองพบว่าได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9453 ดังแสดงในภาพที่ 73



ภาพที่ 73 แสดงค่า R^2 ของค่า CIE L*a*b* ของชิ้นงานพลาสติก Unknown ระหว่างค่าที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ (Yexp) และค่าที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter (Ypred)

โดยพบว่าค่า L* มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9254 ค่า a* มีค่า R^2 เท่ากับ 0.87621 และค่า b* มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9033 ซึ่งโดยรวมแล้วค่า R^2 ของการวัดชิ้นงานพลาสติก Unknown โดยเครื่อง LineScan Color Meter มีค่าความแม่นยำที่ต่ำลงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการความหนาของชิ้นงานที่นำมาวัดค่ามีความหนาอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าความหนาของชิ้นงานที่มีความแม่นยำในการวัดค่ามากที่สุดคือ 3 มิลลิเมตรและผลของแสงรบกวนบริเวณด้านข้างของฐานวางชิ้นงาน ส่งผลให้มีความเข้มแสงของสเปคตรัมต่ำกว่าชิ้นงานตัวอย่างบริเวณตรงกลางดังแสดงในภาพที่ 63

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถสร้างเครื่องวัดสีในระบบ CIE L*a*b* โดยใช้ Raspberry Pi กับ Raspberry Pi HQ Camera module เป็นเซนเซอร์รับภาพ และตัวเครื่องมีความละเอียดเฉลี่ยประมาณ 1.6 นาโนเมตรต่อพิกเซล บนสานพานลำเลียงขนาด 30 เซนติเมตร
2. ได้สมการการทำนายค่าสีระบบ CIE L*a*b* ที่มีความแม่นยำเมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานระดับอุตสาหกรรม (เครื่อง ColourFlex EZ ซึ่งเป็นเครื่องวัดค่า CIE L*a*b* แบบจุด) ที่มีค่า R^2 ของการทำนายแผ่นสีมาตรฐานในขั้นตอนการสร้างโมเดลการทำนายมากกว่า 0.99
3. สมการการทำนายค่าสีระบบ CIE L*a*b* ที่มีประสิทธิภาพ โดยให้ค่า R^2 มากกว่า 0.97 สำหรับชิ้นงานพลาสติก PVC ที่ขึ้นรูปเอง และ 0.94 สำหรับชิ้นงานพลาสติกแผ่นที่มีขายตามท้องตลาด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สมการทำนายใช้ได้เพียงเครื่องที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เท่านั้น ไม่สามารถใช้กับเครื่องอื่นได้ หากมีการสร้างเครื่องใหม่ควรทำการปรับเทียบ เพื่อหาสมการการทำนายใหม่ของเครื่องนั้น
2. การใช้เกรตติงแบบแก้วหรือพลาสติกที่มีผิวที่เรียบสม่ำเสมอ
3. พื้นสำหรับวางชิ้นงานในงานวิจัยนี้มีสีดำสะท้อนแสง อย่างส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายค่าได้ ควรใช้พื้นหลังหรือสายพานลำเลียงสีดำด้านไม่สะท้อนแสงแทน
4. เพิ่มแหล่งกำเนิดแสงบริเวณด้านข้างของฐานวางชิ้นงาน เพื่อให้ความเข้มแสงที่เข้าเซนเซอร์เท่ากันทั้งหมด

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ค่า RGB/XYZ Matrices

RGB Working Space	แสงขาวอ้างอิงหรือแหล่งกำเนิด	[M]			$[M]^{-1}$		
Adobe RGB (1998)	D65	0.5767309	0.1855540	0.1881852	2.0413690	-0.5649464	-0.3446944
		0.2973769	0.6273491	0.0752741	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0270343	0.0706872	0.9911085	0.0134474	-0.1183897	1.0154096
	D50	0.6097559	0.2052401	0.1492240	1.9624274	-0.6105343	-0.3413404
		0.3111242	0.6256560	0.0632197	-0.9787684	1.9161415	0.0334540
		0.0194811	0.0608902	0.7448387	0.0286869	-0.1406752	1.3487655
AppleRGB	D65	0.4497288	0.3162486	0.1844926	2.9515373	-1.2894116	-0.4738445
		0.2446525	0.6720283	0.0833192	-1.0851093	1.9908566	0.0372026
		0.0251848	0.1411824	0.9224628	0.0854934	-0.2694964	1.0912975
	D50	0.4755678	0.3396722	0.1489800	2.8510695	-1.3605261	-0.4708281
		0.2551812	0.6725693	0.0722496	-1.0927680	2.0348871	0.0227598
		0.0184697	0.1133771	0.6933632	0.1027403	-0.2964984	1.4510659
Best RGB	D50	0.6326696	0.2045558	0.1269946	1.7552599	-0.4836786	-0.2530000
		0.2284569	0.7373523	0.0341908	-0.5441336	1.5068789	0.0215528
		0.0000000	0.0095142	0.8156958	0.0063467	-0.0175761	1.2256959
Beta RGB	D50	0.6712537	0.1745834	0.1183829	1.6832270	-0.4282363	-0.2360185
		0.3032726	0.6637861	0.0329413	-0.7710229	1.7065571	0.0446900
		0.0000000	0.0407010	0.7845090	0.0400013	-0.0885376	1.2723640
Bruce RGB	D65	0.4674162	0.2944512	0.1886026	2.7454669	-1.1358136	-0.4350269
		0.2410115	0.6835475	0.0754410	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0219101	0.0736128	0.9933071	0.0112723	-0.1139754	1.0132541
	D50	0.4941816	0.3204834	0.1495550	2.6502856	-1.2014485	-0.4289936
		0.2521531	0.6844869	0.0633600	-0.9787684	1.9161415	0.0334540
		0.0157886	0.0629304	0.7464909	0.0264570	-0.1361227	1.3458542
CIE RGB	E	0.4887180	0.3106803	0.2006017	2.3706743	-0.9000405	-0.4706338
		0.1762044	0.8129847	0.0108109	-0.5138850	1.4253036	0.0885814
		0.0000000	0.0102048	0.9897952	0.0052982	-0.0146949	1.0093968
	D50	0.4868870	0.3062984	0.1710347	2.3638081	-0.8676030	-0.4988161
		0.1746583	0.8247541	0.0005877	-0.5005940	1.3962369	0.1047562
		-0.0012563	0.0169832	0.8094831	0.0141712	-0.0306400	1.2323842

ค่า RGB/XYZ Matrices (ต่อ)

RGB Working Space	แสงขาวอ้างอิงหรือแหล่งกำเนิด	[M]			$[M]^{-1}$		
ColorMatch RGB	D50	0.5093439	0.3209071	0.1339691	2.6422874	-1.2234270	-0.3930143
		0.2748840	0.6581315	0.0669845	-1.1119763	2.0590183	0.0159614
		0.0242545	0.1087821	0.6921735	0.0821699	-0.2807254	1.4559877
Don RGB 4	D50	0.6457711	0.1933511	0.1250978	1.7603902	-0.4881198	-0.2536126
		0.2783496	0.6879702	0.0336802	-0.7126288	1.6527432	0.0416715
		0.0037113	0.0179861	0.8035125	0.0078207	-0.0347411	1.2447743
ECI RGB	D50	0.6502043	0.1780774	0.1359384	1.7827618	-0.4969847	-0.2690101
		0.3202499	0.6020711	0.0776791	-0.9593623	1.9477962	-0.0275807
		0.0000000	0.0678390	0.7573710	0.0859317	-0.1744674	1.3228273
Ekta Space PS5	D50	0.5938914	0.2729801	0.0973485	2.0043819	-0.7304844	-0.2450052
		0.2606286	0.7349465	0.0044249	-0.7110285	1.6202126	0.0792227
		0.0000000	0.0419969	0.7832131	0.0381263	-0.0868780	1.2725438
NTSC RGB	C	0.6068909	0.1735011	0.2003480	1.9099961	-0.5324542	-0.2882091
		0.2989164	0.5865990	0.1144845	-0.9846663	1.9991710	-0.0283082
		0.0000000	0.0660957	1.1162243	0.0583056	-0.1183781	0.8975535
	D50	0.6343706	0.1852204	0.1446290	1.8464881	-0.5521299	-0.2766458
		0.3109496	0.5915984	0.0974520	-0.9826630	2.0044755	-0.0690396
		-0.0011817	0.0555518	0.7708399	0.0736477	-0.1453020	1.3018376
PAL/SECAM RGB	D65	0.4306190	0.3415419	0.1783091	3.0628971	-1.3931791	-0.4757517
		0.2220379	0.7066384	0.0713236	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0201853	0.1295504	0.9390944	0.0678775	-0.2288548	1.0693490
	D50	0.4552773	0.3675500	0.1413926	2.9603944	-1.4678519	-0.4685105
		0.2323025	0.7077956	0.0599019	-0.9787684	1.9161415	0.0334540
		0.0145457	0.1049154	0.7057489	0.0844874	-0.2545973	1.4216174
ProPhoto RGB	D50	0.7976749	0.1351917	0.0313534	1.3459433	-0.2556075	-0.0511118
		0.2880402	0.7118741	0.0000857	-0.5445989	1.5081673	0.0205351
		0.0000000	0.0000000	0.8252100	0.0000000	0.0000000	1.2118128
SMPTE-C RGB	D65	0.3935891	0.3652497	0.1916313	3.5053960	-1.7394894	-0.5439640
		0.2124132	0.7010437	0.0865432	-1.0690722	1.9778245	0.0351722
		0.0187423	0.1119313	0.9581563	0.0563200	-0.1970226	1.0502026
	D50	0.4163290	0.3931464	0.1547446	3.3921940	-1.8264027	-0.5385522
		0.2216999	0.7032549	0.0750452	-1.0770996	2.0213975	0.0207989
		0.0136576	0.0913604	0.7201920	0.0723073	-0.2217902	1.3960932

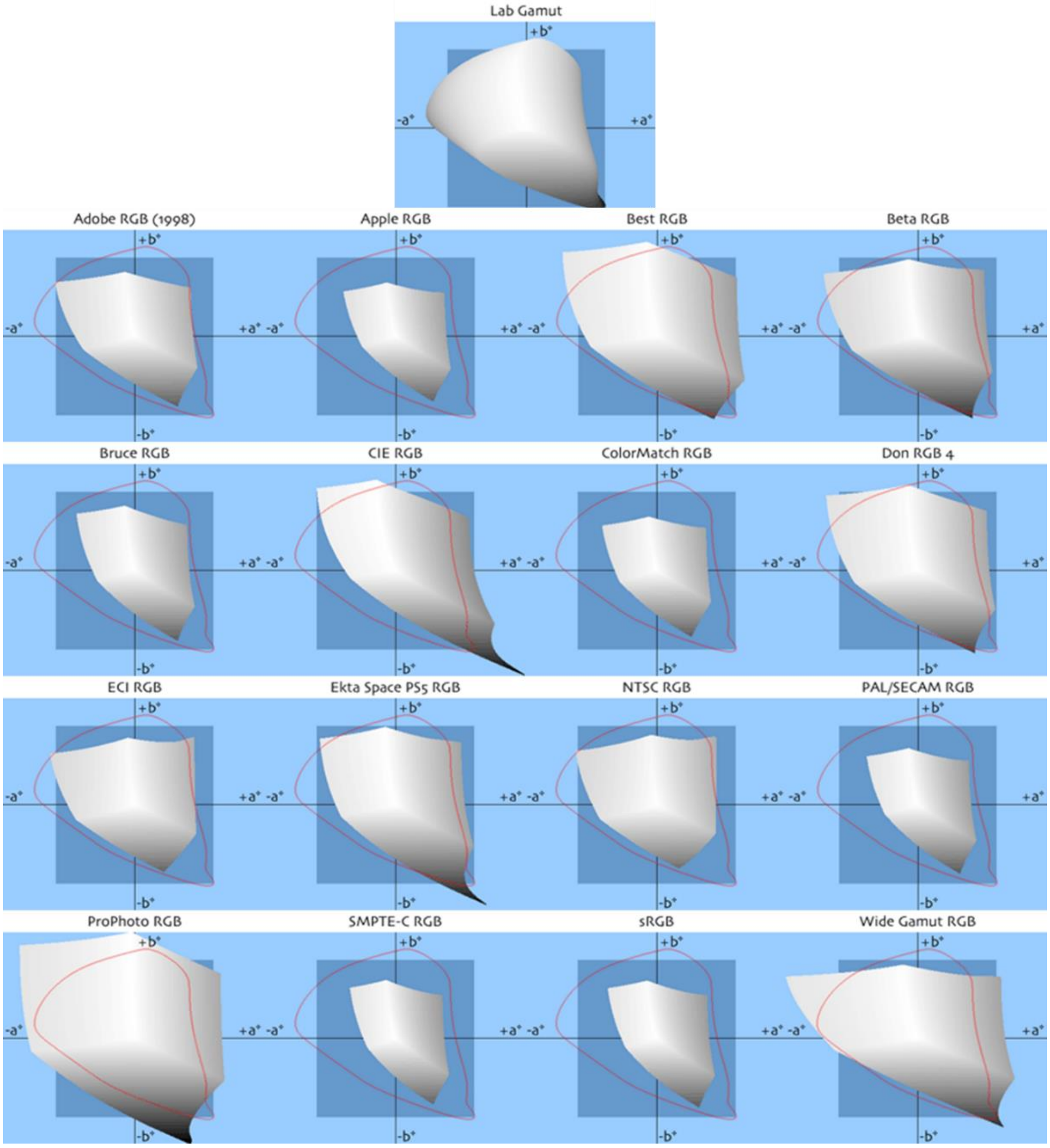
ค่า RGB/XYZ Matrices (ต่อ)

RGB Working Space	แสงขาวอ้างอิงหรือแหล่งกำเนิด	[M]			$[M]^{-1}$		
sRGB	D65	0.4124564	0.3575761	0.1804375	3.2404542	-1.5371385	-0.4985314
		0.2126729	0.7151522	0.0721750	-0.9692660	1.8760108	0.0415560
		0.0193339	0.1191920	0.9503041	0.0556434	-0.2040259	1.0572252
	D50	0.4360747	0.3850649	0.1430804	3.1338561	-1.6168667	-0.4906146
		0.2225045	0.7168786	0.0606169	-0.9787684	1.9161415	0.0334540
		0.0139322	0.0971045	0.7141733	0.0719453	-0.2289914	1.4052427
Wide Gamut RGB	D50	0.7161046	0.1009296	0.1471858	1.4628067	-0.1840623	-0.2743606
		0.2581874	0.7249378	0.0168748	-0.5217933	1.4472381	0.0677227
		0.0000000	0.0517813	0.7734287	0.0349342	-0.0968930	1.2884099

ภาคผนวก ข ค่า Gamma

RGB Working Space	Gamma
Lab Gamut	-
Adobe RGB (1998)	2.2
Apple RGB	1.8
Best RGB	2.2
Beta RGB	2.2
Bruce RGB	2.2
CIE RGB	2.2
ColorMatch RGB	1.8
Don RGB 4	2.2
ECI RGB v2	L*
Ekta Space PS5	2.2
NTSC RGB	2.2
PAL/SECAM RGB	2.2
ProPhoto RGB	1.8
SMPTE-C RGB	2.2
sRGB	≈2.2
Wide Gamut RGB	2.2

ภาคผนวก ค กราฟ Gamut Projections



ภาคผนวก ง ตารางฟังก์ชันผู้สังเกตมาตรฐาน CIE (CIE standard observer functions) ของ CIE 2° (1931) และ 10° (1964)

Wavelength	2° standard observer functions			10° standard observer functions		
(nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0.0014	0	0.0065	0.0002	0	0.0007
390	0.0042	0.0001	0.0201	0.0024	0.0003	0.0105
400	0.0143	0.0004	0.0679	0.0191	0.002	0.086
410	0.0435	0.0012	0.2074	0.0847	0.0088	0.3894
420	0.1344	0.004	0.6456	0.2045	0.0214	0.9725
430	0.2839	0.0116	1.3856	0.3147	0.0387	1.5535
440	0.3483	0.023	1.7471	0.3837	0.0621	1.9673
450	0.3362	0.038	1.7721	0.3707	0.0895	1.9948
460	0.2908	0.06	1.6692	0.3023	0.1282	1.7454
470	0.1954	0.091	1.2876	0.1956	0.1852	1.3176
480	0.0956	0.139	0.8132	0.0805	0.2536	0.7721
490	0.032	0.208	0.4652	0.0162	0.3391	0.4153
500	0.0049	0.323	0.272	0.0038	0.4608	0.2185
510	0.0093	0.503	0.1582	0.0375	0.6067	0.112
520	0.0633	0.71	0.0782	0.1177	0.7618	0.0607
530	0.1655	0.862	0.0422	0.2365	0.8752	0.0305
540	0.2904	0.954	0.0203	0.3768	0.962	0.0137
550	0.4334	0.995	0.0087	0.5298	0.9918	0.004
560	0.5945	0.995	0.0039	0.7052	0.9973	0
570	0.7621	0.952	0.0021	0.8787	0.9556	0
580	0.9163	0.87	0.0017	1.0142	0.8689	0
590	1.0263	0.757	0.0011	1.1185	0.7774	0
600	1.0622	0.631	0.0008	1.124	0.6583	0
610	1.0026	0.503	0.0003	1.0305	0.528	0
620	0.8544	0.381	0.0002	0.8563	0.3981	0
630	0.6424	0.265	0	0.6475	0.2835	0
640	0.4479	0.175	0	0.4316	0.1798	0
650	0.2835	0.107	0	0.2683	0.1076	0
660	*0.1649*	*0.061*	*0*	0.1526	0.0603	0
670	0.0874	0.032	0	0.0813	0.0318	0
680	0.0468	0.017	0	0.0409	0.0159	0
690	0.0227	0.0082	0	0.0199	0.0077	0
700	0.0114	0.0041	0	0.0096	0.0037	0
710	0.0058	0.0021	0	0.0046	0.0018	0
720	0.0029	0.001	0	0.0022	0.0008	0
730	0.0014	0.005	0	0.001	0.0004	0
740	0.0007	0.0003	0	0.0005	0.0002	0
750	0.0003	0.001	0	0.0003	0.0001	0
760	0.0002	0.001	0	0.0001	0	0
770	0.0001	0	0	0.0001	0	0
780	0	0	0	0	0	0

ภาคผนวก จ ตารางแสดงสีที่อยู่ในแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD)

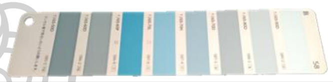
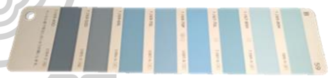
รหัสหน้า	รูปภาพ	รหัสหน้า	รูปภาพ
N1		R11	
N2		YR12	
N3		YR13	
R4		YR14	
R5		YR15	
R6		YR16	
R7		YR17	
R8		YR18	
R9		YR19	
R10		YR20	

มหาวิทยาลัยศิลปากร

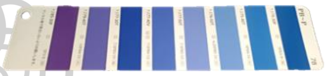
ตารางแสดงสีที่อยู่ในแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD) (ต่อ)

รหัสหน้า	รูปภาพ	รหัสหน้า	รูปภาพ
YR21		Y31	
YR22		Y32	
YR23		Y33	
YR24		Y34	
YR25		Y35	
YR26		Y36	
YR-Y27		Y37	
Y28		Y38	
Y29		Y39	
Y30		Y-GY40	

ตารางแสดงสีที่อยู่ในแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD) (ต่อ)

รหัสหน้า	รูปภาพ	รหัสหน้า	รูปภาพ
GY41		G-BG51	
GY42		BG52	
GY43		BG53	
GY44		BG54	
GY45		BG-B55	
GY-G46		B56	
G47		B57	
G48		B58	
G49		B59	
G50		B-PB60	

ตารางแสดงสีที่อยู่ในแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD) (ต่อ)

รหัสหน้า	รูปภาพ	รหัสหน้า	รูปภาพ
PB61		RP71	
PB62		RP72	
PB63		R73	
PB64		YR74	
PB-P65		Y-GY75	
P66		GY-BG76	
P67		BG-PB77	
P68		PB-P78	
RP69		P-RP79	
RP70			

ภาคผนวก ฉ ชิ้นงานที่ใช้ทำในงานวิจัย

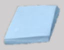
● ชิ้นงาน PVC ที่ขึ้นรูปเองด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression moulding)

ตัวเลขตัวแรกบอกสี: 1 = สีขาว, 2 = สีแดง, 3 = สีเขียว และ 4 = สีน้ำเงิน

ตัวเลขตัวที่ 2 บอกถึงความหนาของชิ้นงาน: 1 = 1 mm, 3 = 3 mm และ 5 = 5 mm

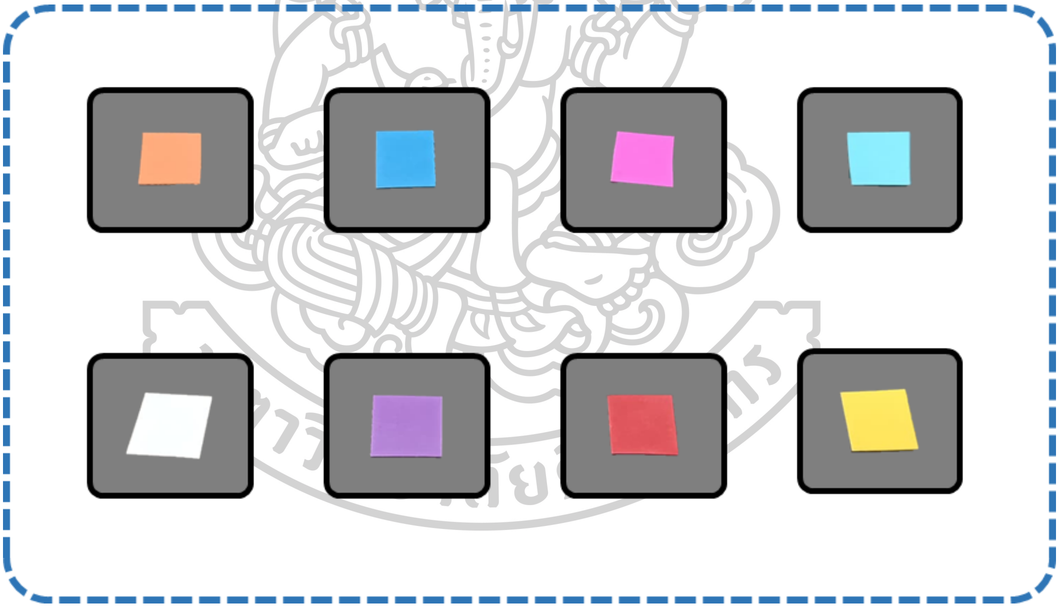
ตัวเลขตัวที่ 3 บอกถึงความขรุขระของผิวชิ้นงาน: 0 = ผิวเรียบ, 1 = Roughness I และ 2 = Roughness II

ตัวอักษรตัวสุดท้าย: ตัวอักษร W คือหล่อเย็นชิ้นงานด้วยน้ำ ตัวอักษร A คือหล่อเย็นชิ้นงานด้วยอากาศ

ภาพชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ภาพชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน
	PVC110W		PVC230W		PVC330W		PVC430W
	PVC130A		PVC230A		PVC330A		PVC430A
	PVC132W		PVC231W		PVC331W		PVC431W
	PVC150A		PVC231A		PVC331A		PVC431A
	PVC152A		PVC232W		PVC332W		PVC432W
			PVC232A		PVC332A		PVC432A

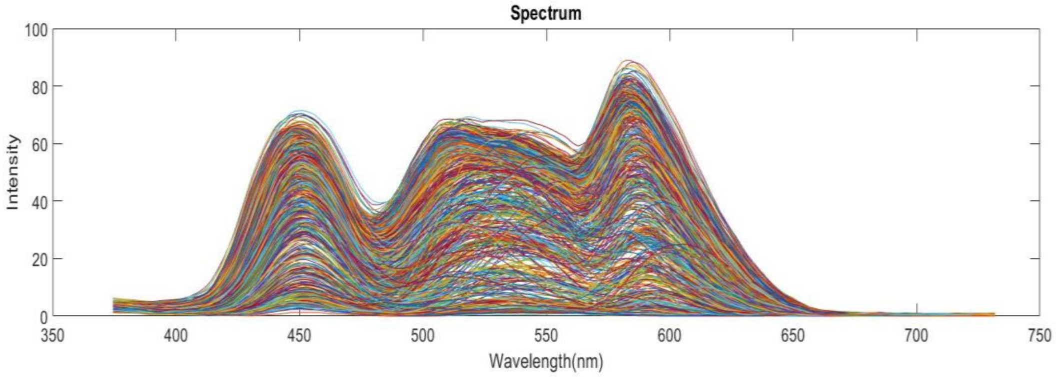
- ชิ้นงาน Unknown สีด้าน

- ชิ้นงาน Unknown สีมันวาว

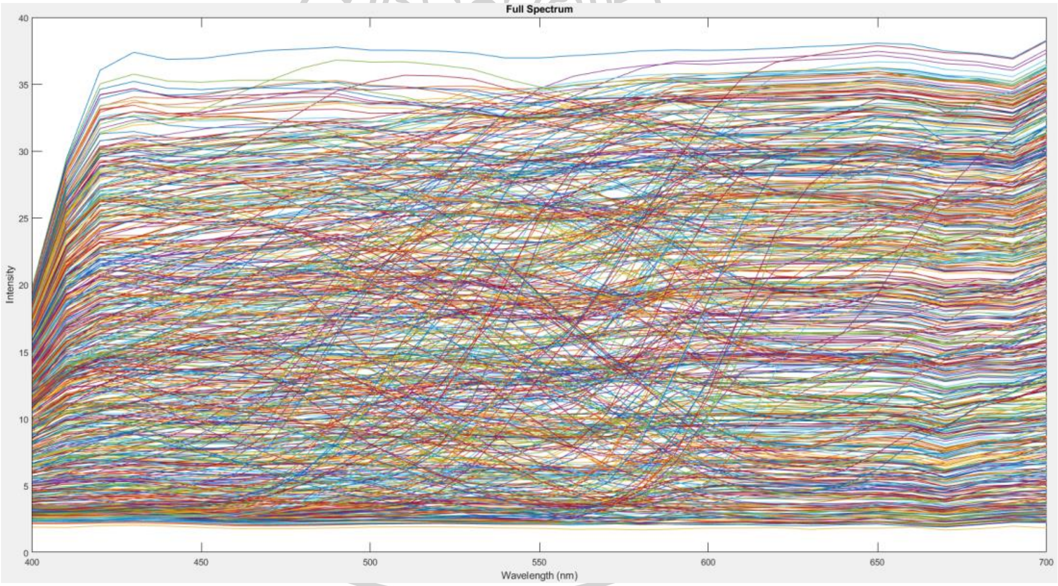


ภาคผนวก ช สเปกตรัมของแผ่นสีมาตรฐาน 2017 Standard Paint Colors ของ TOA-CHUGOKU MARINE PAINTS, LTD (CMD)

- สเปกตรัมที่วัดโดยเครื่อง LineScan Color Meter



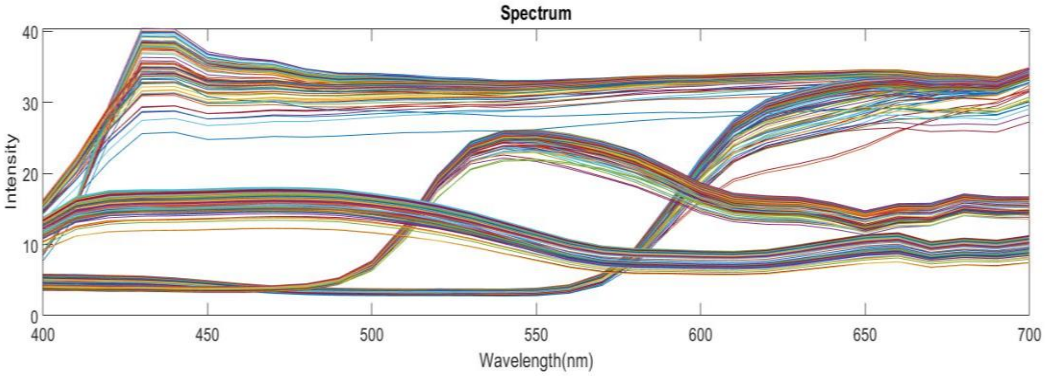
- สเปกตรัมที่วัดโดยเครื่อง ColourFlex EZ



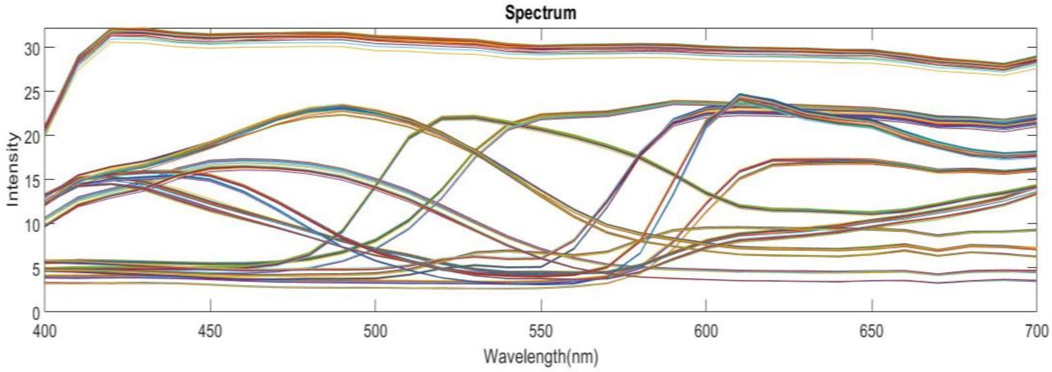
ภาคผนวก ซ สเปกตรัมของชิ้นงานตัวอย่าง

- **ColourFlex EZ**

- ชิ้นงาน PVC ที่ขึ้นรูปโดยวิธี Compression Molding

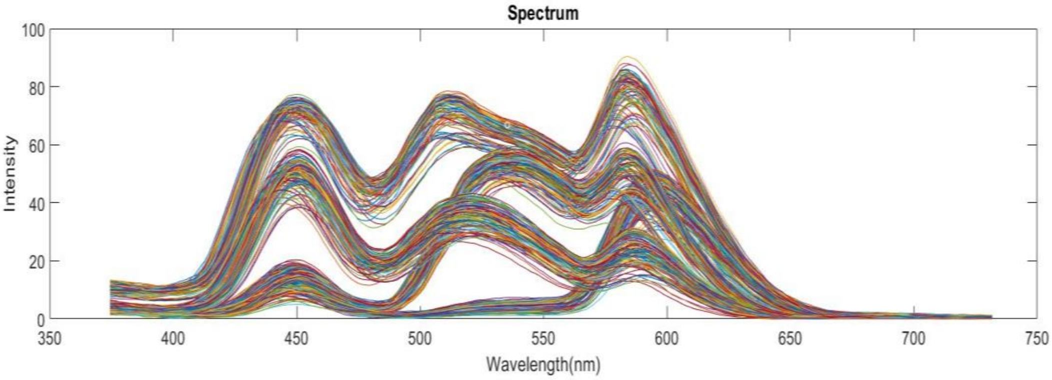


- แผ่นชิ้นงาน Unknown ที่มีขายตามท้องตลาด

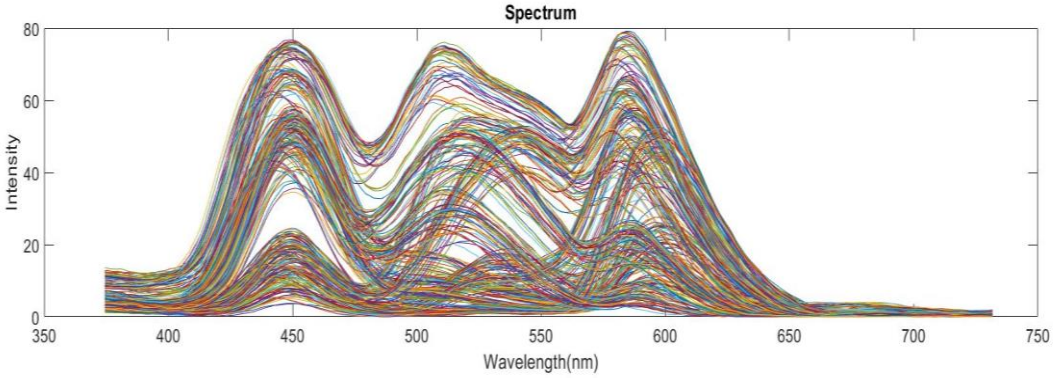


- **LineScan Color Meter**

- ชิ้นงาน PVC ที่ขึ้นรูปโดยวิธี Compression Molding



- แผ่นชิ้นงาน Unknown ที่มีขายตามท้องตลาด



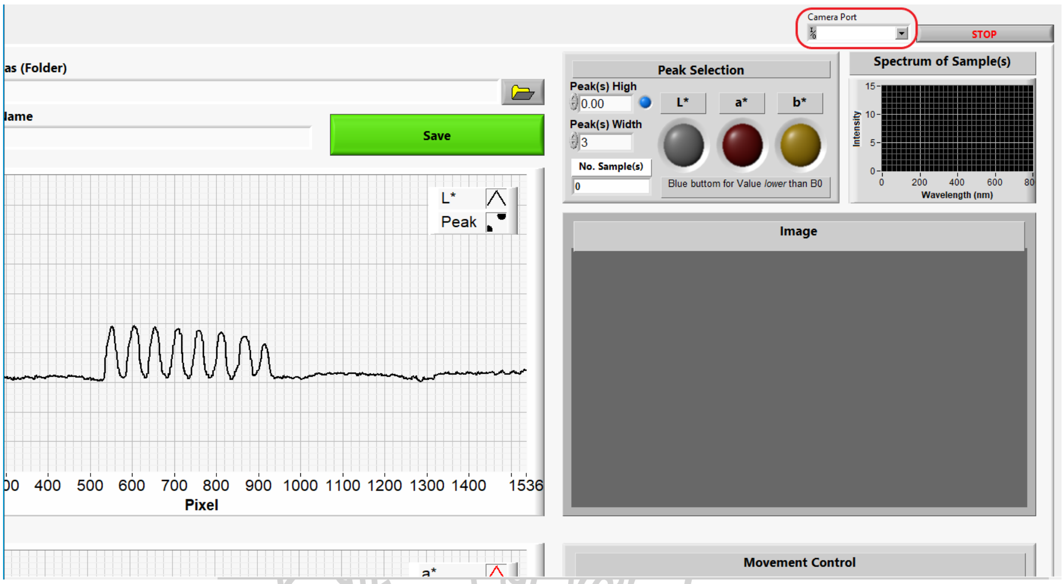
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ฌ ตารางค่าที่ได้จากการคำนวณโดยเทคนิค Partial Least Squares regression (PLS)

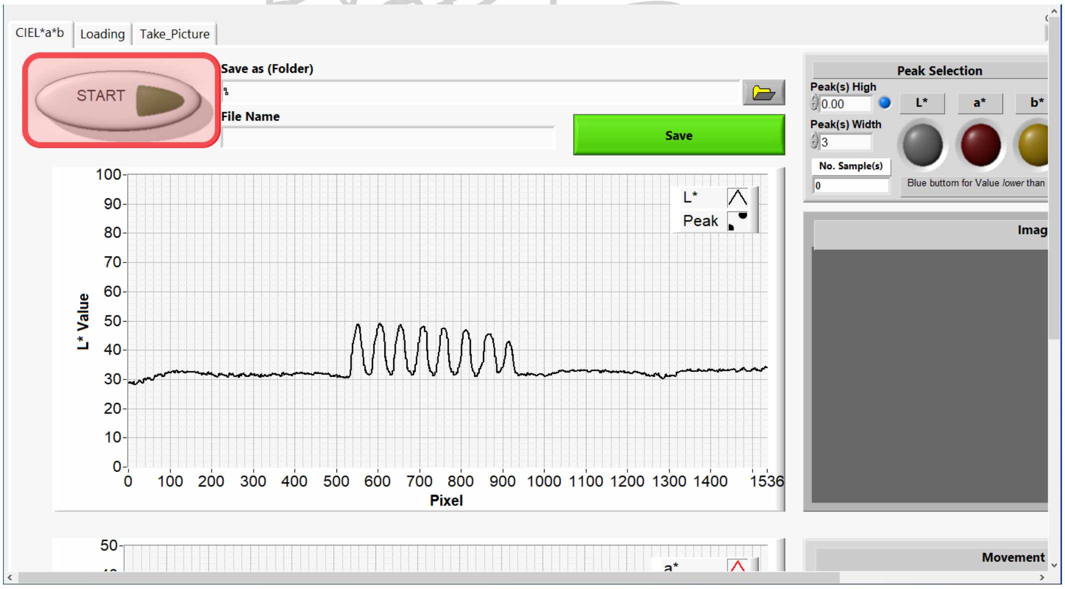
Error Value	PVC Sample(s)	1 mm PVC Sample(s)	3 mm PVC Sample(s)	5 mm PVC Sample(s)
Residual of Sum of Square (RSS)	26459.3367	3683.6608	14273.2433	4919.9649
Standard Error of Estimated or Root mean square error (RMSE)	4.1184	4.0195	4.3365	4.6150
Mean Absolute Error (MAE)	3.1705	3.1283	3.3792	3.6534
Normalized Root mean square error (NRMSE)	0.0524	0.0516	0.0558	0.0589
Root mean squared relative error (RMSRE)	5.9943	1.4052	1.9224	15.1166
R-squared (R^2)	0.9726	0.9755	0.9628	0.9676
Error Value	**Smooth PVC Sample(s)**	**Roughness I PVC Sample(s)**	**Roughness II PVC Sample(s)**	**Unknown Sample(s)**
Residual of Sum of Square (RSS)	14322.3198	5019.4002	7117.6168	33526.0772
Standard Error of Estimated or Root mean square error (RMSE)	4.2687	3.9729	3.9508	5.5716
Mean Absolute Error (MAE)	3.3015	3.028	3.044	4.1171
Normalized Root mean square error (NRMSE)	0.0543	0.0629	0.0519	0.0659
Root mean squared relative error (RMSRE)	2.0455	0.3135	10.7537	1.4861
R-squared (R^2)	0.97072	0.9730	0.9751	0.94529

ภาคผนวก ญ การใช้งานโปรแกรมวัดค่า CIE L*a*b* ของเครื่อง LineScan Color Meter

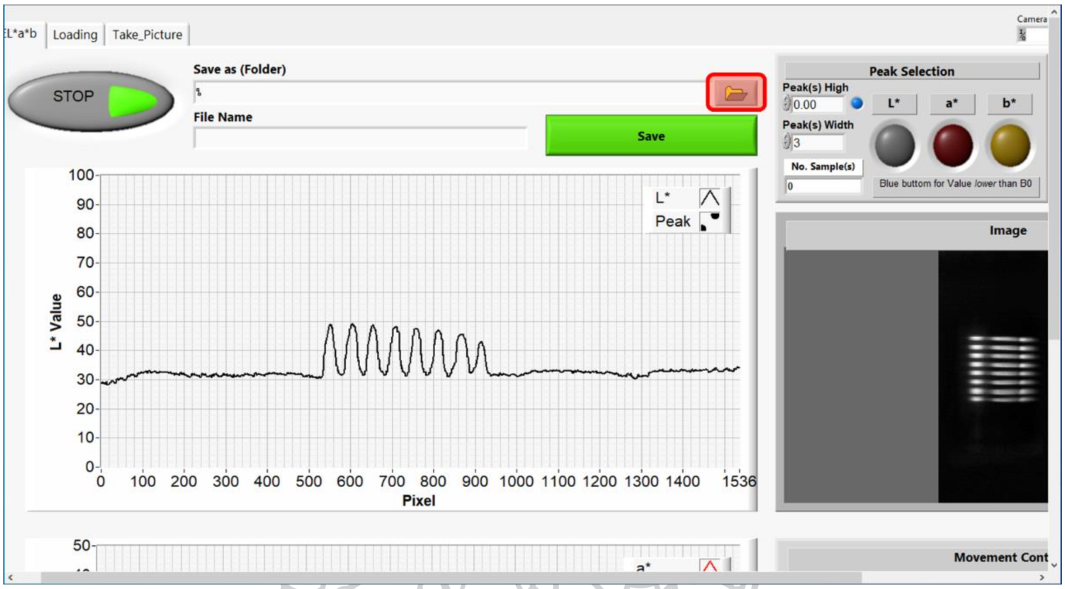
- เมื่อเข้าโปรแกรมแล้วกดเริ่มโปรแกรมแล้ว สามารถทำการเลือกกล้องได้จากมุมขวาบน โดยต้องทราบก่อนแล้วว่ากล้องของเครื่อง LineScan Color Meter อยู่พอร์ตไหน



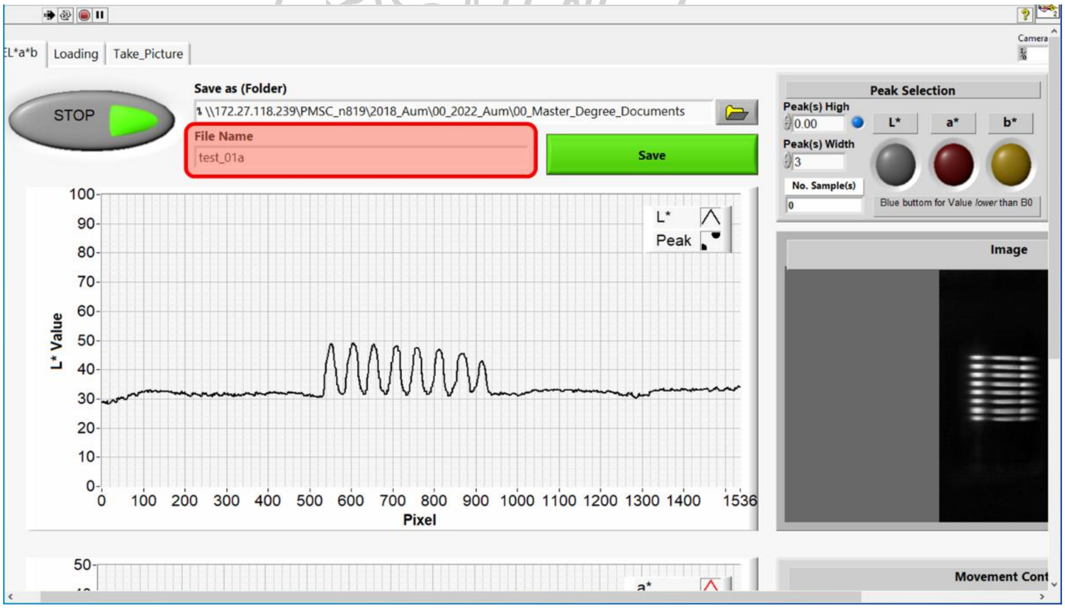
- เมื่อเลือกกล้องสำเร็จ แล้วกดปุ่ม START เพื่อเริ่มการวัดค่า



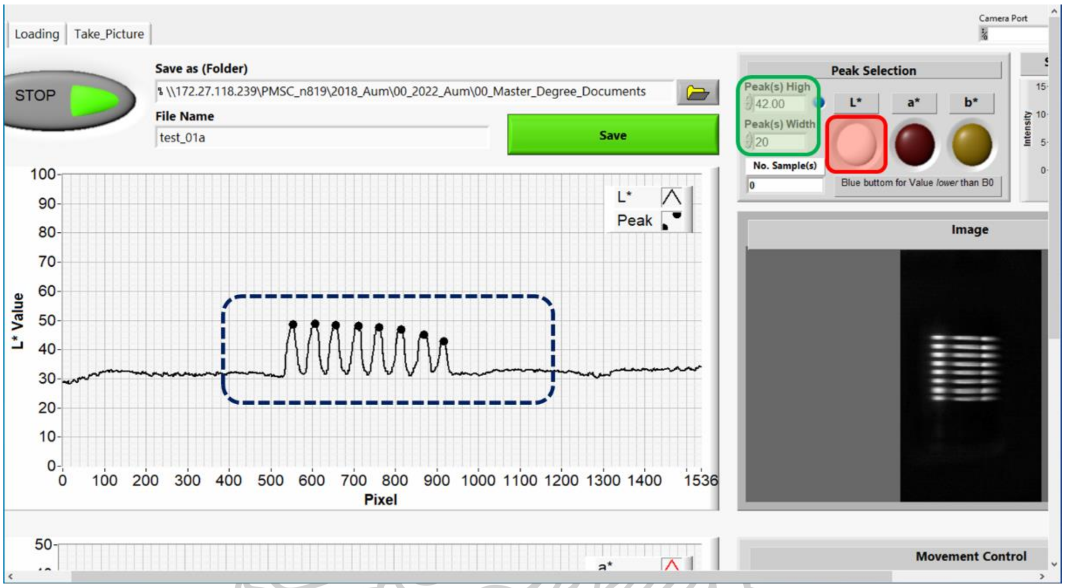
- สามารถเลือกโฟลเดอร์สำหรับบันทึกค่าที่วัด โดยกดรูปโฟลเดอร์หรือพิมพ์ที่อยู่โฟลเดอร์เอง ได้บริเวณใต้ Save as (Folder)



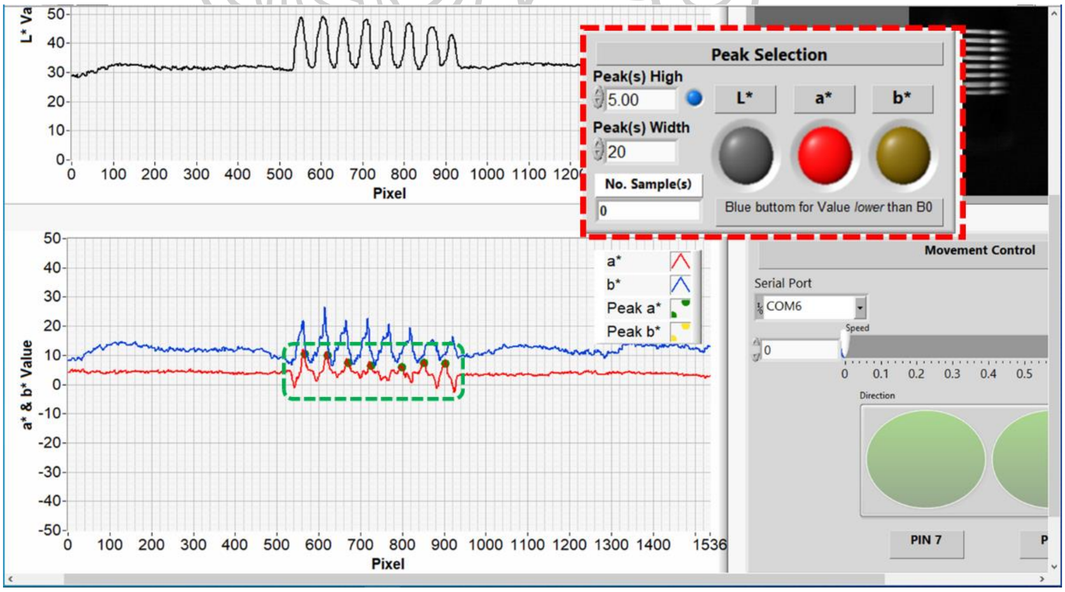
- พิมพ์ชื่อไฟล์สำหรับการบันทึกที่ File Name



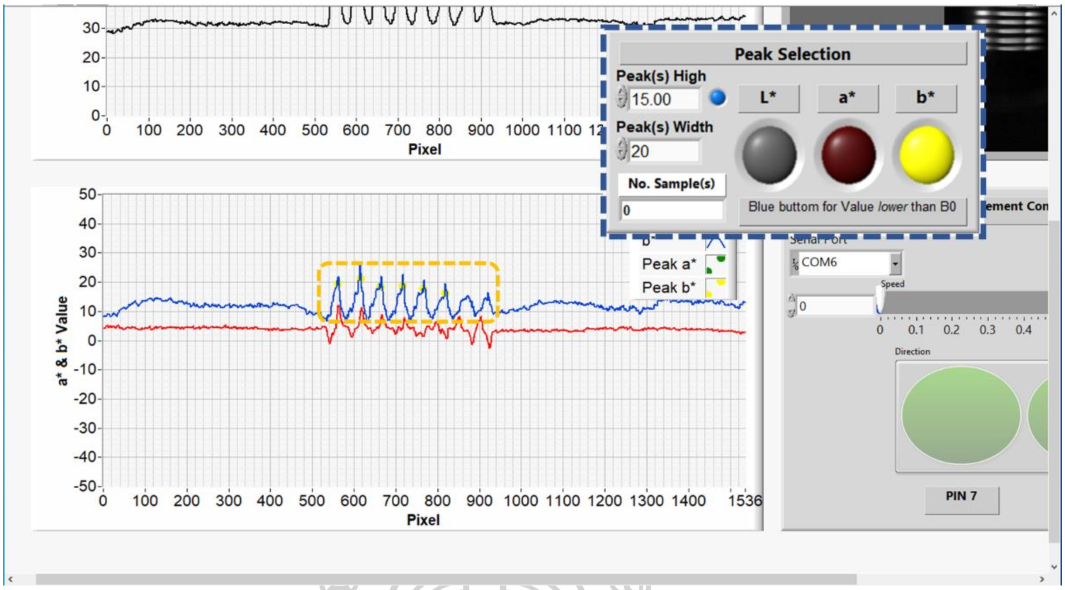
- ทำการวัดค่าโดยขั้นแรกทำการเลือกค่าที่จะใช้สำหรับการตัดพีค (ไฮไลท์สีแดง) โดยโปรแกรมจะยึดตำแหน่งของพีคที่เลือกตัดของค่าอื่นโดยอัตโนมัติ เช่น หากเลือกตัดพีคโดยใช้ค่า L* ก็จะได้ค่า a* และ b* ตำแหน่งเดียวกับค่า L* ที่เลือกมาด้วย สามารถทำการใส่ค่าความกว้างและความสูงของพีคได้ในบริเวณไฮไลท์สีเขียว หากค่าพีคมีค่าน้อยกว่า B_0 หรือเป็นพีคหัวกลับ สามารถกดปุ่มที่อยู่บริเวณด้านข้างค่าความสูงของพีค เพื่อตัดพีคดังกล่าวได้



ตัวอย่างการตัดพีคโดยใช้ค่า L*

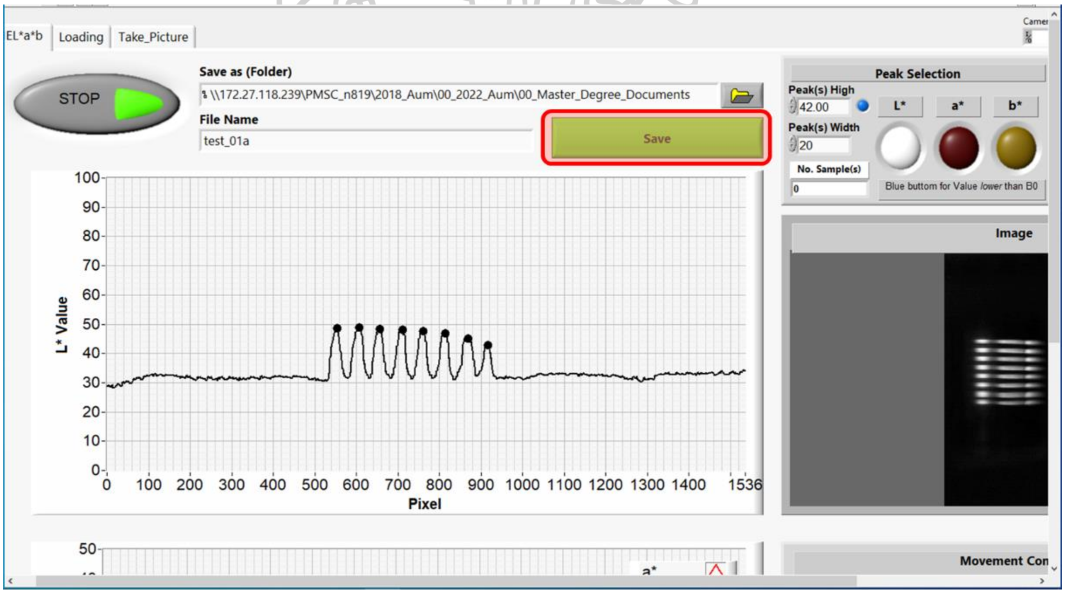


ตัวอย่างการตัดพีคโดยใช้ค่า a*

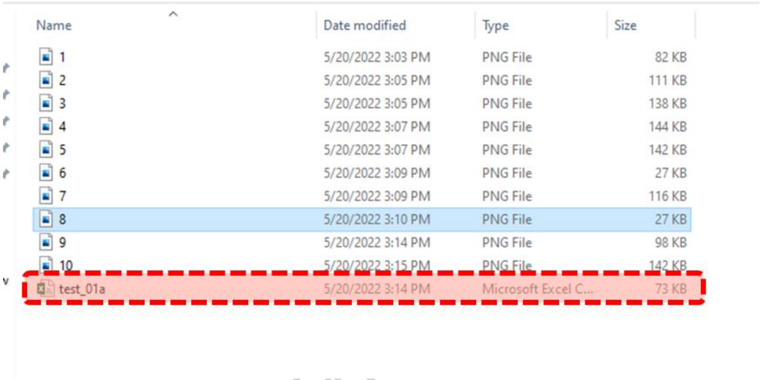


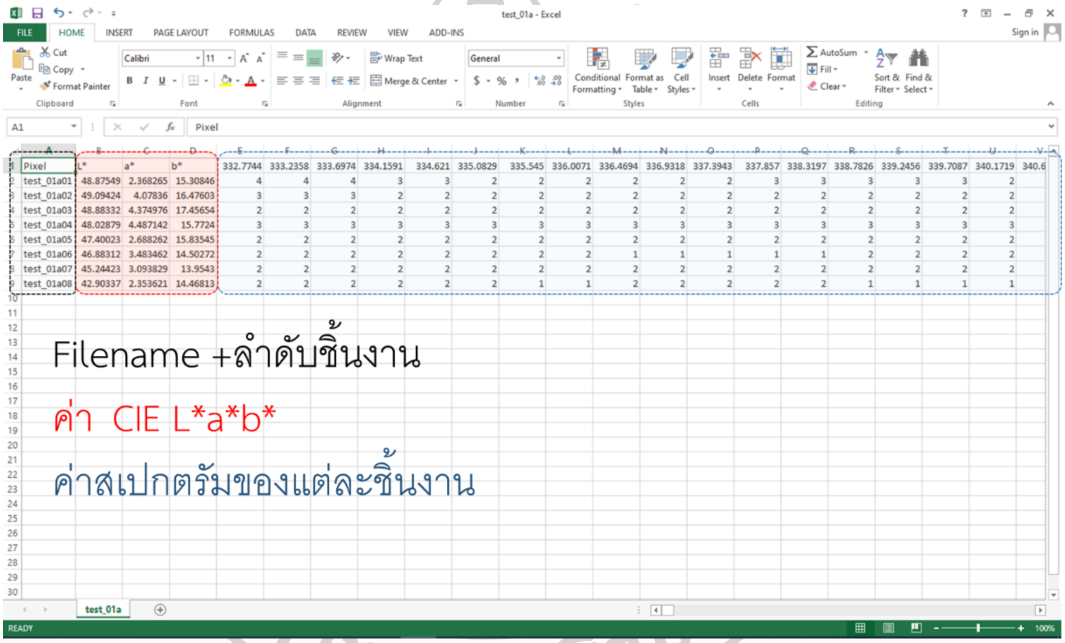
ตัวอย่างการตัดพีคโดยใช้ค่า b*

- เมื่อทำการเลือกการตัดพีคได้แล้วสามารถบันทึกได้ โดยการกดปุ่ม Save



- เมื่อทำการบันทึกแล้ว จะได้ไฟล์การวัดค่าเป็นไฟล์สกุล .csv โดยภายในไฟล์ดังกล่าวจะมีชื่อไฟล์และลำดับโดยนับจากซ้ายมือของพื้นหลัง ค่า CIE L*a*b* และสเปกตรัมของแต่ละชิ้น





รายการอ้างอิง

1. SETSER, C.S., *COLOR: REFLECTIONS AND TRANSMISSIONS 1 2.* Journal of Food Quality, 1984. **6**(3): p. 183-197.
2. Mathew, W.R. and C.J. Hanlin, *Color as a Science*, in *Coloring of Plastics*. 2003. p. 4-22.
3. Weinreb, A., *VACUUM ULTRAVIOLET EXCITED LUMINESCENCE OF ORGANIC SYSTEMS: A REVIEW*, in *Organic Scintillators and Scintillation Counting*, D.L. Horrocks and C.-T. Peng, Editors. 1971, Academic Press. p. 45-74.
4. Thomas, A., *(IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 99.) GENERAL INTRODUCTION TO THE CHEMISTRY OF DYES*. 2010.
5. Zibayiwa, M., *Remote Sensing Full Explained. DEDICATION.* 2020. **1**.
6. Pelekanakis, K., *Harvesting time-frequency-space diversity with coded modulation for underwater acoustic communications*. 2009.
7. Wolverson, D., *8 - Raman spectroscopy*, in *Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures*, C. Lamberti, Editor. 2008, Elsevier: Amsterdam. p. 249-288.
8. Malacara, D. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. 2011. Spie Bellingham, WA.
9. Stockman, A. and L.T. Sharpe, *Human Cone Spectral Sensitivities and Color Vision Deficiencies*, in *Visual Transduction and Non-Visual Light Perception*, J. Tombran-Tink and C.J. Barnstable, Editors. 2008, Humana Press: Totowa, NJ. p. 307-327.
10. Bandara, R., *A Music Keyboard with Gesture Controlled Effects Based on Computer Vision*. 2011.
11. Gilchrist, A. and J. Nobbs, *Colorimetry, theory.* Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry, 1999: p. 340-342.
12. Schanda, J. and I. Illumination, *Colorimetry: Understanding the CIE System*. 2007.
13. Guild, J., *The Colorimetric Properties of the Spectrum.* Philosophical

Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1932. **230**: p. 149-187.

14. Tannenbaum, P.M., *Analytic approximations for the CIE 1964 ten-degree-field color-matching functions*.* Journal of the Optical Society of America, 1974. **64**(1): p. 89-91.

15. Webber, T.G., *Coloring of plastics*. Vol. 1. 1979: Wiley Somerset, NJ.

16. Guild, J., *The colorimetric properties of the spectrum.* Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, 1931. **230**(681-693): p. 149-187.

17. Zekou, E., et al., *CALCULATION OF THE FOCAL LENGTH OF A TWO-LENS SYSTEM - AN EDUCATIONAL EXPERIMENT.* 2020.

18. Hecht, E., A. Zając, and K. Guardino, *Optics*. 1998: Addison-Wesley.

19. Magubane, S.E., et al., *Optimization of CIEL*a*b*/Yxy colour system for colorimetric devices fabricated with gold nanoparticles.* Journal of Molecular Structure, 2019. **1191**: p. 271-277.

20. Hui, R., *Chapter 4 - Photodetectors*, in *Introduction to Fiber-Optic Communications*, R. Hui, Editor. 2020, Academic Press. p. 125-154.

21. Stigler, S.M., *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty before 1900*. 1990: Harvard University Press.

22. Wasserman, L., *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference*. 2010: Springer Publishing Company, Incorporated.

23. Park, K.I. and M. Park, *Fundamentals of probability and stochastic processes with applications to communications*. 2018: Springer.

24. Savitzky, A. and M.J.E. Golay, *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.* Analytical Chemistry, 1964. **36**(8): p. 1627-1639.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วัชรากร มูลศรี
วัน เดือน ปี เกิด	24 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 45 หมู่ 4 บ้านมะกอก ตำบลมะกอก อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน 51120

มหาวิทยาลัยศิลปากร