

วิธีการวัดสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบ
คุณภาพงานพิมพ์สีพื้น

นายไพโรจน์ คล้ายเพชร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A METHOD TO MEASURE THE COLOR OF THE PRINTED BANKNOTES USING DIGITAL
IMAGE PROCESSING TO OPTIMIZE PRINT QUALITY

Mr. Pairoj Klypetch

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

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

วิธีการวัดสีผ่านฟิล์มพันธบัตรด้วยการประมวลผลภาพ
ดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพงาน
ฟิล์มสีพื้น

โดย

นายไพโรจน์ คล้ายเพชร

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ประภาส จงสถิตย์วัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(สุกรี สิ้นธุภิญโญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(สุนิสา रिมนเจริญ)

ไพโรจน์ คล้ายเพ็ชร : วิธีการวัดสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์สีพื้น. (A METHOD TO MEASURE THE COLOR OF THE PRINTED BANKNOTES USING DIGITAL IMAGE PROCESSING TO OPTIMIZE PRINT QUALITY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสฤษดิ์วัฒนา, 75 หน้า.

การตรวจสอบคุณภาพแผ่นพิมพ์ธนบัตรถือเป็นขั้นตอนสำคัญขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตธนบัตร เพื่อให้ธนบัตรที่จะนำออกใช้มีคุณภาพตามมาตรฐาน แผ่นพิมพ์ธนบัตรทุกแผ่นและธนบัตรทุกฉบับจะผ่านการตรวจสอบคุณภาพอย่างละเอียด และผ่านการตรวจนับจำนวนทุกขั้นตอนการผลิตตั้งแต่กระดาษเปล่าจนตัดเป็นธนบัตรสำเร็จรูป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอวิธีตรวจสอบสีในแผ่นพิมพ์ธนบัตร วิธีการที่เสนอได้เปรียบเทียบกับ เซปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่เป็นเครื่องวัดสีมาตรฐานเพื่อความแม่นยำของการวัดสี วิธีที่นำเสนอทำให้กระบวนการตรวจสอบเร็วขึ้น สามารถใช้ขณะที่พิมพ์ในเวลาจริง

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5571011421 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEYWORDS: MEASURING COLOR / CIELAB COLOR MODEL

PAIROJ KLYPETCH: A METHOD TO MEASURE THE COLOR OF THE PRINTED BANKNOTES USING DIGITAL IMAGE PROCESSING TO OPTIMIZE PRINT QUALITY. ADVISOR: PROFESSOR PH.D. PRABHAS CHONGSTITVATTANA, 75 pp.

The quality control of printed banknotes is an important step in the printing process. To ensure a standard quality, every bank sheets pass through a rigorous quality inspection and counting procedure in all steps of production, from a blank sheet to the final banknote.

This thesis proposes a method to monitor the color of the printed sheets using a digital camera. The method is calibrated with a standard spectrophotometer to ensure accurate color measurement. The proposed method will allow a faster inspection process and can be applied to real-time printing production.

Department: Computer Engineering Student's Signature

Field of Study: Computer Science Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงของ ศ.ดร. ประภาส จงสฤษดิ์วัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งได้ให้โอกาส ความรู้และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนความเมตตาและความอดทนในการตรวจผลงานของข้าพเจ้า ได้แก่ โครงร่างวิทยานิพนธ์ ผลงานวิจัยภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และวิทยานิพนธ์ ทำให้ผลงานทุกชิ้นสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมถึงความเมตตาและความเอาใจใส่มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณครอบครัว ได้แก่ บิดา มารดาและภรรยา ที่สนับสนุนให้กำลังใจ ทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้นเรียนสาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์และวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาคนอกเวลาราชการทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและแจ้งข่าวสารของมหาวิทยาลัยที่เป็นประโยชน์ รวมถึงมิตรภาพและกำลังใจที่มีให้เสมอ

สารบัญ

หน้า

| | |
|----------------------------------|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| รายการอ้างอิง | 73 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 75 |

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 1. บทนำ..... | 7 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 7 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 11 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 12 |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย..... | 12 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 12 |
| 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 13 |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..... | 13 |
| 2.1.1 แสง (Light) | 13 |
| 2.1.2 การรับรู้สีของมนุษย์ (Color Perception)..... | 15 |
| 2.1.3 ระบบสี (Color Model)..... | 19 |
| 2.1.4 เครื่องมือวัดค่าสี (Color Measure Instrument) | 22 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 24 |
| 3. แนวคิดและวิธีดำเนินการวิจัย..... | 26 |
| 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... | 26 |
| 3.2 การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย..... | 31 |
| 3.2.1 การสอบเทียบ Spectrophotometer..... | 33 |
| 3.2.2 การสอบเทียบระบบประมวลผลภาพ | 34 |
| 3.2.3 วิเคราะห์ผลสอบเทียบ Spectrophotometer | 38 |
| 3.2.4 วิเคราะห์ผลสอบเทียบระบบประมวลผลภาพ | 44 |
| 4. การดำเนินงานวิจัย | 48 |
| 4.1 การควบคุมคุณภาพสีแผ่นพิมพ์ธนบัตร..... | 49 |
| 4.2 การเก็บตัวอย่างแถบควบคุมสี..... | 50 |

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.3 การวัดค่าสีแถบควบคุมสีด้วย SpectroDrive | 51 |
| 4.4 การวัดค่าสีแถบควบคุมสีด้วยระบบประมวลผลภาพ..... | 52 |
| 4.5 ขั้นตอนการฝึก..... | 60 |
| 4.6 ขั้นตอนการทดสอบ..... | 65 |
| 4.7 สรุปผลงานวิจัย..... | 66 |
| 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 69 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 69 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ..... | 70 |
| รายการอ้างอิง..... | 71 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 74 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell | 40 |
| ตารางที่ 3.2 ค่ามัธยฐานและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแผ่นสี Munsell กับ SpectroDrive | 41 |
| ตารางที่ 3.3 ค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ระหว่างแผ่นสี Munsell กับ SpectroDrive | 43 |
| ตารางที่ 3.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแถบสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ..... | 45 |
| ตารางที่ 3.5 ค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ระหว่างแผ่นสี Munsell กับระบบประมวลผลภาพ..... | 47 |
| ตารางที่ 4.1 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแถบควบคุมสีด้านหน้าวัดค่าสีด้วย SpectroDrive | 55 |
| ตารางที่ 4.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแถบควบคุมสีด้านหลังวัดค่าสีด้วย SpectroDrive | 56 |
| ตารางที่ 4.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแถบควบคุมสีด้านหน้าวัดค่าสีด้วยระบบประมวลผลภาพ | 57 |
| ตารางที่ 4.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแถบควบคุมสีด้านหลังวัดค่าสีด้วยระบบประมวลผลภาพ | 58 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 | 61 |
| ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบการวัดค่าสีตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหน้า | 67 |
| ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบการวัดค่าสีตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหลัง | 68 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 1.1 เครื่องพิมพ์สีพื้น..... | 8 |
| ภาพที่ 1.2 แผ่นพิมพ์ชนบัตรที่ผ่านการพิมพ์สีพื้นด้านหน้า..... | 8 |
| ภาพที่ 1.3 เครื่องพิมพ์เส้นนูน..... | 8 |
| ภาพที่ 1.4 แม่พิมพ์เส้นนูน..... | 9 |
| ภาพที่ 1.5 แผ่นพิมพ์ชนบัตรที่ผ่านการพิมพ์เส้นนูน..... | 9 |
| ภาพที่ 1.6 ตัวเลขแฝงปรากฏเมื่อพลิกเอียงชนบัตร..... | 9 |
| ภาพที่ 1.7 ตัวเลข 500 ขนาดจิ๋ว | 10 |
| ภาพที่ 1.8 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นตัวเลข 100 ที่สมบูรณ์... | 10 |
| ภาพที่ 1.9 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นรูปดอกพุดตานที่สมบูรณ์ | 10 |
| ภาพที่ 1.10 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นรูปดอกบัวที่สมบูรณ์..... | 11 |
| ภาพที่ 2.1 แสดงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงต่างๆ..... | 14 |
| ภาพที่ 2.2 ความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น..... | 14 |
| ภาพที่ 2.3 สีปฐมภูมิและสีทุติยภูมิ..... | 15 |
| ภาพที่ 2.4 มาตรฐานการส่องสว่าง D50..... | 16 |
| ภาพที่ 2.5 มาตรฐานการส่องสว่าง D65..... | 16 |
| ภาพที่ 2.6 มาตรฐานการส่องสว่าง F7..... | 17 |
| ภาพที่ 2.7 แสดงการสะท้อนแสงแบบ Specular และ Diffuse | 17 |
| ภาพที่ 2.8 แสดงเซลล์ประสาทรับแสงในดวงตา..... | 18 |
| ภาพที่ 2.9 แสดงคอนเซลล์รับรู้แสงสีแดง เขียวและน้ำเงิน..... | 18 |
| ภาพที่ 2.10 Standard Observer 2° และ 10° | 19 |
| ภาพที่ 2.11 ระบบสี CYMK Color Model | 20 |
| ภาพที่ 2.12 ระบบสี RGB Color Mode | 20 |
| ภาพที่ 2.13 ระบบสี CIE Lab Color Model | 21 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบสีอิงอุปกรณ์ (RGB) และสีไม่อิงอุปกรณ์ (CIE Lab)..... | 22 |
| ภาพที่ 2.15 หลักการทำงานของ Reflection Densitometer | 23 |
| ภาพที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องมือ Colorimeter | 23 |
| ภาพที่ 2.17 หลักการทำงานของเครื่องมือ Spectrophotometer | 24 |
| ภาพที่ 3.1 กล้อง Canon EOS 40D | 26 |
| ภาพที่ 3.2 การบันทึกภาพในห้องควบคุมสภาวะแสง..... | 27 |
| ภาพที่ 3.3 โปรแกรม ImageJ ใช้ในการแบ่งส่วนของภาพ (Image Segmentation) | 28 |
| ภาพที่ 3.4 ภาพ ROI บันทึกในระบบสี sRGB | 28 |
| ภาพที่ 3.5 โปรแกรม Matlab R2013a ที่ใช้ในการแปลงค่าระบบสี | 29 |
| ภาพที่ 3.6 แผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker | 30 |
| ภาพที่ 3.7 แผ่นสีมาตรฐาน Munsell มีค่าสีระบบ sRGB และค่าสีระบบ CIE Lab | 30 |
| ภาพที่ 3.8 เครื่องมือ Spectrophotometer ยี่ห้อ Techkon รุ่น SpectroDrive | 31 |
| ภาพที่ 3.9 แสดงองค์ประกอบของการสอบเทียบ | 31 |
| ภาพที่ 3.10 แสดงการส่งต่อความถูกต้องของการวัดที่ยอมรับได้ | 32 |
| ภาพที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการวัดค่าสีด้วย Spectrophotometer | 33 |
| ภาพที่ 3.12 โปรแกรม ImageJ ที่ใช้ในการใช้แบ่งส่วนของภาพ ROI | 35 |
| ภาพที่ 3.13 ภาพ ROI ของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell | 35 |
| ภาพที่ 3.14 ภาพแผ่นสีมาตรฐาน Munsell | 40 |
| ภาพที่ 3.15 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผ่นสี Munsell กับ SpectroDrive ... | 42 |
| ภาพที่ 3.16 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างแผ่นสี Munsell กับระบบ ประมวลผลภาพ | 46 |
| ภาพที่ 4.1 เครื่องมือ SpectroDrive และแถบควบคุมสี | 48 |
| ภาพที่ 4.2 แผ่นพิมพ์ตัวอย่างและแถบควบคุมสีด้านล่าง | 49 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 4.3 โปรแกรม ExPresso ที่ใช้ประมวลผลค่าสีของแผ่นพิมพ์ | 50 |
| ภาพที่ 4.4 แถบควบคุมสี ด้านหน้า มีจุดสีที่ต้องอ่านค่าสี จำนวน 5 จุด | 51 |
| ภาพที่ 4.5 แถบควบคุมสี ด้านหลัง มีจุดสีที่ต้องอ่านค่าสี จำนวน 6 จุด | 51 |
| ภาพที่ 4.6 ภาพแถบควบคุมสีแถบควบคุมสี | 53 |
| ภาพที่ 4.7 โปรแกรม ImageJ ใช้แบ่งส่วนของภาพและบันทึกภาพ ROI | 54 |
| ภาพที่ 4.8 ภาพ ROI จุดสีบนแถบควบคุมสี | 54 |
| ภาพที่ 4.9 Interpolation | 59 |
| ภาพที่ 4.10 ขั้นตอนการฝึก แนวเส้นสีฟ้า | 60 |
| ภาพที่ 4.11 การประมาณค่าในช่วง Channel L แถบควบคุมสีด้านหน้า | 62 |
| ภาพที่ 4.12 การประมาณค่าในช่วง Channel a แถบควบคุมสีด้านหน้า | 62 |
| ภาพที่ 4.13 การประมาณค่าในช่วง Channel b แถบควบคุมสีด้านหน้า | 63 |
| ภาพที่ 4.14 การประมาณค่าในช่วง Channel L แถบควบคุมสีด้านหลัง | 64 |
| ภาพที่ 4.15 การประมาณค่าในช่วง Channel a แถบควบคุมสีด้านหลัง | 64 |
| ภาพที่ 4.16 การประมาณค่าในช่วง Channel b แถบควบคุมสีด้านหลัง | 65 |
| ภาพที่ 4.17 ขั้นตอนการทดสอบ เส้นสีแดง | 65 |

บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยนำธนบัตรออกใช้เป็นครั้งแรก เมื่อพุทธศักราช ๒๔๔๕ ตามพระราชบัญญัติธนบัตรสยามรัตนโกสินทร ศก ๑๒๑ โดยมีกระทรวงพระคลังมหาสมบัติ (กระทรวงการคลัง ในปัจจุบัน) เป็นหน่วยงานที่ทำหน้าที่ควบคุม ดูแล การสั่งพิมพ์และนำออกใช้ธนบัตรภายในประเทศ จนกระทั่ง มีการจัดตั้งธนาคารแห่งประเทศไทยขึ้นเมื่อพุทธศักราช ๒๔๘๕ กิจการทั้งปวงและอำนาจในการดำเนินการเกี่ยวกับธนบัตร จึงถูกโอนมาอยู่ในความดูแลรับผิดชอบของธนาคารแห่งประเทศไทย ต่อมาเมื่อพุทธศักราช ๒๕๑๒ ธนาคารแห่งประเทศไทย สามารถจัดตั้งโรงพิมพ์ธนบัตรขึ้นเป็นผลสำเร็จ จึงได้พิมพ์ธนบัตรขึ้นใช้เองภายในประเทศ ได้แก่ ธนบัตรแบบ ๑๑ รวมทั้งแบบอื่น ๆ เป็นลำดับ

ปัจจุบันโรงพิมพ์ธนบัตร อำเภอนครชัยศรี สร้างเสร็จสมบูรณ์และทำพิธีเปิดอย่างเป็นทางการ เมื่อวันที่ ๑๕ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๕๐ ในการนี้ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินแทนพระองค์มาทรงเปิดโรงพิมพ์ธนบัตร ยังความปลื้มปิติอย่างหาที่สุคติได้ และนับเป็นมงคลยิ่งสำหรับการผลิตธนบัตรซึ่งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศสืบไป

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพิมพ์ธนบัตรประกอบด้วยการพิมพ์ภาพและลวดลายต่าง ๆ ด้วยกรรมวิธีการพิมพ์ 2 แบบ คือ การพิมพ์ออฟเซตแห้ง (Dry offset) หรือเรียกตามลักษณะลวดลายว่า การพิมพ์สีพื้น และการพิมพ์อินทาลโย (Intaglio) หรือเรียกตามลักษณะลวดลายที่ได้จากการพิมพ์ว่า การพิมพ์เส้นนูน นอกจากนี้ ยังมีการพิมพ์อีกขั้นตอนหนึ่งก่อนการผลิตเป็นธนบัตรสำเร็จรูป คือ การพิมพ์เลขหมายและลายเซ็น ซึ่งใช้การพิมพ์เลตเตอร์เพรสส์ (Letterpress) [1]

1) การพิมพ์สีพื้น เป็นงานขั้นตอนแรกของการพิมพ์ธนบัตร โดยใช้เครื่องพิมพ์ที่สามารถพิมพ์ภาพได้ทั้งสองด้านในเวลาเดียวกัน ทำให้บางส่วนของลวดลายที่ตั้งใจออกแบบไว้ในตำแหน่งตรงกันทั้งด้านหน้าและด้านหลังของธนบัตรซ้อนทับกันสนิท หรือประกอบขึ้นเป็นลวดลายที่สมบูรณ์ สามารถสังเกตได้ด้วยการยกธนบัตรขึ้นส่องดูกับแสงแสงสว่าง ซึ่งเป็นลักษณะต่อต้านการปลอมแปลงอย่างหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะต่อต้านการปลอมแปลงอย่างหนึ่ง ลักษณะต่อต้านการปลอมแปลงในวัสดุพิมพ์



ภาพที่ 1.1 เครื่องพิมพ์สี่พื้น



ภาพที่ 1.2 แผ่นพิมพ์ธนบัตรที่ผ่านการพิมพ์สี่พื้นด้านหน้า

2) การพิมพ์เส้นนูน เป็นการพิมพ์ภาพและลวดลายต่าง ๆ ด้วยเครื่องพิมพ์แบบพิเศษที่ใช้แรงกดพิมพ์สูงและหมึกพิมพ์ซึ่งมีความเหนียวหนืดสูง เพื่อทำให้หมึกพิมพ์กองนูนบนผิวกระดาษ ทำให้ได้รายละเอียดและความอึดตัวสีสูง เหมาะกับการพิมพ์ภาพประธานและส่วนที่ต้องการเน้นให้เด่นและคมชัด เช่น พระบรมฉายาสาทิสลักษณ์ และตัวเลขแจ้งราคาด้านหลังธนบัตร เป็นต้น ซึ่งหากใช้ปลายนิ้วมือลูบสัมผัสผ่านเบา ๆ จะรู้สึกได้ถึงความนูนนั้น นับเป็นลักษณะต่อต้านการปลอมแปลงที่สำคัญยิ่งในการผลิตธนบัตรและสิ่งพิมพ์มีค่าอื่น



ภาพที่ 1.3 เครื่องพิมพ์เส้นนูน



ภาพที่ 1.4 แม่พิมพ์เส้นนูน



ภาพที่ 1.5 แผ่นพิมพ์ธนบัตรที่ผ่านการพิมพ์เส้นนูน

ลวดลายของธนบัตรประกอบด้วยเส้นที่มีลักษณะคมชัด สวยงามและมีความละเอียดซับซ้อน โดยเฉพาะภาพประธานด้านหน้าและด้านหลังของธนบัตรซึ่งเป็นภาพที่เกิดจากงานแกะโลหะสำหรับงานพิมพ์เส้นนูนที่มีรายละเอียดมากเป็นพิเศษ นอกจากนี้ ยังมีลักษณะต่อต้านการปลอมแปลงอื่น ๆ ในลวดลายธนบัตรอีก อาทิ

ภาพแฝง เป็นตัวเลขที่ซ่อนอยู่ในลวดลายเส้นนูน ไม่สามารถมองเห็นในแนวราบปกติ แต่จะมองเห็นได้เมื่อพลิกเอียงธนบัตรในมุมมองที่เหมาะสม



ตัวเลขแฝงที่ปรากฏ
เมื่อพลิกเอียงธนบัตร
ในมุมมองที่เหมาะสม

ภาพที่ 1.6 ตัวเลขแฝงปรากฏเมื่อพลิกเอียงธนบัตร

ตัวเลขและตัวอักษรขนาดจิ๋ว ลวดลายของธนบัตรประกอบด้วยลายเส้นที่มีลักษณะคมชัด สวยงาม และมีความละเอียดซับซ้อนสูง โดยลวดลายบางส่วนออกแบบให้มีตัวเลขหรือตัวอักษรขนาดจิ๋วซ่อนไว้อย่างกลมกลืน เพื่อให้ยากต่อการปลอมแปลง จะมองเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้แว่นขยาย



ภาพที่ 1.7 ตัวเลข 500 ขนาดจิ๋ว จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อใช้แว่นขยาย

ภาพซ้อนทับ เกิดจากเครื่องพิมพ์ที่สามารถพิมพ์ภาพได้ทั้งสองด้านในเวลาเดียวกัน ทำให้ลวดลายที่ออกแบบไว้ในตำแหน่งตรงกันทั้งด้านหน้าและด้านหลังซ้อนทับกันสนิท หรือประกอบกันขึ้นเป็นลวดลายหรือภาพที่สมบูรณ์ สามารถสังเกตได้ด้วยการยกธนบัตรขึ้นส่องดูกับแสงแสงสว่าง



ภาพที่ 1.8 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นตัวเลข 100 ที่สมบูรณ์



ภาพที่ 1.9 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นรูปดอกพุดตานที่สมบูรณ์



ภาพที่ 1.10 ลวดลายทั้งสองด้านเมื่อส่องกับแสงสว่างจะซ้อนทับกันเป็นรูปดอกบัวที่สมบูรณ์

ปัจจุบันในขั้นตอนการพิมพ์สีพื้นมีการควบคุมคุณภาพสีของแผ่นพิมพ์ธนบัตร ด้วยการตรวจวัดค่าสีหมึกพิมพ์ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 ใช้เครื่องมือ Spectrophotometer ตรวจวัดค่าสีหมึกพิมพ์ เปรียบเทียบกับค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน โดยวิธีการวัดค่าสีแถบควบคุมสี (Color Bar) ซึ่งอยู่บริเวณด้านล่างของแผ่นพิมพ์ ด้วยมาตรฐานระบบสี CIELab

วิธีที่ 2 เจ้าหน้าที่ผู้ตรวจสอบแผ่นพิมพ์ด้วยสายตา(Visual Inspection) เปรียบเทียบกับแผ่นพิมพ์มาตรฐาน เพื่อตรวจสอบความเข้มจางของสีและสิ่งผิดปกติอื่นๆ

วิธีการตรวจสอบดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrophotometer เป็นการตรวจสอบแบบสุ่มไม่สามารถตรวจสอบแผ่นพิมพ์ทุกแผ่นในขั้นตอนการผลิต และการตรวจด้วยสายตาต้องใช้เวลาในการตรวจสอบ เจ้าหน้าที่ อาจเกิดอาการอ่อนล้า ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการปฏิบัติงาน มีผลทำให้ผลผลิตไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานเกิดความสูญเสีย

การประมวลผลภาพ ด้านสี ขนาด รูปร่างของวัตถุ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณถูกนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของพืชผลทางการเกษตร เป็นต้น

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการควบคุมคุณภาพสีของแผ่นพิมพ์ธนบัตร โดยการวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ธนบัตร ด้วยการประมวลผลภาพ(Image Processing) เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ทุกแผ่นในขั้นตอนการพิมพ์สีพื้นได้อย่างต่อเนื่อง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงาน ปัจจุบันการประมวลผลภาพ ด้านสี ขนาด รูปร่างของวัตถุ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณถูกนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของพืชผลทางการเกษตร เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาวิธีการวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ธนบัตร ด้วยการประมวลผลภาพ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์สีพื้น

- 2) สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปพัฒนาระบบวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรแบบทันกาล เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรทุกแผ่นในกระบวนการผลิต
- 3) เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์สีพื้น มีผลทำให้ลดความเสียหายและต้นทุนในการผลิตธนบัตร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) จัดเตรียมระบบประมวลผลภาพ ซึ่งประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง กล้องบันทึกภาพดิจิทัล โปรแกรมประมวลผลภาพ รวมทั้งการควบคุมสภาพแวดล้อมของระบบฯ ให้คงที่ ลดการรบกวนจากปัจจัยภายนอก เพื่อให้มีสถานะในการบันทึกภาพที่เหมาะสม
- 2) สอบเทียบระบบกับเครื่องมือมาตรฐาน Spectrophotometer โดยวัดค่าสีแผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker ยี่ห้อ X-rite ในระบบสี CIE Lab
- 3) เปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าสีของแผ่นพิมพ์ธนบัตร ระหว่าง เครื่องมือ Spectrophotometer กับภาพดิจิทัล

1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย

- 1) ศึกษาและทบทวนการตรวจสอบคุณภาพขั้นตอนงานพิมพ์สีพื้น
- 2) ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งาน
- 3) จัดเตรียมระบบประมวลผลด้วยภาพถ่ายดิจิทัลและการสอบเทียบเครื่องมือ
- 4) เก็บตัวอย่าง Color Bar และวัดค่าสี
- 5) ทดลอง เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการวัดค่าสีระหว่างเครื่องมือที่ใช้งานวิจัย
- 6) สรุปผลงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้วิธีการต้นแบบในการวัดค่าสีแผ่นพิมพ์ธนบัตร ทำให้สามารถตรวจสอบแผ่นพิมพ์ทุกแผ่นในกระบวนการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงาน
- 2) ช่วยลดปริมาณแผ่นพิมพ์ชำรุดในกระบวนการผลิตธนบัตรและมีผลทำให้ลดต้นทุนในการผลิต
- 3) สามารถนำวิธีการดังกล่าวไปใช้ในการพัฒนาระบบ Machine Vision ติดตั้งใช้งานกับเครื่องจักรเป็นการทำงานแบบเวลาจริง

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1 แสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้ง คลื่น และอนุภาค เมื่อกล่าวถึงแสงในคุณสมบัติของอนุภาคเรียกว่าโฟตอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีมวล ส่วนคุณสมบัติความเป็นคลื่นเรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระยะห่างระหว่างยอดคลื่นหนึ่งกับอีกยอดคลื่นหนึ่ง คือ ความยาวคลื่นมีหน่วยนับเป็นนาโนเมตรหนึ่งส่วนล้าน

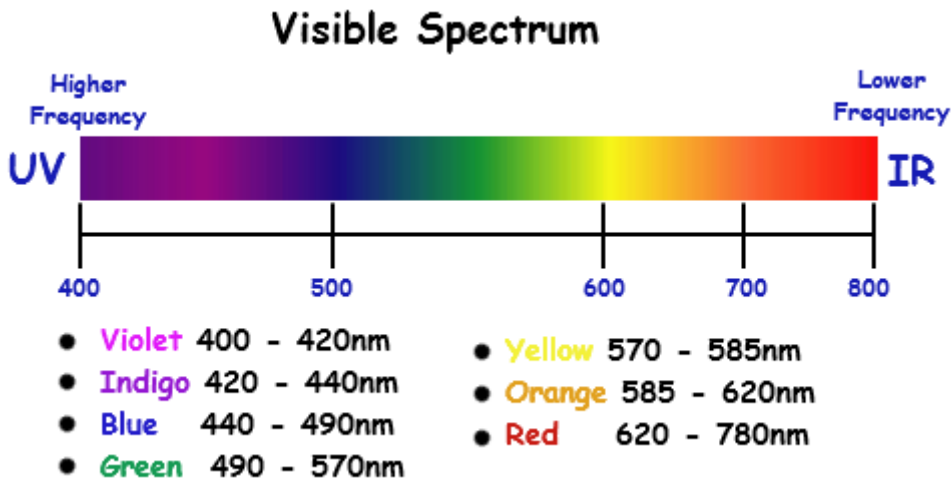
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วย รังสี แสง และคลื่นต่างๆ กระจายไปตามความถี่ต่างๆ ของแถบสเปกตรัม (Electromagnetic Spectrum) นอกจากแสงที่ตามองเห็นแล้วยังมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทอื่นๆ ซึ่งเรียงลำดับตามความยาวคลื่นได้ ดังนี้ [2],[3]

- 1) รังสีแกมมา (Gamma ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.01 นาโนเมตร โฟตอนของรังสีแกมมามีพลังงานสูงมาก กำเนิดจากแหล่งพลังงานนิวเคลียร์ เช่น ดาวระเบิด หรือ ระเบิดปรมาณู เป็นอันตรายมากต่อสิ่งมีชีวิต
- 2) รังสีเอ็กซ์ (X-ray) มีความยาวคลื่น 0.01 - 1 นาโนเมตร มีแหล่งกำเนิดในธรรมชาติมาจากดวงอาทิตย์ เราใช้รังสีเอ็กซ์ในทางการแพทย์ เพื่อส่องผ่านเซลล์เนื้อเยื่อ แต่ถ้าได้ร่างกายได้รับรังสีนี้มากๆ ก็จะเป็นอันตราย
- 3) รังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) มีความยาวคลื่น 1 - 400 นาโนเมตร รังสีอุลตราไวโอเล็ตมีอยู่ในแสงอาทิตย์ เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย แต่หากได้รับมากเกินไปก็จะทำให้ผิวไหม้ และอาจทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง
- 4) แสงที่ตามองเห็น (Visible light) มีความยาวคลื่น 380 - 750 นาโนเมตร พลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ ส่วนมากเป็นรังสีในช่วงนี้ แสงแดดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลก และยังช่วยในการสังเคราะห์แสงของพืช
- 5) รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) มีความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร - 1 มิลลิเมตร โลกและสิ่งมีชีวิตแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา ก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ในบรรยากาศดูดซับรังสีนี้ไว้ ทำให้โลกมีความอบอุ่น เหมาะกับการดำรงชีวิต
- 6) คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) มีความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร - 10 เซนติเมตร ใช้ประโยชน์ในด้านโทรคมนาคมระยะไกล นอกจากนั้นยังนำมาประยุกต์สร้างพลังงานในเตาอบอาหาร
- 7) คลื่นวิทยุ (Radio wave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด คลื่นวิทยุสามารถเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศได้ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการสื่อสารโทรคมนาคม



ภาพที่ 2.1 แสดงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงต่างๆ

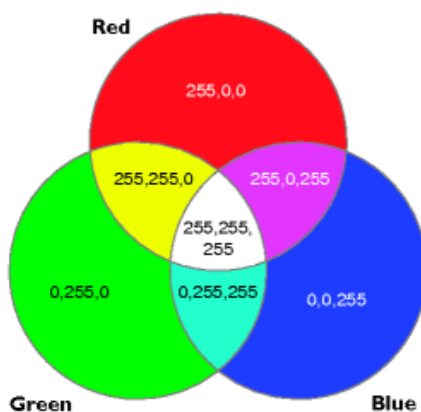
แสงที่มนุษย์มองเห็น(Visible Spectrum) เป็นแสงสีขาว (Light White) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380 – 750 นาโนเมตร เมื่อส่องผ่านแท่งแก้วปริซึม จะเกิดการหักเหให้แสงสีรุ้ง จำนวน 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง ซึ่งเกิดจากความยาวคลื่นและแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน โดยมีความยาวคลื่น เป็นตัวกำหนดสี (Hue) และแอมพลิจูด เป็นตัวกำหนดความสว่างของสี (Brightness)



ภาพที่ 2.2 ความยาวคลื่นแสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น

นักฟิสิกส์ชาวสก็อต Jame Clerk Maxwell ได้ค้นพบว่า แสงสีขาวประกอบด้วยแสงสีหลัก 3 สี คือ แสงสีแดง แสงสีเขียวกและแสงสีน้ำเงิน ถ้าสีมีความเข้มมากพอ เมื่อนำมาผสมกันในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะทำให้เกิดเป็นสีขาว เรียกว่า สีปฐมภูมิ (Primary Color) หรือ การผสมสีแบบบวก (Additive Color)

หากนำสีปฐมภูมิมาผสมกันในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะทำให้เกิดเป็นสี เรียกว่า สีทุติยภูมิ (Secondary Color) หรือ การผสมแสงสีแบบลบ (Subtractive Color) ได้แก่ สีฟ้า(Cyan) สีแดงม่วง (Magenta) และสีเหลือง(Yellow)



ภาพที่ 2.3 สีปฐมภูมิและสีทุติยภูมิ

2.1.2 การรับรู้สีของมนุษย์ (Color Perception)

มนุษย์มองเห็นวัตถุและสีต่างๆ เกิดจากปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ได้แก่

1) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) สามารถแบ่งตามการเกิดได้ 2 ประเภท คือ

แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ (Natural Light Source) เช่น แสงแดดจากดวงอาทิตย์ ที่มีคุณภาพและพลังงานของแสงแตกต่างกันในลักษณะที่ปรากฏในช่วงวันและเวลาของปีได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับสภาพอากาศแสงมีที่มาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่น ดวงอาทิตย์

แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ (Illuminants) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

แสงที่เกิดจากการเผาหรือการให้ความร้อน (Incandescence) เช่น การเผาแท่งเหล็กที่ ความร้อนสูงมากๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยๆ แท่งเหล็กจะเปลี่ยนสีส้มและเหลืองจ้าสว่างในที่สุด

แสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี, แสงที่เกิดจากการเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอน รวมไปถึงแสงที่เกิดจากการปล่อยประจุของก๊าซ (Luminescence) เช่น แสงจากตัวแมลง, แสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี, แสงที่เกิดจากการเปลี่ยนวงโคจรของอิเล็กตรอน รวมไปถึงแสงที่เกิดจากการปล่อยประจุของ ก๊าซ เช่นแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

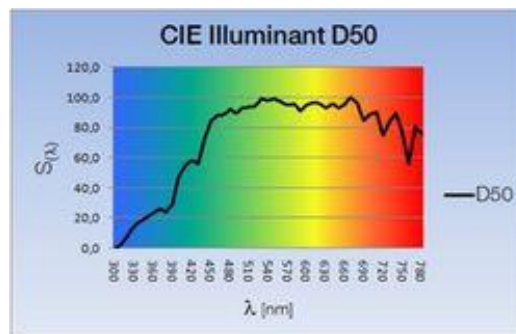
องค์กร CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) เป็นหน่วยงานที่ก่อตั้งขึ้นใน 1931 ได้กำหนดมาตรฐานการส่องสว่าง เรียกว่า Standard Illuminants โดยแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้ [4]

Illumination A การส่องสว่างจากหลอดไฟแบบไส้ (Incandescent Lighting) มีอุณหภูมิสี (Color Temperature) ประมาณ 2856 เคลวิน (Kelvin: K)

Illumination B แสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง มีอุณหภูมิสี ประมาณ 4874 K

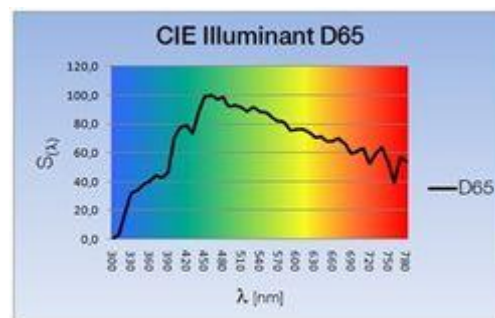
Illumination C แสงจากดวงอาทิตย์โดยตรง มีอุณหภูมิสี ประมาณ 6774 K

Illumination D50: ประกาศใช้ครั้งแรกในปี 1974 และในปี 1975 ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO: 3664, แสงสว่าง D50 ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพิมพ์และศิลปะภาพพิมพ์อุตสาหกรรม มีอุณหภูมิสี (Color Temperature) ประมาณ 5003 เคลวิน (Kelvin: K)



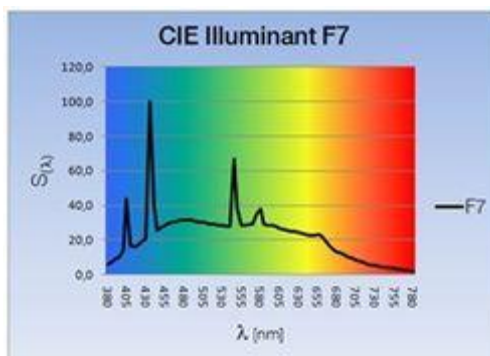
ภาพที่ 2.4 มาตรฐานการส่องสว่าง D50

Illumination D65: ประกาศใช้ครั้งแรกในปี 1964, D65 ได้กลายเป็นมาตรฐานแสงเวลากลางวัน (ค่าเฉลี่ยแสงตอนกลางวันจากท้องฟ้าทั่วโลกเหนือ) ใช้อ้างอิงในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ และอ้างอิงใน ISO: 3668, ASTM 1729 และ DIN6173-2 มีอุณหภูมิสีประมาณ 6504K และ D65 เป็นแสงมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสี



ภาพที่ 2.5 มาตรฐานการส่องสว่าง D65

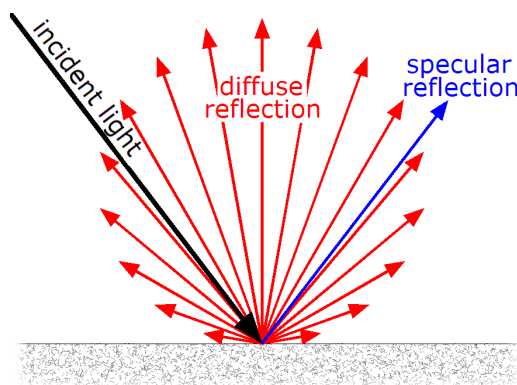
Illumination F1 - F12: หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp) CIE กำหนดหลอดไฟเรืองแสง 12 แบบโดยมีชื่อ F1-F12 มีความแตกต่างกันในด้านก๊าซที่ใช้งาน และ Phosphors แบบ F7 เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมสำหรับการประเมินคุณภาพด้านสี เพราะมีอุณหภูมิสีประมาณ 6500K ใกล้เคียงกับแสง D65



ภาพที่ 2.6 มาตรฐานการส่องสว่าง F7

2) วัตถุมีสี

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเมื่อตกกระทบวัตถุที่มีพื้นผิวมันวาว จะเกิดการสะท้อนแสง เรียกว่า การสะท้อนที่สมบูรณ์ (Specular Reflection) ถ้าวัตถุมีพื้นผิวไม่เรียบ ไม่มีความมันวาว เมื่อแสง ส่องกระทบวัตถุนั้นจะเกิด การกระเจิงของแสง(Diffuse Reflection) อนุภาคของสีในบางช่วงคลื่นจะ ถูกดูดกลืนเอาไว้ บางช่วงคลื่นจะถูกสะท้อนออกมาทำให้เกิดการมองเห็นสีแตกต่างกันตามความยาว ช่วงคลื่นที่มีการสะท้อนออกมา นอกจากจะมีการสะท้อน และการดูดกลืนในบางช่วงของคลื่นแสงแล้ว ยังมีการส่องผ่านของแสงบนวัตถุโปร่งแสง และเกิดการกระเจิงของแสงที่พื้นผิว ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า(Diffuse Transmission) แต่ถ้าเป็นวัตถุที่มีความโปร่งใส เช่น กระจกใสจะเกิดการส่องผ่าน ทะลุวัตถุโปร่งใสนั้น เป็นปรากฏการณ์ ที่เรียกว่า Regular transmission



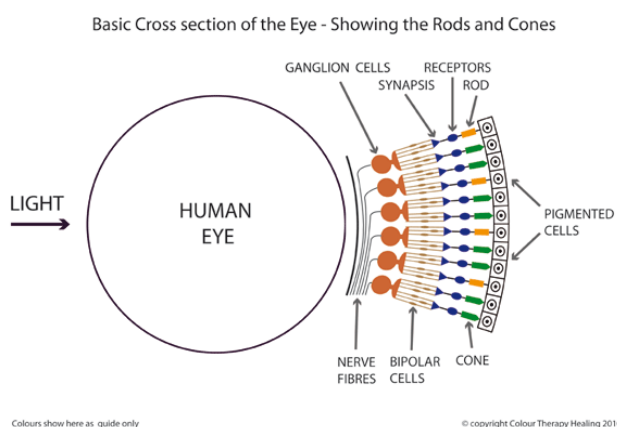
ภาพที่ 2.7 แสดงการสะท้อนแสงแบบ Specular และ Diffuse

3) ผู้สังเกตการณ์ (Observer)

การมองเห็นสีของนัยน์ตาเกิดจากการรับแสงสะท้อนจากวัตถุเข้าสู่ประสาทรับความรู้สึกของ ตาที่เรียกว่า เรติน่า (Retina) ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ประสาทสองชนิด คือ รอดเซลล์ (Rod Cells) มี รูปร่างเป็นแท่งมีความไวต่อสภาพแสงน้อย สามารถรับรู้ในสภาพแสงมืดสลัวได้ดี รับรู้ถึงระดับน้ำหนัก

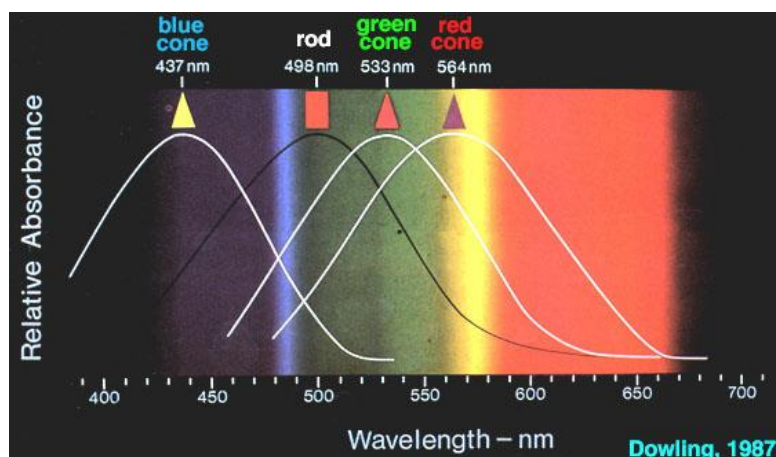
ของสีขาว-เทา-ดำ เซลล์รอดจึงให้ระดับน้ำหนักรายของภาพขาว-ดำได้ดี ในดวงตามนุษย์มี Rod Cells ประมาณ 120 ล้าน เซลล์

เซลล์ประสาทชนิดที่สอง คือ โคนเซลล์ (Cone Cells) มีรูปร่างเป็นรูปกรวยมีความไวต่อแสงสว่างและสามารถรับรู้ถึงสีต่างๆ แต่ในที่ที่มีแสงสว่างน้อยหรือมืดสลัวเซลล์โคนจะมีปฏิกิริยาช้ามาก โคนเซลล์มีจำนวนประมาณ 6 - 7 ล้านเซลล์ โคนเซลล์แบ่งตามความสามารถในการรับรู้สีได้ 3 ประเภท คือ โคนเซลล์แบบสั้น (Short Wavelength Cones) รับรู้แสงสีฟ้า โคนเซลล์แบบกลาง (Middle Wavelength Cones) รับรู้แสงสีเขียว และโคนเซลล์แบบยาว (Long Wavelength Cones) รับรู้แสงสีแดง [5]



ภาพที่ 2.8 แสดงเซลล์ประสาทรับแสงในดวงตา

เซลล์ประสาททั้งสองจะแปรสัญญาณแสงที่ได้รับสู่เส้นใยประสาท (Optic Nerve) ผ่านสู่สมองรับรู้ การมองเห็นเนื้อสีและความสดใสของสีจะเปลี่ยนไปตามคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงและความเข้มของแสงที่เปลี่ยนไป

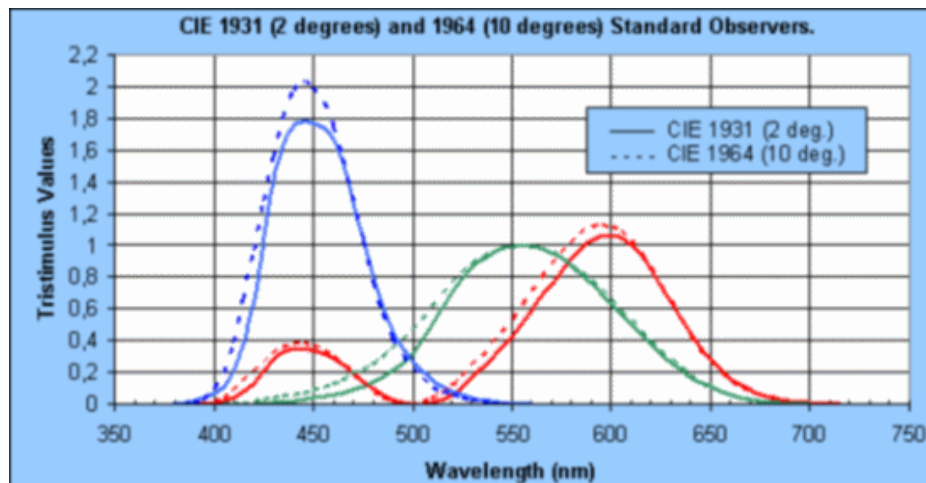


ภาพที่ 2.9 แสดงโคนเซลล์รับรู้แสงสีแดง เขียวและน้ำเงิน

องค์กร CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ได้กำหนดมาตรฐานการของผู้สังเกตการณ์ เรียกว่า Standard Observer เพื่อใช้ในการคำนวณค่า CIE Tristimulus Values หน่วยวัดค่าสีหน่วยแรกที่ใช้เป็นสากล โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

CIE 1931 2° Observer สำหรับการสังเกตวัตถุที่มีขนาดเล็ก

CIE 1964 10° Observer สำหรับการสังเกตวัตถุที่มีขนาดใหญ่

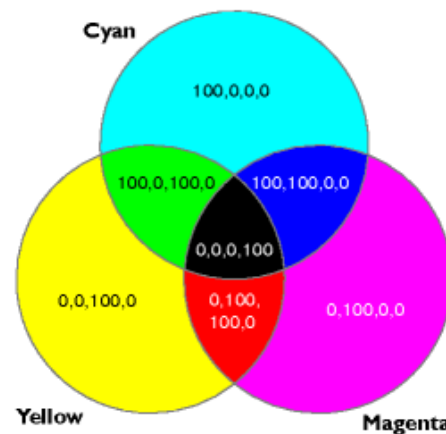


ภาพที่ 2.10 Standard Observer 2° และ 10°

2.1.3 ระบบสี (Color Model)

1) ระบบสี CMYK Color Model

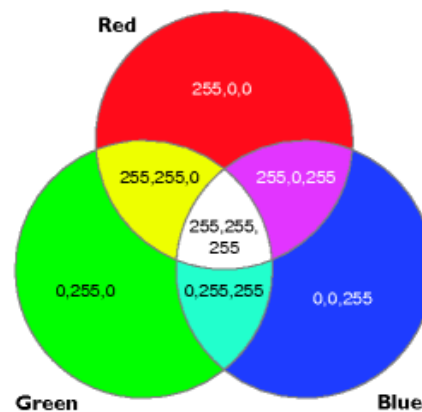
CMYK คือ ระบบสีที่อิงอุปกรณ์ (Device Dependent Color) ใช้กับงานพิมพ์ที่พิมพ์ออกทางกระดาษหรือวัสดุผิวเรียบอื่นๆ ตัวอย่างอุปกรณ์ เช่น เครื่องพิมพ์ชนิดต่างๆ เป็นต้น ระบบสี CMYK ประกอบด้วย สีหลัก 4 สี คือ สีฟ้า (Cyan), สีม่วงแดง (Magenta), สีเหลือง (Yellow) และสีดำ (Black) เมื่อนำมาผสมกันจะเกิดสีเป็นสีดำ แต่จะดำไม่สนิท เนื่องจากหมึกพิมพ์มีความไม่บริสุทธิ์ จึงเป็นการผสมสีแบบลบ (Subtractive) หลักการเกิดสีของระบบนี้ คือ หมึกสีหนึ่งจะดูดกลืนแสงจากสีหนึ่งแล้วสะท้อนกลับออกมาเป็นสีต่าง ๆ เช่น สีฟ้าดูดกลืนแสงของสีม่วงแล้วสะท้อนออกมาเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าสีที่สะท้อนออกมาจะเป็นสีหลักของระบบ RGB การเกิดสีในระบบนี้จึงตรงข้ามกับการเกิดสีในระบบ RGB [4]



ภาพที่ 2.11 ระบบสี CMYK Color Model

2) ระบบสี RGB Color Model

RGB Color Model คือ ระบบสีที่อิงอุปกรณ์ (Device Dependent Color) เช่น กล้องจอภาพ เป็นต้น ประกอบด้วยแม่สี 3 สี คือ แดง (Red), เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) เมื่อนำมาผสมผสานกันทำให้เกิดสีต่างๆ บนจอคอมพิวเตอร์ได้มากถึง 16.7 ล้านสี โดยเก็บข้อมูล 3 สีๆ ละ 8 Bit ซึ่งใกล้เคียงกับสีที่ตาเรามองเห็นปกติ สีที่ได้จากการผสมสีขึ้นอยู่กับความเข้มของสี โดยถ้าสีมีความเข้มมาก เมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดเป็นสีขาว จึงเรียกระบบสีนี้ว่าแบบ Additive หรือการผสมสีแบบบวก



ภาพที่ 2.12 ระบบสี RGB Color Mode

3) ระบบสี CIE Lab Color Model

CIE Lab คือ ระบบสีที่ไม่อิงอุปกรณ์ (Device Independent Color) เป็นระบบสีที่สัมพันธ์กับการมองเห็นของมนุษย์ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ใดๆ กล่าวคือเมื่อวัดค่าสีได้เท่ากันแล้ว อุปกรณ์ต่างๆ จะ

แสดงสีที่เห็นจะเหมือนกันในสภาวะแวดล้อมอย่างเดียวกัน เช่น กล้อง สแกนเนอร์ จอภาพ เครื่องพิมพ์ เป็นต้น

สถาบัน Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) พัฒนาระบบสี CIE Lab ในปี ค.ศ. 1976 ด้วยการใช้ตัวเลขในการแทนค่าสีต่างๆ ดังนี้

L (Lightness) ใช้กำหนดค่าความสว่าง-มืด $L = 0$ (White), $L = 100$ (Black)

a (Red – Green) ใช้กำหนดค่าสีแดงและสีเขียว

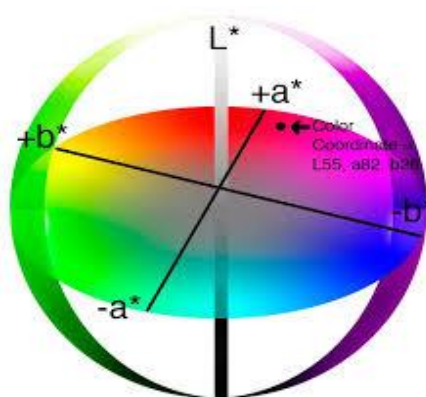
+a มีค่าเป็นบวก = สีแดง (Red)

-a มีค่าเป็นบวก = สีเขียว (Green)

b (Blue – Yellow) ใช้กำหนดค่าสีน้ำเงินและสีเหลือง

+b มีค่าเป็นบวก = สีเหลือง (Yellow)

-b มีค่าเป็นบวก = สีน้ำเงิน (Blue)



ภาพที่ 2.13 ระบบสี CIE Lab Color Model

ระบบสีอิงอุปกรณ์ (Device Dependent Color) คือ ระบบสีที่มีค่าสีเปลี่ยนแปลงตามอุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น ระบบสี CMYK ของ Printer หรือระบบสี RGB ของ Monitor เป็นต้น ค่าสีไม่เป็นมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ทุกชิ้น ทำให้เกิดปัญหาในระบบสีแบบนี้ คือ อุปกรณ์แต่ละเครื่องจะแสดงผลค่าสีไม่ตรงกัน

ระบบสีไม่อิงกับอุปกรณ์ (Device Independent Color) คือ ระบบสีที่มีค่าสีไม่เปลี่ยนแปลงตามอุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น ระบบสี CIE Lab ระบบสี CIE Lch เป็นต้น ค่าสีของระบบนี้ประมวลผลจากข้อมูล Spectrum ของแสง ดังนั้นจึงนำค่าสีไปใช้เป็นมาตรฐานของระบบการจัดการสี (Color

Management) เพื่อใช้สื่อสารค่าสีระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ สีอิงอุปกรณ์ (Device Dependent Color) และ สีไม่อิงกับอุปกรณ์ (Device Independent Color)

การเปรียบเทียบสีระหว่างจอภาพ A B และ C กรณีที่1 จอภาพ A B มีค่าสี RGB เท่ากัน แต่มีค่าสี Lab ต่างกัน จอภาพ A B จะแสดงสีแตกต่างกัน กรณีที่2 จอภาพ B C มีค่าสี RGB ไม่เท่ากัน แต่มีค่าสี Lab เท่ากัน จอภาพ B C จะแสดงสีเหมือนกัน ดังนั้น CIE Lab จึงเป็นระบบการวัดค่าสี ในการถ่ายทอดสีระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบการผลิต โดยมีเป้าหมายเพื่อทำให้สีของภาพที่ผลิตขึ้นด้วยอุปกรณ์ต่างๆ มีความแตกต่างสีลดน้อยลง และเป็นการช่วยลดปัญหาพื้นฐานที่อุปกรณ์สองชนิดต่างก็ผลิตสีได้แตกต่างกัน [6]



ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบสีอิงอุปกรณ์ (RGB) และสีไม่อิงอุปกรณ์ (CIE Lab)

3.1.4 เครื่องมือวัดสี (Color Measure Instrument)

วิธีที่ง่ายที่สุดในการวัดสี อาจจะใช้แถบสีมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบสี [7] เช่น แถบสีระบบ Munsell เป็นต้น แต่การใช้เครื่องมือวัดสี จะทำให้สามารถระบุค่าสีเป็นตัวเลขได้ความถูกต้องมากที่สุด เครื่องมือวัดค่าสีที่เป็นมาตรฐานอ้างอิงทั่วไป มี 3 ชนิด คือ

1) เครื่องวัดค่าความดำ (Densitometer)

เครื่องวัดค่าความดำ (Densitometer) คือ เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มของแสงที่สะท้อนจากวัตถุที่มีลักษณะทึบแสง หรือวัตถุที่แสงส่องผ่าน จากนั้นจะคำนวณค่าความเข้มแสงที่วัดได้ให้เป็นค่าความดำ [7] เครื่องมือวัดค่าความดำ สามารถแบ่งตามลักษณะการสะท้อนแสง ได้ 2 ประเภท คือ

- เครื่องวัดค่าความดำชนิดสะท้อนแสง (Reflection Densitometer) ใช้กับวัตถุทึบแสง เช่น ต้นฉบับภาพถ่ายแผ่นงานพิมพ์ที่ได้จากการพิมพ์และหมึกพิมพ์บนกระดาษ เป็นต้น

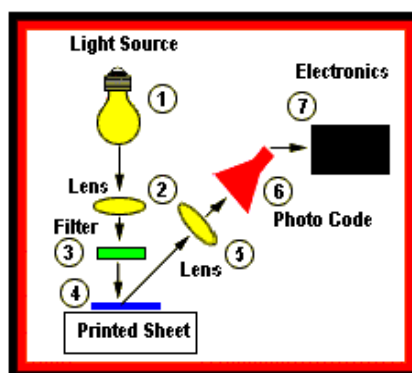
The Equation: $Density = \log_{10} 1/R$

เมื่อ R = Reflectance [8]

- เครื่องวัดค่าความดำชนิดแสงส่องผ่าน (Transmission Densitometer) ใช้กับวัตถุโปร่งแสง เช่น สไลด์สี และฟิล์มแยกสี เป็นต้น

The Equation: $Density = \log_{10} 1/T$

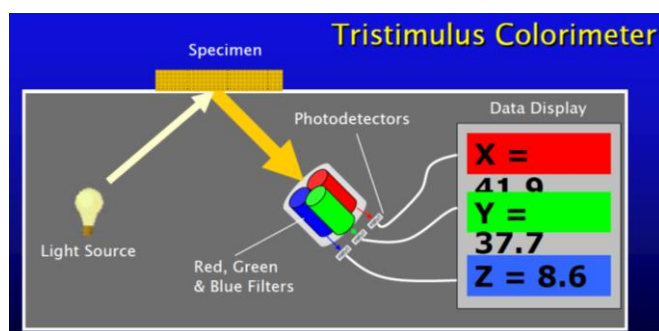
เมื่อ T = Transmittance [8]



ภาพที่ 2.15 หลักการทำงานของ Reflection Densitometer [9]

2) เครื่องมือ Colorimeter

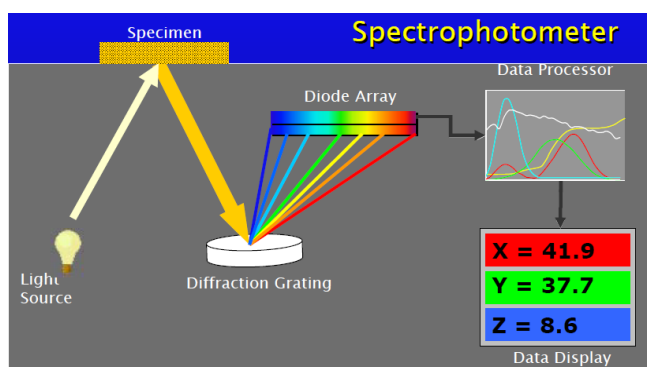
เครื่องมือ Colorimeter คือ เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มของแสงที่สะท้อนจากวัตถุที่มีลักษณะทึบแสง หรือวัตถุที่แสงสามารถส่องผ่าน มีลักษณะการทำงานคล้ายกับการมองเห็นสีของมนุษย์ คือมี Sensor 3 ชนิดที่มีความไวต่อแสงสี แดง เขียวและน้ำเงิน ซึ่งอยู่ในตามนุษย์ ดังนั้นค่าที่วัดได้จากคัลเลอริมิเตอร์จึงเป็นตัวเลขที่แสดงค่าสีของภาพที่สัมพันธ์กับการมองเห็นสีจริงของมนุษย์ Colorimeter มีทั้งแบบ Reflection และ Transmission [7]



ภาพที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องมือ Colorimeter [10]

3) เครื่องมือ Spectrophotometer

เครื่องมือ Spectrophotometer คือ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าสีการสะท้อนแสง (Reflection) หรือการแสงส่องผ่าน (Transmission) โดยเป็นการวัดความยาวคลื่นแสง ตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร และนำค่าความยาวคลื่นไปเขียนกราฟ แสดงความยาวคลื่นเป็นแกนนอน และค่าการสะท้อนแสงหรือค่าแสงส่องผ่านเป็นแกนตั้ง หรือใช้โปรแกรมคำนวณค่าความยาวคลื่นเป็นค่าสีตามระบบการวัดสี (Color Model) ความแตกต่างจากคัลเลอร์มิเตอร์ซึ่งใช้วัดสีโดยเฉพาะโดยใช้ Filter 3 สี [5]



ภาพที่ 2.17 หลักการทำงานของเครื่องมือ Spectrophotometer [10]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) Kit L. Yam , Spyridon E. Papadakis: A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces [11]

งานวิจัยแสดงขั้นตอนและวิธีการบันทึกภาพดิจิทัลของพืชชา จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Photoshop ตรวจวัดและวิเคราะห์สีของพืชชา อ้างอิงระบบการวัดค่าสี LAB โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ระบบการวัดค่าสี (Color Model)

- RGB Model (Red Green และ Blue) รูปแบบ RGB เป็นรูปแบบสีสารเติมแต่งที่ใช้ส่งแสงในการแสดงสี
- CMYK Model (cyan, magenta, yellow, black) CMYK เป็นรูปแบบสีบนพื้นฐานของ light absorbing คุณภาพของหมึกพิมพ์บนกระดาษ
- LAB Model เป็นมาตรฐานสากลในการวัดสีที่พัฒนาโดยสำนักงานคณะกรรมการกำกับ Commission Internationaled_Eclairage (CIE) ในปี 1976

การวัดค่าสี (Color Measurement)

- แสงและมุมกล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพ (Lighting System)
- กล้องและการตั้งค่าในการบันทึกภาพ (Digital Camera)
- การบันทึกภาพด้วยเงื่อนไขและสภาวะที่จัดเตรียมไว้ตามข้อ 1-2

การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Photoshop ประมวลผล ดังนี้

- การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ตรวจสอบด้วยสายตา(Visual Inspection)
- การวิเคราะห์เชิงปริมาณ
 - Info Palette ตรวจสอบและแสดงค่าสี CMYK และ LAB
 - Histogram Window ตรวจสอบ color distributions รวมทั้งเปรียบเทียบค่าของกลุ่มตัวอย่าง

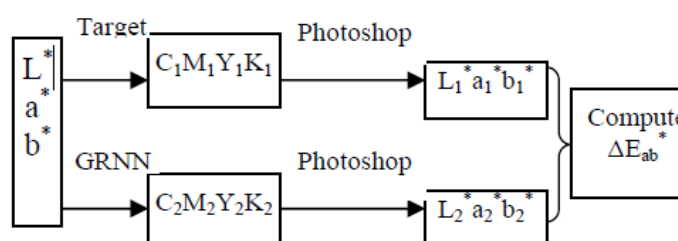
งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าภาพดิจิทัล ที่มีวิธีการและขั้นตอนการบันทึกภาพด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมและควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้คงที่ สามารถนำไปประมวลผลและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปได้ผลลัพธ์ที่ดี

2) Cao Congjun, Sun jing: Study on Color Space Conversion between CMYK and CIE L*a*b* based on Generalized Regression Neural Network [12]

งานวิจัยแสดงปัญหาการเปลี่ยนแปลงของสีในขบวนการพิมพ์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสื่อสารค่าสีระหว่างอุปกรณ์ Input และ Output เช่น Scanner Monitor Printer เป็นต้น การแก้ไขด้วยวิธีการแปลงค่าสีระหว่างระบบสี CMYK กับ CIE L*A*B* ซึ่งเป็นระบบแทนค่าสีที่ไม่อิงอุปกรณ์ เพื่อลดความแตกต่างของสีให้น้อยลง โดยใช้ Generalized Regression Neural Network (GRNN) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Matlab ในการประมวลผลข้อมูล ECI2002 standard color ซึ่งเป็นข้อมูลค่าสี CMYK จำนวน 171 ตัวอย่าง โดยใช้ Function GRNN แปลงค่าสี CMYK เป็น CIE L*A*B*(1)

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Photoshop ในการแปลงค่าสี CMYK เป็น CIE L*A*B*(2) จากนั้นคำนวณหาผลต่าง ΔE ระหว่าง L*A*B*(1) กับ L*A*B*(2) เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรง



บทที่ 3

แนวคิดและการดำเนินงานวิจัย

ระบบประมวลผลภาพ (Digital Image Processing System) ถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ เช่น การผิผิวของสี ขนาดรูปทรงของผลิตภัณฑ์ (Discoloring) การตรวจสอบการปนเปื้อนของพื้นผิว (Contamination) เป็นต้น ซึ่งผลจากการตรวจสอบดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคัดแยกงานด้วยคุณภาพจากระบบการผลิต

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1) กล้องบันทึกภาพดิจิทัล

กล้องบันทึกภาพดิจิทัล Canon EOS 40D ใช้เลนส์ EF-S ความยาวโฟกัส 18-55 mm. รูรับแสง F3.6-5.6 บันทึกภาพด้วยความละเอียด 10.0 Mpixel ปรับตั้งโหมดการบันทึกภาพในระบบสี sRGB



ภาพที่ 3.1 กล้อง Canon EOS 40D

2) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

แหล่งกำเนิดแสงใช้โคมไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode) จำนวน 2 ชุด อุณหภูมิแสง 6500 K เพื่อให้มีความส่องสว่างคงที่ โดยติดตั้งที่ตำแหน่งด้านข้างทั้งสองด้านทำมุม 45° กับแนวแกนของกล้อง เพื่อให้แสงครอบคลุมชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ มีระยะห่างจากชิ้นงานประมาณ 30 ซม.

3) ห้องมืด

การควบคุมสภาวะแวดล้อมในการบันทึกภาพให้เหมาะสม จากงานวิจัยของ Leon และคณะ (2006) พบว่าระบบสี RGB มีขอบเขตสีกว้างขวางไม่แน่นอน (Non Absolute Color Space) ดังนั้นการวัดค่าสีในระบบสี RGB จะขึ้นอยู่กับผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น เซนเซอร์ของกล้องและแหล่งกำเนิดแสงภายนอก ด้วยเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงจัดเตรียมอุปกรณ์และการบันทึกภาพในห้องมืด เพื่อควบคุมสภาวะแวดล้อมในการบันทึกภาพให้สภาวะของแสงคงที่ ป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก ลดผลกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆ



ภาพที่ 3.2 การบันทึกภาพในห้องควบคุมสภาวะแสง

4) โปรแกรม Digital Photo Professional

โปรแกรม Digital Photo Professional (DPP) คือ โปรแกรมตกแต่งภาพถ่ายของผู้ผลิตกล้องดิจิทัล Canon โปรแกรม DPP มีความสามารถตกแต่งไฟล์ภาพที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถปรับแต่งได้ง่ายและรวดเร็ว มีฟังก์ชันพิเศษมากมาย เช่น ฟังก์ชันปรับลด Noise, ปรับแต่ง White Balance เพื่อให้สีสรรคที่ได้สมจริง, ปรับแต่ง Contrast เพื่อเพิ่มหรือลดความคมชัด, ปรับแต่ง Saturation เพื่อเพิ่มความต่างสีทำให้สีสดขึ้น, ปรับแต่ง Brightness เพื่อเพิ่มหรือลดความสว่างของภาพ เป็นต้น

โปรแกรม DPP สามารถปรับแต่งไฟล์ได้ทุกนามสกุลไฟล์ แต่จะสามารถปรับแต่งรูปที่ถ่ายจากกล้อง Canon ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดทั้งไฟล์ RAW และไฟล์ JPEG เพราะขบวนการจะเป็นมาตรฐานเดียวกัน

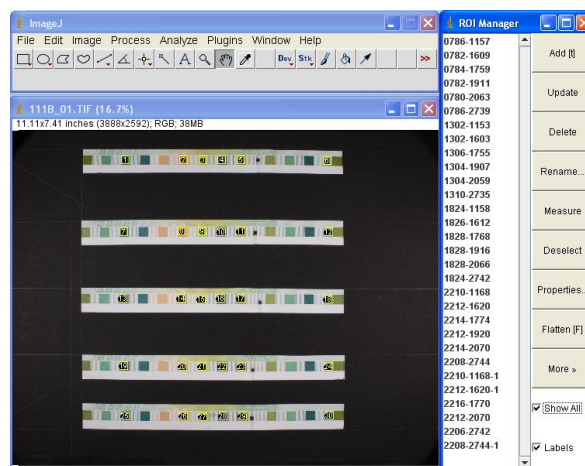
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Digital Photo Professional 3.13.20.0 เพื่อแปลงไฟล์ภาพจากรูปแบบไฟล์ RAW ให้เป็นไฟล์ TIF 8 bits, Output Resolution 350 dpi

5) โปรแกรม ImageJ

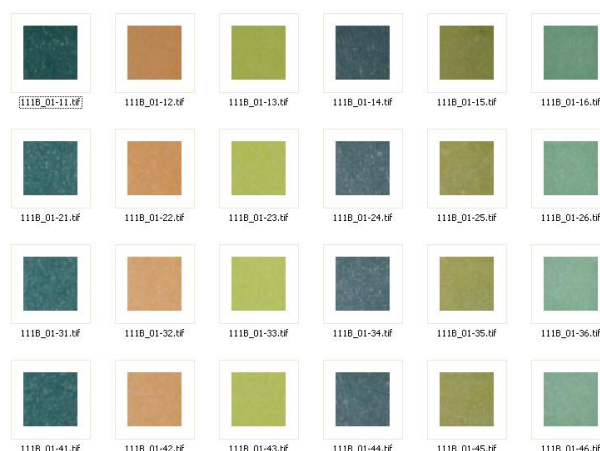
โปรแกรม ImageJ คือ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย พัฒนาโดยสำนักวิจัยของสถาบัน National Institute of Mental Health (NIMH) เพื่อใช้กับเครื่อง Macintosh และสามารถใช้ได้กับเครื่อง PC (Personal Computer) ที่ติดตั้งโปรแกรม Java ตั้งแต่เวอร์ชัน 1.4 ขึ้นไป

โปรแกรม ImageJ สามารถเปิดภาพและบันทึกไฟล์นามสกุล เช่น TIFF , GIF , JPEG , BMP , DICOM , FITS และ raw เป็นต้น เลือกบันทึกในรูปแบบ 8-bit,16-bit,32-bit ได้ ImageJ เป็นโปรแกรม freeware ที่สามารถดาวน์โหลดได้ฟรีที่ <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html> โดยสามารถเลือกระบบปฏิบัติการได้ เช่น Windows,Linux,Mac OS X เป็นต้น

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ImageJ 1.47V เพื่อทำการแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation) เฉพาะภาพส่วนที่ต้องการ (Region of Interest: ROI) จากนั้นบันทึกภาพ ROI นั้นในรูปแบบ TIF File ภาพดังกล่าวมีค่าสีอยู่ในระบบสี sRGB



ภาพที่ 3.3 โปรแกรม ImageJ ใช้ในการแบ่งส่วนของภาพ (Image Segmentation)



ภาพที่ 3.4 ภาพ ROI บันทึกในระบบสี sRGB

6) โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB คือ โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ งานวิจัย งานพัฒนาและการวิเคราะห์งานต่างๆ ปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นเครื่องมือสำหรับนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักศึกษาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ชื่อโปรแกรม MATLAB ย่อมาจาก MATrix LABoratory

MATLAB มีเครื่องมือที่เรียกว่า toolbox ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นสำหรับงานที่จำเพาะเจาะจงหลายประเภท Toolbox เป็นการนำเอาโปรแกรมที่เขียนขึ้นเป็นฟังก์ชัน เพื่อให้ผู้ใช้มีความสะดวกในการเรียกใช้งานมากขึ้นครอบคลุมการทำงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น Image Processing , Neural Networks , Fuzzy Logic เป็นต้น

จากงานวิจัยของ Leon และคณะ (2006) นำเสนอวิธีการแปลงค่าระบบสี 5 วิธี คือ Linear Model , Quadratic Model , Direct Model, Gamma Model และ Neural Network ซึ่งวิธีการ Neural Network เป็นวิธีที่ดีที่สุด เพราะมีค่าความผิดพลาดเพียง 0.93 % [13]

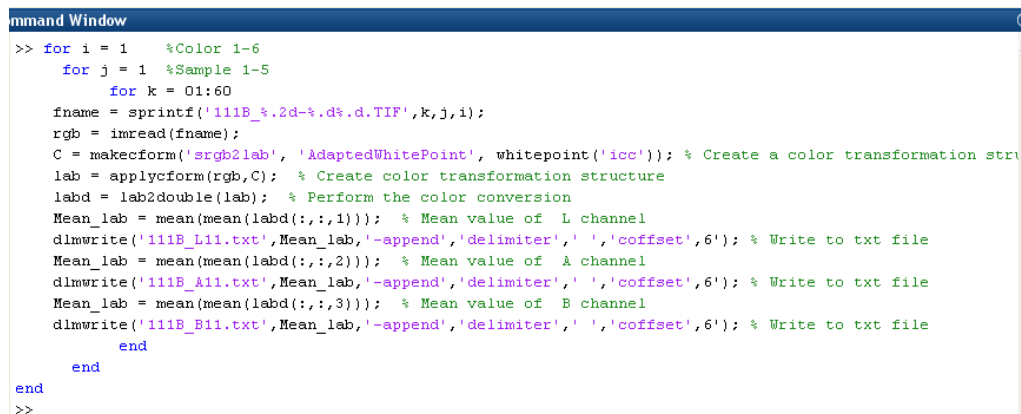
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Matlab R2013a เพื่อทำการอ่านค่าสีของภาพ และแปลงค่าจากระบบสี sRGB เป็นค่าระบบสี CIE Lab โดยใช้ Function ใน Image Processing Toolbox จำนวน 2 Function ดังนี้

```
C = makecform('srgb2lab','AdaptedWhitePoint', whitepoint('icc'))
```

เป็นคำสั่งที่ใช้สร้างโครงสร้างการแปลงค่าระบบสี (Color Transformation Structure) จากระบบสี sRGB เป็นระบบสี CIE Lab โดยกำหนดค่าอุณหภูมิแสงแบบ D50

```
B = applycform(A, C)
```

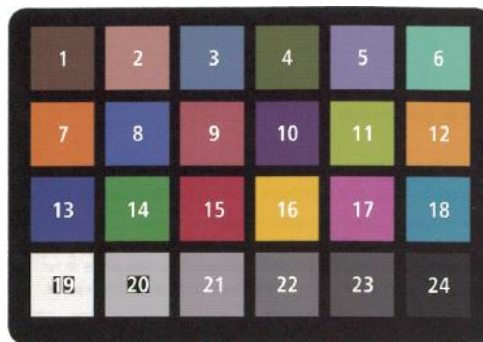
เป็นคำสั่งที่ใช้ในการแปลงค่าสีในตัวแปร A ให้มีค่าสีตามที่กำหนดไว้ในโครงสร้างการแปลงค่าระบบสี C คือ srgb2lab



```
mmand Window
>> for i = 1 %Color 1-6
    for j = 1 %Sample 1-5
        for k = 01:60
            fname = sprintf('111B_%2d-%.d%.d.TIF',k,j,i);
            rgb = imread(fname);
            C = makecform('srgb2lab', 'AdaptedWhitePoint', whitepoint('icc')); % Create a color transformation stru
            lab = applycform(rgb,C); % Create color transformation structure
            labd = lab2double(lab); % Perform the color conversion
            Mean_lab = mean(mean(labd(:, :, 1))); % Mean value of L channel
            dlmwrite('111B_L11.txt', Mean_lab, '-append', 'delimiter', ' ', 'coffset', 6); % Write to txt file
            Mean_lab = mean(mean(labd(:, :, 2))); % Mean value of A channel
            dlmwrite('111B_A11.txt', Mean_lab, '-append', 'delimiter', ' ', 'coffset', 6); % Write to txt file
            Mean_lab = mean(mean(labd(:, :, 3))); % Mean value of B channel
            dlmwrite('111B_B11.txt', Mean_lab, '-append', 'delimiter', ' ', 'coffset', 6); % Write to txt file
        end
    end
end
>>
```

ภาพที่ 3.5 โปรแกรม Matlab R2013a ที่ใช้ในการแปลงค่าระบบสี

7) แผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker ยี่ห้อ X-rite มีแถบสี จำนวน 24 สี ซึ่งมีเฉดสี กว้างขวางครอบคลุมสีสิ่งของตามธรรมชาติ เช่น ผิวหนังของคน ใบไม้ สีท้องฟ้า เป็นต้น แถบสีเหล่านี้ มีสีที่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันสามารถสะท้อนแสงออกมาได้เหมือนจริงในทุกช่วงความถี่แสง ผู้ผลิต ได้ตรวจวัดค่าสีของแผ่นสี 2 ระบบ คือ ค่าสีระบบ sRGB โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้อุณหภูมิสี 6500 Kelvin (Illumination D65) และค่าสีระบบ CIE Lab แหล่งกำเนิดแสงที่ให้อุณหภูมิสี 5000 Kelvin (Illumination D50, 2 degree)



ภาพที่ 3.6 แผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker

| No. | Number | sRGB | | | CIE L*a*b* | | | Munsell Notation Hue Value / Chroma | |
|-----|---------------------|------|-----|-----|------------|---------|---------|--|------------|
| | | R | G | B | L* | a* | b* | | |
| 1. | dark skin | 115 | 82 | 68 | 37.986 | 13.555 | 14.059 | 3 YR | 3.7 / 3.2 |
| 2. | light skin | 194 | 150 | 130 | 65.711 | 18.13 | 17.81 | 2.2 YR | 6.47 / 4.1 |
| 3. | blue sky | 98 | 122 | 157 | 49.927 | -4.88 | -21.925 | 4.3 PB | 4.95 / 5.5 |
| 4. | foliage | 87 | 108 | 67 | 43.139 | -13.095 | 21.905 | 6.7 GY | 4.2 / 4.1 |
| 5. | blue flower | 133 | 128 | 177 | 55.112 | 8.844 | -25.399 | 9.7 PB | 5.47 / 6.7 |
| 6. | bluish green | 103 | 189 | 170 | 70.719 | -33.397 | -0.199 | 2.5 BG | 7 / 6 |
| 7. | orange | 214 | 126 | 44 | 62.661 | 36.067 | 57.096 | 5 YR | 6 / 11 |
| 8. | purplish blue | 80 | 91 | 166 | 40.02 | 10.41 | -45.964 | 7.5 PB | 4 / 10.2 |
| 9. | moderate red | 193 | 90 | 99 | 51.324 | 48.239 | 16.248 | 2.5 R | 5 / 10 |
| 10. | purple | 94 | 60 | 108 | 30.325 | 22.976 | -21.587 | 5 P | 3 / 7 |
| 11. | yellow green | 157 | 188 | 64 | 72.532 | -23.709 | 57.255 | 5 GY | 7.1 / 9.1 |
| 12. | orange yellow | 224 | 163 | 46 | 71.941 | 19.363 | 67.857 | 10 YR | 7 / 10.5 |
| 13. | blue | 56 | 61 | 150 | 28.778 | 14.179 | -50.297 | 7.5 PB | 2.9 / 12.7 |
| 14. | green | 70 | 148 | 73 | 55.261 | -38.342 | 31.37 | 0.25 G | 5.4 / 8.65 |
| 15. | red | 175 | 54 | 60 | 42.101 | 53.378 | 28.19 | 5 R | 4 / 12 |
| 16. | yellow | 231 | 199 | 31 | 81.733 | 4.039 | 79.819 | 5 Y | 8 / 11.1 |
| 17. | magenta | 187 | 86 | 149 | 51.935 | 49.986 | -14.574 | 2.5 RP | 5 / 12 |
| 18. | cyan | 8 | 133 | 161 | 51.038 | -28.631 | -28.638 | 5 B | 5 / 8 |
| 19. | white (.05*) | 243 | 243 | 242 | 96.539 | -0.425 | 1.186 | N | 9.5 / |
| 20. | neutral 8 (.23*) | 200 | 200 | 200 | 81.257 | -0.638 | -0.335 | N | 8 / |
| 21. | neutral 6.5 (.44*) | 180 | 180 | 180 | 66.766 | -0.734 | -0.504 | N | 6.5 / |
| 22. | neutral 5 (.70*) | 122 | 122 | 121 | 50.867 | -0.153 | -0.27 | N | 5 / |
| 23. | neutral 3.5 (1.05*) | 85 | 85 | 85 | 35.656 | -0.421 | -1.231 | N | 3.5 / |
| 24. | black (1.50*) | 52 | 52 | 52 | 20.461 | -0.079 | -0.973 | N | 2 / |

Cie L*a*b* values use Illuminant D50 2 degree observer sRGB values for illuminate D65.

ภาพที่ 3.7 แผ่นสีมาตรฐาน Munsell มีค่าสีระบบ sRGB และค่าสีระบบ CIE Lab

8) เครื่องมือวัดค่าสี Spectrophotometer

Spectrophotometer คือ เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้วัดค่าสี ของวัตถุมีหลักการการทำงาน คือ ภายในตัวเครื่องมีแหล่งกำเนิดแสงส่องกระทบกับพื้นผิววัตถุ เครื่องมือจะวัดแสงที่การสะท้อนจาก วัตถุ (Reflection) โดยวัดค่าความยาวคลื่นแสง (Color Spectrum) และใช้โปรแกรม

SpectroConnect เพื่อคำนวณค่าสีตามระบบสีมาตรฐานต่างๆ เช่น CIE Lab , CIE Lch เป็นต้น และสามารถเลือกแหล่งกำเนิดแสง Illumination D50 หรือ D65 และองศาสังเกตการณ์ 2° หรือ 10° SpectroDrive เป็นยี่ห้อ Techkon รุ่น SpectroDrive

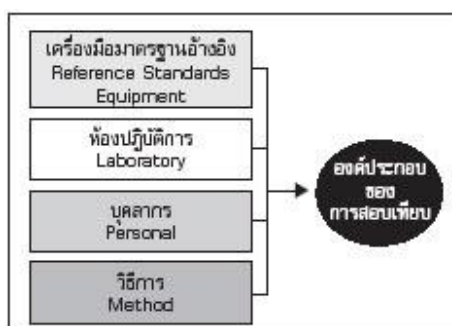


ภาพที่ 3.8 เครื่องมือ Spectrophotometer ยี่ห้อ Techkon รุ่น SpectroDrive

3.2 การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยต้องมีกระบวนการในการตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องมือ ให้ความถูกต้องตามขอบเขตการทำงานและมีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่อยู่ในมาตรฐานที่เชื่อถือได้ เมื่อเครื่องมือถูกนำไปใช้งานระยะหนึ่ง อายุของส่วนประกอบและเครื่องมือ อาจมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความเปลี่ยนแปลงหรือความคลาดเคลื่อนของผลการวัดที่เกิดขึ้นนี้ อาจเกิดจากการ Drift (มอก. 235 เล่ม 14) หมายถึง การแปรผันอย่างช้า ๆ ตามเวลาของลักษณะทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด อันเนื่องมาจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ไฟฟ้าเคมี หรือข้างกล เป็นต้น อาจบอกค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากเดิม ส่งผลให้ผลการวัดที่ได้รับไม่น่าเชื่อถือการเปลี่ยนแปลงของเครื่องมือวัด ไม่สามารถกำจัดได้ แต่สามารถที่จะตรวจพบและแก้ไขได้โดยผ่านกระบวนการสอบเทียบ

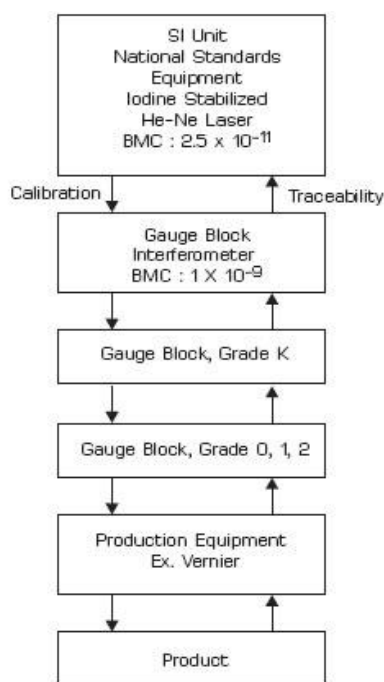
มาตรฐาน IOS/IEC 17/025 กำหนดองค์ประกอบของการสอบเทียบเครื่องมือวัด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้การสอบเทียบมีความถูกต้อง แม่นยำ มี 4 ส่วน ดังต่อไปนี้



▲ องค์ประกอบของการสอบเทียบ

ภาพที่ 3.9 แสดงองค์ประกอบของการสอบเทียบ

1) เครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment) ตามมาตรฐาน ISO 10012-1 กำหนดให้เครื่องมือมาตรฐานที่นำมา เพื่อให้เครื่องมือวัดอื่นๆ ใช้เปรียบเทียบ จะต้องมีความถูกต้องสูงกว่าความถูกต้อง ของเครื่องมือที่รับการสอบเทียบ 3 เท่าขึ้นไป (ISO 10012) และการสอบกลับผลการวัดได้ เนื่องจากจะเป็นสิ่งแสดงถึงลำดับความสัมพันธ์ที่จะทำให้การสอบเทียบเครื่องมือบรรลุผล โดยการใช้มาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงกว่า นั้นหมายความว่าผลของการวัดจะต้องสามารถแสดงถึงการส่งต่อความถูกต้องของการวัดที่ยอมรับได้ ถ่ายทอดผ่านห้องปฏิบัติการหลายระดับ จนถึงผู้ใช้งาน



หมายเหตุ BMC - Best Measurement
Capability

ภาพที่ 3.10 แสดงการส่งต่อความถูกต้องของการวัดที่ยอมรับได้

2) ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ (laboratory) การควบคุมสภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการให้มีความเหมาะสม ทั้งในด้านอุณหภูมิ ความชื้น แสงสว่าง และการสั่นสะเทือน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพและความถูกต้องของการสอบเทียบ

3) บุคลากรผู้ทำหน้าที่ในการสอบเทียบ (personnel) ความสามารถของบุคลากร จะต้องได้รับการศึกษา ฝึกอบรม และสั่งสมประสบการณ์ ในเกณฑ์ที่จะสามารถให้ผลการสอบเทียบที่ถูกต้องได้ เนื่องจากบุคลากรเหล่านี้จะต้องทำหน้าที่ ในการสอบเทียบรวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลและการประเมินความไม่แน่นอนของการวัด

4) วิธีการสอบเทียบ (method) การเลือกใช้วิธีการที่เหมาะสม เพราะการเลือกวิธีการสอบเทียบที่เหมาะสม จะทำให้ได้ความถูกต้องของการตรวจสอบเทียบที่ต้องการ รวมทั้งมีความสะดวกและค่าใช้จ่ายต่ำ เช่น วิธีการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO, ASTM, DIN และ JIS เป็นต้น

กระบวนการสอบเทียบเป็นกระบวนการที่ช่วยบ่งบอก ถึงความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย โดยทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการวัด (Reference Standards Equipment) ที่รู้ค่าความถูกต้องแน่นอน ผลการเปรียบเทียบที่เกิดขึ้นจะเป็นปัจจัยสำคัญและมีความเกี่ยวข้องกับการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด โดยผลการวัดที่ถูกต้องจะช่วยให้การปรับแก้ไข เพื่อชดเชยความบกพร่องของเครื่องมือให้เป็นไปอย่างถูกต้อง

จากงานวิจัยของ Kun Li และคณะ (2010) แนะนำวิธีการสอบเทียบโดยใช้แผ่นสี GretagMacbeth ColorChecker Chart ซึ่งมีแถบสี จำนวน 24 สี ในการสอบเทียบสีของกล้อง Light Field Camera [14]

การสอบเทียบในงานวิจัยนี้ ใช้แผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment) โดยจะใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าสี Spectrophotometer ยี่ห้อ Techkon รุ่น SpectroDrive ต่อจากนี้จะเรียกว่า SpectroDrive และใช้สอบเทียบระบบประมวลผลภาพ (Digital Image Processing System) ต่อจากนี้จะเรียกว่าระบบประมวลผลภาพ ซึ่งมีรายละเอียดการสอบเทียบ ดังนี้

3.2.1 การสอบเทียบ Spectrophotometer

ก่อนเริ่มใช้งาน Spectrophotometer ทุกครั้งต้องทำการสอบเทียบ Spectral Sensor ด้วยแผ่นสีขาวมาตรฐาน (Absolute White Standard) เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์ที่ผ่านการสอบเทียบอ่านค่าสีได้ถูกต้อง

การใช้ Spectrophotometer วัดค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell ซึ่งมีแถบสี จำนวน 24 สี แต่ละแถบสีมีขนาด 4.0 x 4.0 ซม. แถบสีเหล่านี้มีสีที่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ใช้ Spectrophotometer วัดค่าแถบสี จำนวน 3 ครั้งๆ ละ 5 จุด ครอบคลุมพื้นที่แถบสี ตามภาพที่ 3.11 โดยอ่านค่าสีในระบบสี CIELab



ภาพที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการวัดค่าสีด้วย Spectrophotometer

3.2.2 การสอบเทียบระบบประมวลผลภาพ

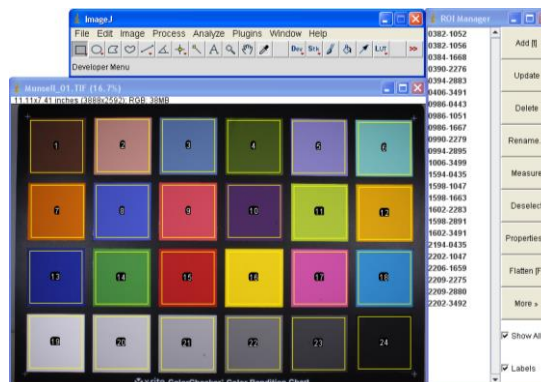
- 1) การบันทึกภาพแผ่นสีมาตรฐาน Munsell โดยใช้กล้องบันทึกภาพดิจิทัล Canon EOS 40D เลนส์ EF-S ความยาวโฟกัส 18-55 mm. รูรับแสง F3.6-5.6 บันทึกภาพด้วยความละเอียด 10.0 Megapixel ปรับตั้งโหมดการบันทึกภาพใน ระบบสี sRGB จำนวน 26 ภาพ บันทึกไฟล์ในรูปแบบ RAW และการบันทึกภาพปรับตั้งค่า ดังนี้

File name IMG_0328.CR2
 File Size 5.5MB
 Camera Model Canon EOS 40D
 Firmware Firmware Version 1.1.1
 Shooting Date/Time 21/1/2557 16:21:44
 Owner's Name
 Shooting Mode Manual Exposure
 Tv(Shutter Speed) 0.8
 Av(Aperture Value) 22
 Metering Mode Center-Weighted Average Metering
 ISO Speed 200
 Lens EF-S18-55mm f/3.5-5.6 IS
 Focal Length 24.0mm
 Image Size 1936x1288
 Image Quality SRAW
 Flash Off
 White Balance Mode Auto
 White balance compensation A1, G2
 AF Mode One-Shot AF
 Picture Style Standard
 Sharpness 0

Contrast 0
 Saturation 0
 Color tone 0
 Color Space sRGB
 Drive Mode Single shooting

การแปลงค่าสีของภาพแผ่นสีมาตรฐาน Munsell ดังกล่าว ซึ่งมีค่าสีอยู่ในระบบสี sRGB ซึ่งจะต้องแปลงค่าสีให้อยู่ในระบบสี CIE Lab เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการสื่อสารค่าสีของระบบประมวลผลภาพ มีสองขั้นตอน ดังนี้

- 2) ใช้โปรแกรม ImageJ 1.47V เพื่อทำการแบ่งส่วนของภาพแผ่นสีมาตรฐาน Munsell เฉพาะแถบสีส่วนที่ต้องการ (Region Of Interest: ROI) จำนวน 24 ภาพ จากนั้นบันทึกภาพ ROI นั้นในรูปแบบ TIF File ภาพดังกล่าวมีค่าสีอยู่ในระบบสี sRGB



ภาพที่ 3.12 โปรแกรม ImageJ ที่ในการใช้แบ่งส่วนของภาพ ROI



ภาพที่ 3.13 ภาพ ROI ของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell

3) ใช้โปรแกรม Matlab R2013a อ่านค่าเฉลี่ยสีจากทุก Pixel ของภาพ ROI จำนวน 26 ภาพ ในระบบสี sRGB จากนั้นแปลงค่าสีให้เป็นระบบสี CIE Lab โดยใช้ Function ดังต่อไปนี้

- `makecform(srgb2lab,'AdaptedWhitePoint', whitepoint('icc'))`
- `applycform(A,C)`

การแปลงค่าสีจากระบบสี sRGB ไปเป็นระบบสี CIE Lab มีวิธีการแปลงหลายวิธี งานวิจัยของ X.Sun และคณะ (2009) นำเสนอวิธีการวัดและวิเคราะห์คุณลักษณะด้านสีของเนื้อวัว โดยใช้วิธีการแปลงค่าสีแบบ Direct Model พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ [15]

โปรแกรม Matlab มีวิธีการแปลงแบบ Direct Model ซึ่งมีขั้นตอนการแปลงค่าสี จำนวน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การแปลงค่าสีระบบสี sRGB ไปเป็นระบบสี CIE xyz โดยใช้สมการที่ (1) จากนั้นขั้นตอนที่ 2 จะแปลงระบบสี CIE xyz ไปเป็นระบบสี CIE Lab โดยใช้สมการที่ (2)

การคำนวณหาค่าความแตกต่างของค่าสีในระบบ CIE Lab ระหว่างเครื่องมือวิจัยนั้น ใช้สมการของ CIE 1986 หรือ CIE ΔE_{ab} โดยใช้สมการที่ (3) ประมวลผลในโปรแกรม Excel

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ X, Y, Z คือ CIE tristimulus values, โดย

$X =$ สีแดง , $Y =$ สีเขียว , $Z =$ สีน้ำเงิน

$$\hat{L}^* = \begin{cases} 116 \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 & \text{if } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \text{if } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$\hat{a}^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} \right],$$

$$\hat{b}^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} \right],$$
(2)

เมื่อ L^* = สว่าง เมื่อ L มีค่า 100 , L^* = มืด เมื่อ L มีค่า 0

a^* = สีแดง เมื่อ a มีค่าเป็นบวก , a^* = สีเขียว เมื่อ a มีค่าเป็นลบ

b^* = สีน้ำเงิน เมื่อ b มีค่าเป็นบวก , b^* = สีเหลือง เมื่อ b มีค่าเป็นลบ

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$
(3)

เมื่อ ΔE^* คือ ผลต่างสีระหว่าง

ΔL^* คือ ผลต่างความสว่างหรือมืด

Δa^* คือ ผลต่างสีแดงหรือสีเขียว

Δb^* คือ ผลต่างสีน้ำเงินหรือสีเหลือง

3.2.3 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ SpectroDrive และระบบประมวลผลภาพ

การสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย เมื่อนำผลจากการสอบเทียบมาวิเคราะห์ จะทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือวัดที่ใช้มีการทำงานได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือได้ สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องมือวัดควรจะใช้ต่อไปหรือจำเป็นต้องปรับแต่ง ผลการสอบเทียบหลายๆ ครั้ง ยังแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียร (Stability) ของเครื่องมือ

ความคลาดเคลื่อน (Errors) ในการวัดข้อมูลเชิงปริมาณทุกรูปแบบจะมีความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนเกิดขึ้นเสมอ การทดลองที่ได้ผลสมบูรณ์ต้องเริ่มด้วยการทดลองที่ได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ความคลาดเคลื่อนสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุ ดังนี้

1) ความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคล (Personal Errors) ความคลาดเคลื่อนเชิงบุคคลเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความบกพร่องของผู้วัดหรือผู้ทดลอง ซึ่งสามารถลดความคลาดเคลื่อน

ชนิดนี้ได้ถ้าผู้ทดลองมีความละเอียด สุขุม รอบคอบระมัดระวังในการอ่านข้อมูลจากเครื่องมือวัดพร้อมทั้งบันทึกข้อมูลให้มีระเบียบแบบแผน มีรายละเอียดที่สามารถสื่อความหมายของข้อมูลดิบ จนสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์หรือคำนวณหาคำตอบได้โดยไม่ผิดพลาด

2) ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ(Symantic's Errors) ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือที่ใช้ทดลอง สามารถลดให้น้อยลงได้โดยใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพ ความคลาดเคลื่อนชนิดนี้เกิดขึ้นเสมอไม่ขึ้นกับผู้ทดลอง ผู้ทดลองจึงต้องเลือกอุปกรณ์หรือเครื่องมือทดลองให้เหมาะสม โดยมีสิ่งควรคำนึงถึง ดังนี้

- ความแม่นยำ(Precision) หมายถึงเครื่องมือที่วัดได้ค่าเดิมแม้ว่าจะวัดหลายๆครั้ง
- ความถูกต้อง(Accuracy) หมายถึงเครื่องมือที่วัดได้ค่าเท่ากับค่ามาตรฐานหรือใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน
- ความไว(Sensitivity) หมายถึงเครื่องมือที่วัดค่าได้ แม้ว่าจะมีสิ่งรบกวนหรือปริมาณฟิสิกส์ปริมาณนั้นจะมีค่าน้อยมาก ๆ

3) ความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ(Statistical Errors) หรือ ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม(Random Errors) เป็นความคลาดเคลื่อนในลักษณะที่ข้อมูลหรือตัวเลขที่วัดได้ มีค่าต่างๆ กันกระจายออกไปจากค่าตัวเลขที่เป็นไปได้มากที่สุดค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวเลขนั้น ความคลาดเคลื่อนชนิดนี้เป็นความคลาดเคลื่อนที่ที่เราไม่สามารถกำหนดหรือคาดคะเนได้แม้จะพยายามและระมัดระวังอย่างดีที่สุดแล้วก็ตาม เช่น การอ่านข้อมูลตัวเลขจากเครื่องมือวัดที่ต้องอาศัยการประมาณค่าในหลักสุดท้ายของสเกลจะมีขนาดไม่เท่ากันและมีการกระจายแบบสุ่ม(Random distribution) หมายความว่าพยายามวัดหลายๆครั้ง จะพบว่าตัวเลขการวัดแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน แต่ตัวเลขที่วัดได้มีแนวโน้มจะเท่าหรือใกล้เคียงค่าๆหนึ่ง ซึ่งค่าๆ นี้เราหาได้โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)

1) วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ SpectroDrive

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสีอ้างอิงของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell จำนวน 24 สี ซึ่งเป็นค่าสีที่ผู้ผลิตตรวจวัดแผ่นสีด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และบันทึกเป็นค่าสีมาตรฐานสำหรับแผ่นสีนั้นๆ ในระบบสี CIE Lab ค่าสีในตารางนี้จะใช้เป็นค่าสีมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ SpectroDrive และระบบประมวลผลภาพ

ตารางที่ 3.2 แสดงค่ามัธยฐาน (Median) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ในการวัดแผ่นสีมาตรฐาน Munsell ด้วย SpectroDrive จำนวน 15 ครั้ง เมื่อพิจารณาค่าใน ตารางพบว่าค่าสีมีความเที่ยงตรง มีค่าความเบี่ยงเบนอยู่ในเกณฑ์ต่ำ เนื่องจากแผ่นสีมาตรฐาน Munsell มีพื้นผิวที่มีสีสม่ำเสมอ (Homogenous)

ภาพที่ 3.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่าง ค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ ค่าเฉลี่ยสีที่วัดด้วย SpectroDrive มีค่าใน Channel L เท่ากับ 0.9996, Channel a เท่ากับ 0.9991 และ Channel b เท่ากับ 0.9997

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ระหว่าง ค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ ค่าเฉลี่ยสีที่วัดด้วย SpectroDrive พบว่าข้อมูลสีทั้งหมด 24 สี มีค่า ΔE_{ab} อยู่ในเกณฑ์ต่ำกว่า 5

งานวิจัยของ Mokrzycki และคณะ (2012) องค์กร CIE ได้กำหนดการรับรู้สีโดยเฉลี่ยของคนทั่วไป (Standard Observer) อ้างอิงกับค่า ΔE_{ab} ดังนี้ [16]

- ΔE_{ab} 0 - 1 ผู้สังเกตทั่วไปไม่เห็นความแตกต่างของสี
- ΔE_{ab} 1 - 5 ผู้สังเกตที่มีประสบการณ์สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสี
- $\Delta E_{ab} > 5$ ผู้สังเกตการณ์ทั่วไปสามารถสังเกตเห็นสีแตกต่างกันชัดเจน

สรุปผลการสอบเทียบเครื่องมือ SpectroDrive ด้วยการเปรียบเทียบค่าสีมาตรฐานจากผู้ผลิตกับค่าเฉลี่ยสีที่วัดด้วย SpectroDrive เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันทางบวกในระดับสูงมากและมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ของแถบสีทั้ง 24 สี มีค่า ΔE_{ab} สูงสุด 3 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือ SpectroDrive สามารถถ่ายทอดค่าสีในทุก Channel ได้อย่างแม่นยำถูกต้อง ใกล้เคียงกับสีมาตรฐานจากผู้ผลิตมาก สามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment) ในงานวิจัยได้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell จำนวน 24 สี

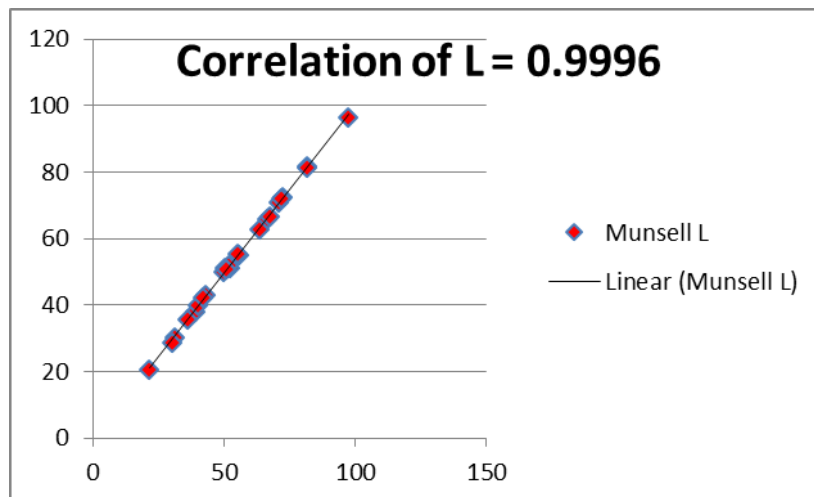
| Munsell | Munsell L | Munsell A | Munsell B |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Color 1 | 37.99 | 13.56 | 14.06 |
| Color 2 | 65.71 | 18.13 | 17.81 |
| Color 3 | 49.93 | -4.88 | -21.93 |
| Color 4 | 43.14 | -13.10 | 21.91 |
| Color 5 | 55.11 | 8.84 | -25.40 |
| Color 6 | 70.72 | -33.40 | -0.20 |
| Color 7 | 62.66 | 36.07 | 57.10 |
| Color 8 | 40.02 | 10.41 | -45.96 |
| Color 9 | 51.12 | 48.24 | 16.25 |
| Color 10 | 30.33 | 22.98 | -21.59 |
| Color 11 | 72.53 | -23.71 | 57.26 |
| Color 12 | 71.94 | 19.36 | 67.86 |
| Color 13 | 28.78 | 14.18 | -50.30 |
| Color 14 | 55.26 | -38.34 | 31.37 |
| Color 15 | 42.10 | 53.38 | 28.19 |
| Color 16 | 81.73 | 4.04 | 79.82 |
| Color 17 | 51.94 | 49.99 | -14.57 |
| Color 18 | 51.04 | -28.63 | -28.64 |
| Color 19 | 96.54 | -0.43 | 1.19 |
| Color 20 | 81.26 | -0.64 | -0.34 |
| Color 21 | 66.77 | -0.73 | -0.50 |

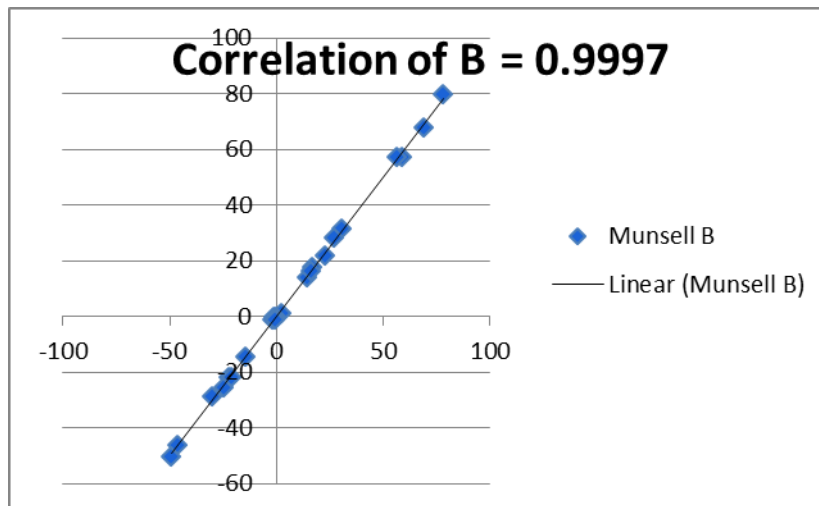
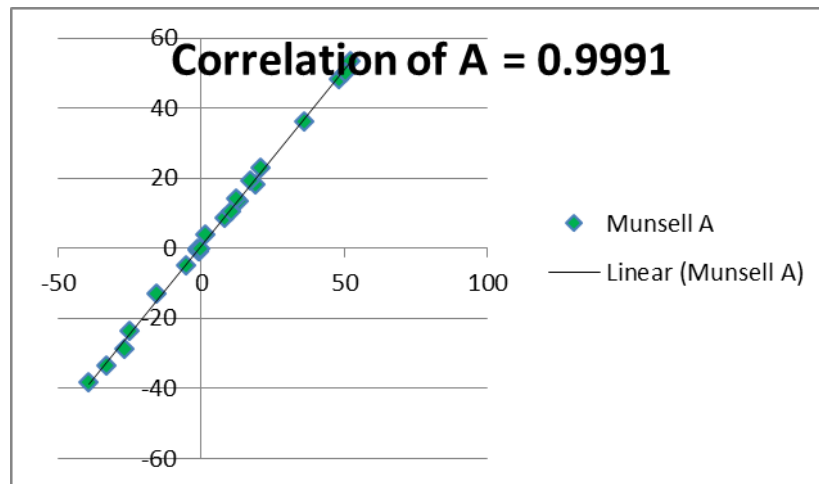


ภาพที่ 3.14 ภาพแผ่นสีมาตรฐาน Munsell

ตารางที่ 3.2 แสดงค่ามัธยฐานและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ SpectroDrive

| Spectro. | L | A | B |
|----------|------------|-------------|-------------|
| Color 1 | 38.85±0.16 | 13.07±0.53 | 14.14±0.61 |
| Color 2 | 66.1±0.14 | 19.03±0.88 | 16.59±0.79 |
| Color 3 | 49.69±0.15 | -5.32±0.53 | -22.39±0.85 |
| Color 4 | 42.79±0.31 | -15.53±0.73 | 22.75±0.84 |
| Color 5 | 55.54±0.15 | 7.97±0.32 | -25.14±0.53 |
| Color 6 | 70.68±0.27 | -33.21±0.8 | -1.18±0.75 |





ภาพที่ 3.15 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ระหว่าง
แผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ SpectroDrive

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab}
ระหว่างแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ SpectroDrive

| | Munsell L | Spectro L | Munsell A | Spectro A | Munsell B | Spectro B | ΔE_{ab} |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| Color 1 | 37.99 | 38.85 | 13.56 | 13.07 | 14.06 | 14.15 | 0.998 |
| Color 2 | 65.71 | 66.11 | 18.13 | 19.03 | 17.81 | 16.59 | 1.568 |
| Color 3 | 49.93 | 49.7 | -4.88 | -5.33 | -21.93 | -22.39 | 0.689 |
| Color 4 | 43.14 | 42.79 | -13.1 | -15.54 | 21.91 | 22.76 | 2.611 |
| Color 5 | 55.11 | 55.55 | 8.84 | 7.98 | -25.4 | -25.15 | 1.003 |
| Color 6 | 70.72 | 70.68 | -33.4 | -33.22 | -0.2 | -1.19 | 1.004 |
| Color 7 | 62.66 | 63.57 | 36.07 | 36.06 | 57.1 | 58.41 | 1.596 |
| Color 8 | 40.02 | 39.99 | 10.41 | 10.53 | -45.96 | -46.35 | 0.399 |
| Color 9 | 51.12 | 52.15 | 48.24 | 47.99 | 16.25 | 16.19 | 1.06 |
| Color 10 | 30.33 | 30.92 | 22.98 | 20.59 | -21.59 | -21.51 | 2.462 |
| Color 11 | 72.53 | 72.13 | -23.71 | -24.96 | 57.26 | 56.06 | 1.778 |
| Color 12 | 71.94 | 71.84 | 19.36 | 17.31 | 67.86 | 68.76 | 2.248 |
| Color 13 | 28.78 | 30 | 14.18 | 12.13 | -50.3 | -49.32 | 2.581 |
| Color 14 | 55.26 | 55.22 | 22.24 | 22.51 | 21.27 | 22.64 | 1.491 |

2) วิเคราะห์ผลการสอบเทียบระบบประมวลผลภาพ

ตารางที่ 3.4 แสดงค่ามัธยฐาน (Median) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของภาพแผ่นสี Munsell จำนวน 26 ภาพ เมื่อพิจารณาค่าในตารางพบว่าการวัดค่าสี มีค่าความเบี่ยงเบนต่ำในทุก Channel แสดงให้เห็นว่าระบบประมวลผลภาพมีความเสถียร (Stability) ในการทำงาน

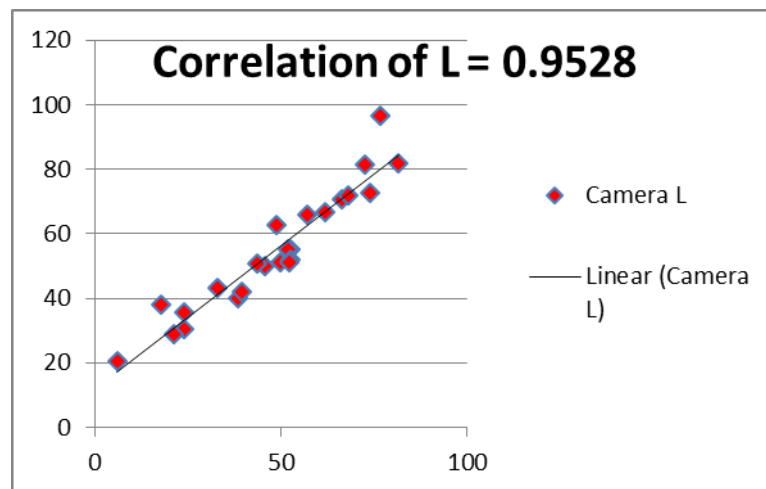
ภาพที่ 3.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับค่าเฉลี่ยสีของภาพแผ่นสี Munsell มีค่าใน Channel L เท่ากับ 0.9528, Channel a เท่ากับ 0.9727 และ Channel b เท่ากับ 0.9934 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันทางบวกในระดับสูงของค่าสี มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ใกล้เคียงกับแผ่นสีมาตรฐาน

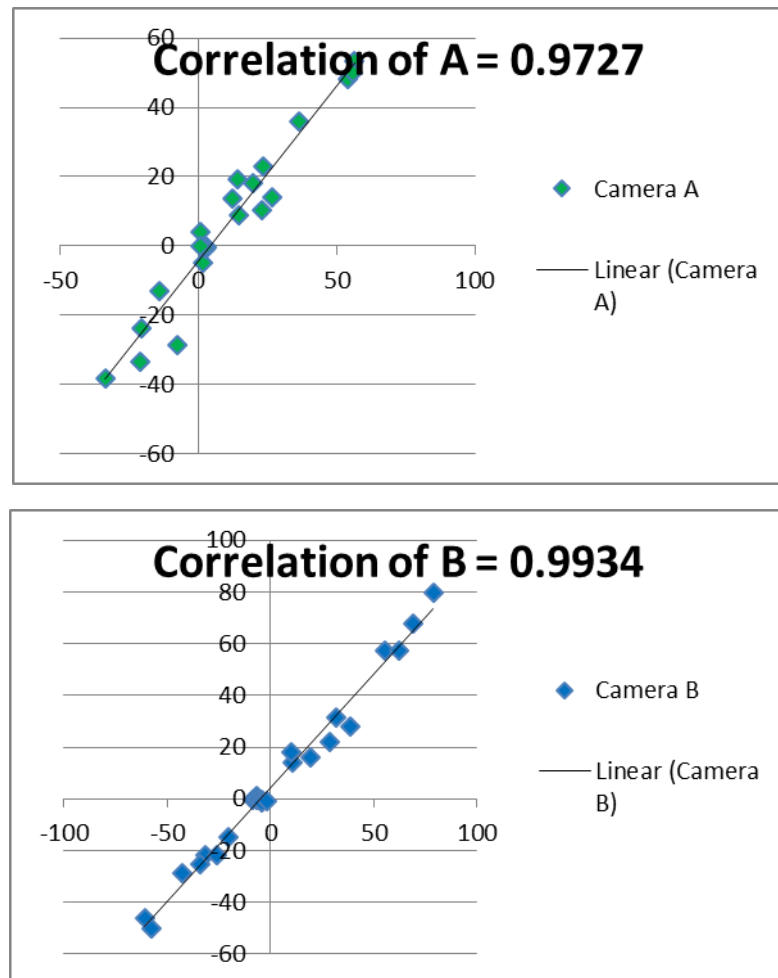
ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ระหว่าง ค่าสีของแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ ค่าเฉลี่ยสีภาพแผ่นสี Munsell พบว่ามีค่า ΔE_{ab} มากกว่า 5.0 แสดงความแตกต่างของสีในระดับที่สังเกตเห็นสีแตกต่างกันชัดเจน

สรุปผลการสอบเทียบแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับระบบประมวลผลภาพ เมื่อพิจารณาจาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าระบบประมวลผลภาพมีความเสถียร (Stability) ในการทำงาน แต่การถ่ายทอดสีมีความแตกต่างของสี ΔE_{ab} มากกว่า 5.0 ซึ่งในงานวิจัยจะใช้การประมาณค่าในช่วง เพื่อประมาณค่าสีระหว่าง Spectrodrive กับระบบประมวลผลภาพ

ตารางที่ 3.4 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแถบสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ

| Camera | L | A | B |
|----------|------------|-------------|-------------|
| Color 1 | 17.59±0.13 | 12.36±0.09 | 10.51±0.09 |
| Color 2 | 56.87±0.21 | 19.85±0.04 | 9.94±0.09 |
| Color 3 | 45.58±0.2 | 1.51±0.04 | -31.31±0.08 |
| Color 4 | 33.06±0.18 | -13.98±0.05 | 28.42±0.13 |
| Color 5 | 52.61±0.2 | 14.37±0.03 | -34.09±0.09 |
| Color 6 | 66.45±0.19 | -20.93±0.03 | -8.79±0.08 |
| Color 7 | 48.82±0.2 | 36.24±0.06 | 55.56±0.17 |
| Color 8 | 38.39±0.17 | 23.15±0.06 | -61.05±0.08 |
| Color 9 | 49.76±0.18 | 54.13±0.09 | 19.09±0.06 |
| Color 10 | 23.8±0.15 | 23.28±0.09 | -26.22±0.08 |
| Color 11 | 74.09±0.19 | -20.69±0.04 | 61.97±0.12 |
| Color 12 | 68±0.2 | 14.3±0.06 | 69.35±0.15 |
| Color 13 | 21.11±0.12 | 26.44±0.07 | -57.45±0.15 |
| Color 14 | 51.69±0.21 | -33.72±0.05 | 31.49±0.11 |
| Color 15 | 39.34±0.17 | 56.55±0.15 | 38.38±0.11 |





ภาพที่ 3.16 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง
แผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับ ระบบประมวลผลภาพ

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความแตกต่างของสี ΔE_{ab} ระหว่างแผ่นสีมาตรฐาน Munsell กับระบบ
ประมวลผลภาพ

| | Munsell L | Camera L | Munsell A | Camera A | Munsell B | Camera B | ΔE |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|------------|
| Color 1 | 37.99 | 17.6 | 13.56 | 12.37 | 14.06 | 10.51 | 20.729 |
| Color 2 | 65.71 | 56.88 | 18.13 | 19.86 | 17.81 | 9.94 | 11.955 |
| Color 3 | 49.93 | 45.58 | -4.88 | 1.51 | -21.93 | -31.31 | 12.161 |
| Color 4 | 43.14 | 33.07 | -13.1 | -13.99 | 21.91 | 28.43 | 12.033 |
| Color 5 | 55.11 | 52.61 | 8.84 | 14.38 | -25.4 | -34.09 | 10.604 |
| Color 6 | 70.72 | 66.46 | -33.4 | -20.93 | -0.2 | -8.79 | 15.729 |
| Color 7 | 62.66 | 48.83 | 36.07 | 36.25 | 57.1 | 55.57 | 13.92 |
| Color 8 | 40.02 | 38.4 | 10.41 | 23.15 | -45.96 | -61.06 | 19.818 |
| Color 9 | 51.12 | 49.77 | 48.24 | 54.13 | 16.25 | 19.09 | 6.682 |
| Color 10 | 30.33 | 23.81 | 22.98 | 23.29 | -21.59 | -26.23 | 8.007 |
| Color 11 | 72.53 | 74.09 | -23.71 | -20.7 | 57.26 | 61.97 | 5.807 |
| Color 12 | 71.94 | 68 | 19.36 | 14.3 | 67.86 | 69.35 | 6.586 |
| Color 13 | 28.78 | 21.12 | 14.18 | 26.45 | -50.3 | -57.45 | 16.139 |
| Color 14 | 55.26 | 51.7 | -38.34 | -33.73 | 31.37 | 31.49 | 5.831 |
| Color 15 | 42.1 | 39.34 | 53.38 | 56.55 | 28.19 | 38.39 | 11.028 |

บทที่ 4 การประเมินผลงานวิจัย

การพิมพ์สีพื้น เป็นงานขั้นตอนแรกของการพิมพ์ธนบัตร ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ออฟเซตแห้ง (Dry offset) ที่สามารถพิมพ์ภาพได้ทั้งสองด้านในเวลาเดียวกัน เครื่องพิมพ์มีความเร็วในการพิมพ์ 2 แผ่นต่อวินาที ทำให้การรักษาคุณภาพด้านสีของแผ่นพิมพ์ทุกๆ แผ่นให้คงที่มีความยากลำบากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย การวัดและควบคุมค่าสีด้วยวิธีการประมวลผลภาพสามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสตรวจแผ่นพิมพ์จากเครื่องจักร มีประโยชน์ช่วยพนักงานพิมพ์ในการปรับแต่งสีให้สม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการพิมพ์ ทำให้สามารถผลิตงานพิมพ์คุณภาพสูงได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยประหยัดเวลาและลดการสูญเสียผลผลิต

ในขั้นตอนการพิมพ์สีพื้น มีการควบคุมคุณภาพสีแผ่นพิมพ์สีพื้น ด้วยวิธีการตรวจวัดค่าสีหมึกพิมพ์บนแผ่นพิมพ์ โดยใช้เครื่องมือ Spectrophotometer กราฟวัดค่าสีบนแผ่นพิมพ์ที่บริเวณแถบควบคุมสี (Colors Bar)

แถบควบคุมสี (Colors Bar) คือ แถบสีที่พิมพ์บริเวณขอบของแผ่นพิมพ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ช่างพิมพ์ใช้ตรวจดูปริมาณหมึกพิมพ์ที่จ่ายลงบนแผ่นพิมพ์ในแต่ละโซน ให้มีสีสม่ำเสมอตั้งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม และใช้ในการติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีในการพิมพ์ [17]



ภาพที่ 4.1 เครื่องมือ SpectroDrive และแถบควบคุมสี

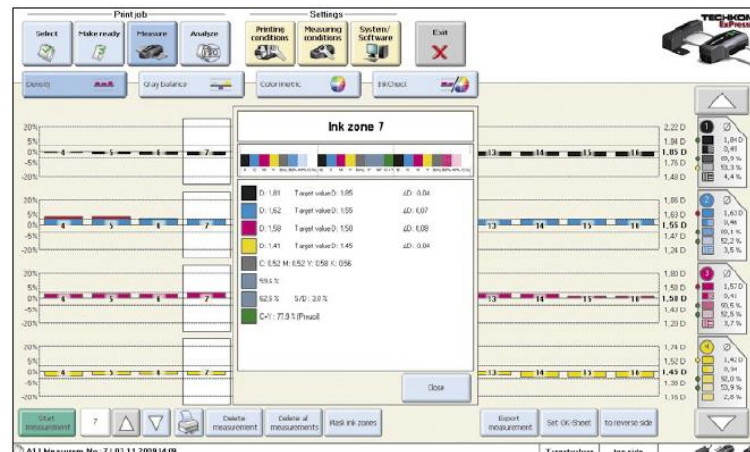
เครื่องมือ Spectrophotometer คือ เครื่องมือวัดค่าสี ยี่ห้อ Techkon รุ่น SpectroDrive ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกว่า SpectroDrive มีหลักการทำงาน คือ มีแหล่งกำเนิดแสงภายในตัวเครื่อง ส่งแสงไปยังพื้นผิวของวัตถุ แสงที่สะท้อนกลับจากวัตถุ จะถูกวัดค่าความยาวคลื่นแสง (Color Spectrum) เพื่อคำนวณค่าสีตามระบบสี CIE Lab

4.1 การควบคุมคุณภาพสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรในขั้นตอนการปฏิบัติ ดังนี้

- 1) เจ้าหน้าที่จะสุ่มเก็บแผ่นพิมพ์ตัวอย่างจากเครื่องพิมพ์ จำนวน 2 แผ่น นำวางบนโต๊ะปฏิบัติงานที่มีพื้นผิวสีดำ เพื่อป้องกันสีจากด้านหลังแผ่นพิมพ์ที่อาจส่องผ่านกระดาษและส่งผลกระทบต่อการอ่านค่าสี
- 2) การสอบเทียบค่าสีกระดาษขาว (Paper White Calibration) คือ การสอบเทียบเครื่อง SpectroDrive ก่อนใช้งานทุกครั้ง ด้วยการวิธีการใช้ SpectroDrive อ่านค่าสีกระดาษขาว บริเวณที่ไม่มีภาพพิมพ์ เพื่อหาผลต่างระหว่างสีขาวของกระดาษกับค่าสีที่อ่านได้จากแผ่นพิมพ์ตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าสีหมึกพิมพ์ที่ถูกต้อง
- 3) หลังจากสอบเทียบค่าสีกระดาษขาวแล้ว จึงใช้ SpectroDrive กราดอ่านค่าสีแถบควบคุมสีบนแผ่นพิมพ์ตัวอย่าง โดยตั้งค่าการอ่าน ดังนี้
 - การอ้างอิงค่าสีขาว (White Reference) แบบ Absolute White
 - แหล่งกำเนิดแสง (Daylight Illumination) แบบ D50
 - องศาสังเกตการณ์ (Observer) แบบ 2°
 - การคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างสี (Color Difference) ใช้สมการ CIE ΔE_{ab} 1986 หรือ ΔLab ตามสมการที่ (3)
- 4) โปรแกรม ExPresso จะคำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ระหว่าง ค่าสีมาตรฐาน (CIE Lab STD) กับค่าสีแผ่นพิมพ์ตัวอย่าง ผลลัพธ์คือ ค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} โดยมีมาตรฐานค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} น้อยกว่า 5
 ดังนั้น แผ่นพิมพ์ตัวอย่างมีความแตกต่างค่าสี ΔE_{ab} น้อยกว่า 5 คือ แผ่นพิมพ์ที่มีคุณภาพสีถูกต้อง (Good) หากแผ่นพิมพ์ตัวอย่างมีความแตกต่างค่าสี ΔE_{ab} มากกว่า 5 คือ แผ่นพิมพ์ที่มีคุณภาพสีไม่ถูกต้อง (Reject)



ภาพที่ 4.2 แผ่นพิมพ์ตัวอย่างและแถบควบคุมสีด้านล่าง



ภาพที่ 4.3 โปรแกรม Expresso ที่ใช้ประมวลผลค่าสีของแผ่นพิมพ์

4.2 การเก็บตัวอย่างแถบควบคุมสีในงานวิจัย

แผ่นพิมพ์ธนบัตรที่เลือกเป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ คือ ธนบัตรชนิดราคา 20 บาท แบบ 16 เพราะเป็นแบบที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบันและมีปริมาณการผลิตสูง มีการออกใช้ธนบัตรหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจเป็นปริมาณมาก

กระบวนการผลิตธนบัตรประกอบด้วย 5 ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

1. การพิมพ์สีพื้น
2. การพิมพ์สีเส้นนูน
3. การพิมพ์เลขหมายลายเซ็น
4. การตรวจสอบคุณภาพ
5. การตัดบรรจุธนบัตรสำเร็จรูป

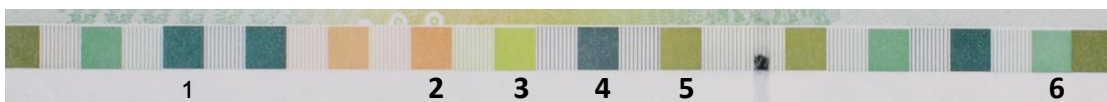
การเก็บตัวอย่างแถบควบคุมสีกระทำที่ขั้นตอนที่ 5 การตัดบรรจุธนบัตรสำเร็จรูป ซึ่งแผ่นพิมพ์ธนบัตรจะถูกตัดเป็นรายฉบับ และเข้าสู่การรัดแหวน รัดมัด และห่อด้วยพลาสติก แถบควบคุมสีจะถูกตัดเป็นชิ้นๆ มีขนาดเท่ากับธนบัตรรายฉบับ การเก็บตัวอย่างแถบควบคุมสี มีรายละเอียด ดังนี้

- เก็บตัวอย่างแถบควบคุมสี จำนวน 50 ตัวอย่าง จากแผ่นพิมพ์ จำนวน 25,000 แผ่น
- ตัวอย่างแถบควบคุมสี จำนวน 50 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นด้านหน้า จำนวน 25 ตัวอย่าง และด้านหลัง จำนวน 25 ตัวอย่าง
- ตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหน้า จำนวน 25 ตัวอย่าง มีจุดสีที่ต้องการอ่านค่าสี ขนาด 5.0 x 5.0 มม. จำนวน 5 จุด ตามภาพที่ 4.4

- ตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหลัง จำนวน 25 ตัวอย่าง มีจุดสีที่ต้องการอ่านค่าสี ขนาด 5.0 x 5.0 มม. จำนวน 6 จุด ตามภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 แถบควบคุมสี ด้านหน้า มีจุดสีที่ต้องการอ่านค่าสี จำนวน 5 จุด



ภาพที่ 4.5 แถบควบคุมสี ด้านหลัง มีจุดสีที่ต้องการอ่านค่าสี จำนวน 6 จุด

ข้อจำกัดของงานวิจัย คือ การวัดค่าสีแถบควบคุมสีในขั้นตอนการพิมพ์สีพื้น สีของตัวอย่าง แถบควบคุมสียังไม่แห้ง แต่ตัวอย่างที่เก็บจากชั้นงานที่ 5 การผลิตธนบัตรสำเร็จรูปนั้น มีระยะเวลา ท่างกันประมาณ 40 วัน สีของตัวอย่างแห้งสนิท ดังนั้นค่าสีที่วัดได้จากเครื่อง SpectroDrive อาจให้ ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากค่าสีมาตรฐาน (CIE Lab STD)

4.3 การวัดค่าสีแถบควบคุมสีด้วย SpectroDrive

- 1) ก่อนใช้ SpectroDrive ทำการสอบเทียบค่าสีกระดาษขาว(Paper White Calibration) โดยใช้ SpectroDrive อ่านค่าสีกระดาษขาวของแถบควบคุมสี บริเวณที่ไม่มีกราฟพิมพ์
- 2) นำตัวอย่างแถบควบคุมสี ด้านหน้า 5 ตัวอย่าง และด้านหลัง 5 ตัวอย่าง วางบนกระดาษที่มีพื้นผิวสีดำ เพื่อป้องกันสีจากด้านหลังแผ่นพิมพ์ที่อาจส่องผ่านกระดาษและส่งผลกระทบต่อ การอ่านค่าสี
- 3) ใช้ SpectroDrive อ่านค่าสีแถบควบคุมสีด้านหน้า จำนวน 5 จุด และแถบควบคุมสี ด้านหลัง จำนวน 6 จุด ตามภาพที่ 4.4 และ 4.5 จุดละ 25 ครั้ง จุดสีดังกล่าวมีขนาด 5.0 x 5.0 มม.และ SpectroDrive มีขนาดหัวอ่าน \varnothing 3.0 มม. ทำให้การอ่านค่าสีครอบคลุม พื้นที่ส่วนใหญ่ของจุดสี โดยตั้งค่าการอ่าน ดังนี้
 - การอ้างอิงค่าสีขาว (White Reference) แบบ Absolute White
 - แหล่งกำเนิดแสง (Daylight Illumination) แบบ D50
 - องศาสังเกตการณ์ (Observer) แบบ 2°
 - การคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างสี (Color Difference) ใช้สมการ CIE ΔE_{ab} 1986 หรือ ΔLab ตามสมการที่ (3)
- 4) โปรแกรม ExPresso คำนวณค่าสีของแถบควบคุมสี ตามระบบสี CIE Lab และบันทึก ผลลัพธ์ในไฟล์รูปแบบ Text เพื่อนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรม Excel ต่อไป

- 5) ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดแถบควบคุมสีด้านหน้าและด้านหลังวัดค่าสีด้วย SpectroDrive

4.4 การวัดค่าสีแถบควบคุมสีด้วยระบบประมวลผลภาพ

การบันทึกภาพแถบควบคุมสี มีขั้นตอน ดังนี้

- 1) การบันทึกภาพแถบควบคุมสี ใช้กล้องบันทึกภาพดิจิทัล Canon EOS 40D เลนส์ EF-S ความยาวโฟกัส 18-55 mm. ปรับรูรับแสง F3.6-5.6 บันทึกภาพด้วยความละเอียด 10.0 Megapixel ปรับตั้งโหมดการบันทึกภาพใน ระบบสี sRGB
- 2) แหล่งกำเนิดแสงใช้โคมไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode: LED) จำนวน 2 ชุด อุณหภูมิแสง 6500 K เพื่อให้มีความส่องสว่างคงที่ โดยติดตั้งที่ตำแหน่งด้านข้างทั้งสอง ด้านทำมุม 45° กับแนวแกนของกล้อง เพื่อให้แสงครอบคลุมชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ มีระยะห่างจากชิ้นงานประมาณ 30 ซม.
- 3) นำตัวอย่างแถบควบคุมสี ด้านหน้า จำนวน 25 ตัวอย่าง และด้านหลัง 25 ตัวอย่าง วาง บริเวณจุดศูนย์กลางของขอบเขตการมอง (Field of View) ครั้งละจำนวน 5 ตัวอย่าง บน กระดาษที่มีพื้นผิวสีดำ เพื่อป้องกันแสงสะท้อนและสีจากด้านหลังแถบควบคุมสีที่อาจส่อง ผ่านกระดาษและส่งผลกระทบต่อค่าการอ่านค่าสี
- 4) ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป EOS Utility เชื่อมต่อกับกล้องด้วยสาย USB เพื่อควบคุมการ บันทึกภาพ โดยบันทึกไฟล์ในรูปแบบ RAW
- 5) ตัวอย่างแถบควบคุมสี จำนวน 50 ตัวอย่าง บันทึกภาพครั้งละ 5 ตัวอย่าง จำนวน 60 ภาพ บันทึกภาพรวมทั้งสิ้น จำนวน 300 ภาพ ตามภาพที่ 4.6 การบันทึกภาพมีค่าปรับตั้ง กล้อง ดังนี้

File name 111B_01.TIF

File Size 29.0MB

Camera Model Canon EOS 40D

FirmwareFirmware Version 1.1.1

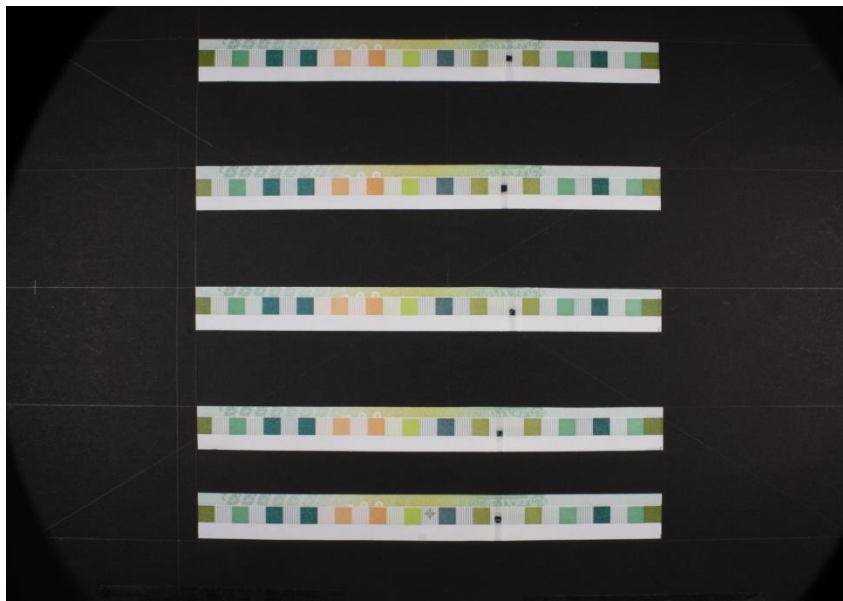
Shooting Date/Time 24/2/2557 9:41:03

Shooting Mode Manual Exposure

Tv(Shutter Speed) 1.6

Av(Aperture Value) 18

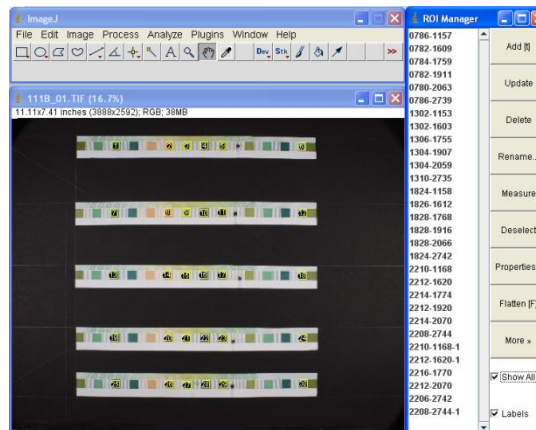
Metering Mode Spot Metering
 ISO Speed 100
 Lens EF-S18-55mm f/3.5-5.6 IS
 Focal Length 21.0mm
 Image Size 3888x2592
 Color Space sRGB v1.31 (Canon)



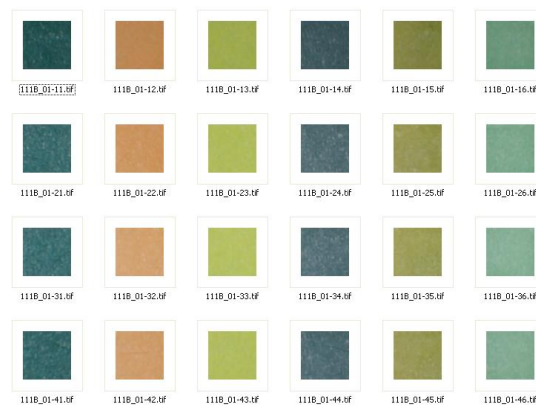
ภาพที่ 4.6 ภาพแถบควบคุมสีแถบควบคุมสี

การแปลงค่าสีแถบควบคุมสี จากระบบสี sRGB ให้อยู่ในระบบสี CIE Lab มีสองขั้นตอน ดังนี้

- 1) ใช้โปรแกรม ImageJ 1.47V แบ่งส่วนของภาพเฉพาะแถบสีส่วนที่ต้องการ (Region Of Interest: ROI) จากนั้นบันทึกภาพ ROI นั้นในรูปแบบ TIF File ภาพดังกล่าวมีค่าสีอยู่ในระบบสี sRGB



ภาพที่ 4.7 โปรแกรม ImageJ ใช้แบ่งส่วนของภาพและบันทึกภาพ ROI



ภาพที่ 4.8 ภาพ ROI จุดสีบนแถบควบคุมสี

2) ใช้โปรแกรม Matlab R2013a อ่านค่าสีเฉลี่ยจากทุก Pixel ของภาพ ROI ภาพที่ 4.8 ในระบบสี sRGB จากนั้นแปลงค่าสีให้เป็นระบบสี CIE Lab โดยใช้ Function ดังต่อไปนี้

- `Makeform (srgb2lab,'AdaptedWhitePoint', whitepoint ('icc'))`
- `applycform(A,C)`

การคำนวณหาค่าความแตกต่างของค่าสีในระบบ CIE Lab ระหว่างเครื่องมือวิจัยนั้น ใช้สมการของ CIE 1986 หรือ $CIE \Delta E_{ab}$ โดยใช้สมการที่ (3) ประมวลผลในโปรแกรม Excel

3) ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดแถบควบคุมสีด้านหน้าและด้านหลังวัดค่าสีด้วยระบบประมวลผลภาพ

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแถบควบคุมสีด้านหน้า
วัดค่าสีด้วย SpectroDrive

| Spectro. | | 111F | 148F | 176F | 953F | 974F |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Color 1 | L | ±1.1 | ±1.31 | ±0.39 | ±0.12 | ±0.55 |
| | A | ±0.26 | ±0.36 | ±0.13 | ±0.1 | ±0.16 |
| | B | ±0.77 | ±0.98 | ±0.6 | ±0.44 | ±0.32 |
| Color 2 | L | ±5.03 | ±3 | ±2.46 | ±1.63 | ±1.48 |
| | A | ±0.11 | ±0.35 | ±0.21 | ±0.11 | ±0.25 |
| | B | ±0.35 | ±0.73 | ±0.46 | ±0.16 | ±0.79 |
| Color 3 | L | ±0.78 | ±0.82 | ±0.67 | ±0.28 | ±0.35 |
| | A | ±0.49 | ±0.55 | ±0.33 | ±0.22 | ±0.39 |
| | B | ±1.42 | ±2.17 | ±1.37 | ±0.98 | ±1.98 |
| Color 4 | L | ±0.59 | ±0.76 | ±0.28 | ±4.62 | ±0.35 |
| | A | ±0.57 | ±0.68 | ±0.66 | ±1.42 | ±0.83 |
| | B | ±0.72 | ±0.64 | ±1 | ±2.16 | ±1.08 |
| Color 5 | L | ±2.1 | ±0.53 | ±0.35 | ±0.41 | ±0.56 |
| | A | ±1.72 | ±0.57 | ±0.34 | ±0.11 | ±0.42 |
| | B | ±1.01 | ±0.48 | ±0.26 | ±0.1 | ±0.22 |

ตารางที่ 4.2 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแถบควบคุมสีด้านหลัง

วัดค่าสีด้วย SpectroDrive

| Spectro. | | 111B | 148B | 176B | 953B | 974B |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Color 1 | L | ±0.56 | ±1.35 | ±0.87 | ±0.56 | ±1.06 |
| | A | ±1.01 | ±1.09 | ±0.97 | ±0.71 | ±1.12 |
| | B | ±0.07 | ±0.21 | ±0.16 | ±0.1 | ±0.08 |
| Color 2 | L | ±1.45 | ±0.42 | ±1.3 | ±0.2 | ±0.34 |
| | A | ±0.68 | ±0.32 | ±1.23 | ±0.56 | ±0.17 |
| | B | ±0.63 | ±0.31 | ±1.46 | ±0.92 | ±0.32 |
| Color 3 | L | ±0.92 | ±0.76 | ±0.37 | ±0.75 | ±0.54 |
| | A | ±0.37 | ±0.17 | ±0.24 | ±0.28 | ±0.23 |
| | B | ±1.48 | ±0.87 | ±0.86 | ±0.81 | ±0.83 |
| Color 4 | L | ±0.86 | ±0.9 | ±0.77 | ±0.56 | ±0.8 |
| | A | ±0.32 | ±0.45 | ±0.46 | ±0.18 | ±0.68 |
| | B | ±0.08 | ±0.15 | ±0.11 | ±0.05 | ±0.08 |
| Color 5 | L | ±1.04 | ±0.28 | ±0.69 | ±0.55 | ±0.66 |
| | A | ±0.44 | ±0.37 | ±0.18 | ±0.13 | ±0.1 |
| | B | ±1.24 | ±1.05 | ±0.97 | ±0.49 | ±1.47 |
| Color 6 | L | ±1.22 | ±0.98 | ±1.52 | ±0.27 | ±0.74 |
| | A | ±1.13 | ±0.93 | ±1.64 | ±0.54 | ±0.61 |
| | B | ±0.3 | ±0.45 | ±0.65 | ±0.31 | ±0.29 |

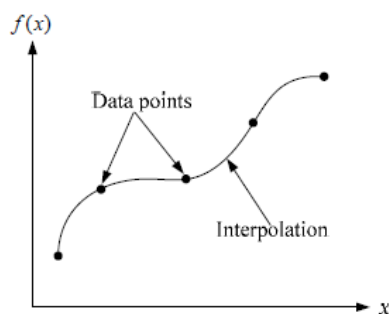
ตารางที่ 4.3 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแถบควบคุมสีด้านหน้า
วัดค่าสีด้วยระบบประมวลผลภาพ

| Camera | | 111F | 148F | 176F | 953F | 974F |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Color 1 | L | ±0.17 | ±0.12 | ±0.15 | ±0.07 | ±0.09 |
| | A | ±0.13 | ±0.12 | ±0.12 | ±0.14 | ±0.15 |
| | B | ±0.08 | ±0.09 | ±0.08 | ±0.07 | ±0.09 |

ตารางที่ 4.4 แสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแถบควบคุมสีด้านหลัง
วัดค่าสีด้วยระบบประมวลผลภาพ

| Camera | | 111B | 148B | 176B | 953B | 974B |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Color 1 | L | ±0.33 | ±0.04 | ±0.06 | ±0.08 | ±0.06 |
| | A | ±0.25 | ±0.06 | ±0.07 | ±0.08 | ±0.07 |
| | B | ±0.11 | ±0.06 | ±0.07 | ±0.06 | ±0.06 |
| Color 2 | L | ±0.29 | ±0.08 | ±0.08 | ±0.1 | ±0.07 |
| | A | ±0.15 | ±0.07 | ±0.07 | ±0.05 | ±0.05 |

การประมาณค่าในช่วง (Curve Fitting) ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์จะพบว่าข้อมูลที่เก็บโดยส่วนใหญ่จะเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Points) โดยมีตัวแปรอิสระ (Independent Variable, x) และตัวแปรตาม (Dependent Variable, y) และข้อมูลอยู่ในรูปแบบคู่อันดับ ด้วยวิธีการสร้างเส้นกราฟที่มีความต่อเนื่องผ่านจุดเหล่านั้น สร้างเป็นฟังก์ชัน $y = f(x)$ เพื่อให้ทราบค่าตัวแปร x ที่อยู่ระหว่างจุดของข้อมูลนั้น วิธีการดังกล่าวเรียกว่า การประมาณค่าในช่วง (Curve Fitting)

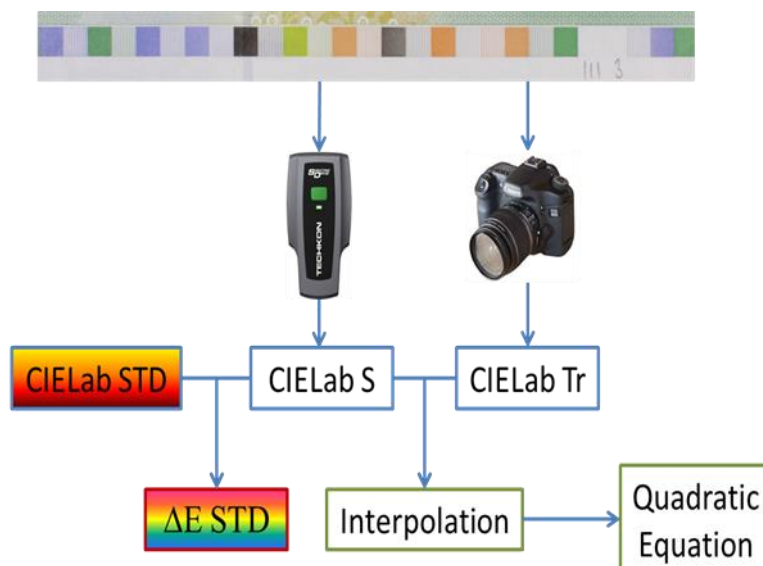


ภาพที่ 4.9 เทคนิคการ Interpolation

จากงานวิจัยของ Youssouf Chherawala และคณะ (2006) การคัดเลือกผลไม้ด้วยการประมวลผลภาพ ในระบบสี CIELab ซึ่งใช้การประมาณค่าในช่วงโดยใช้ผลต่างจากการแบ่งย่อยของนิวตัน (Newton's Interpolating Polynomials) โดยมีการทดลองแบบ Quadratic และ Cubic Polynomial Model ทั้งสองวิธีได้ค่า Confidence Bound เท่ากัน คือ 95% งานวิจัยเลือกใช้ Cubic Polynomial เพราะให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.92 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลกับ fitting curve ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก [18]

งานวิจัยนี้แบ่งตัวอย่างแถบควบคุมสีออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งใช้ในขั้นตอนการฝึกเส้นสีฟ้า จำนวน 40 ตัวอย่าง และส่วนที่สองใช้ในขั้นตอนการทดสอบเส้นสีแดง จำนวน 10 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังต่อไปนี้

4.5 ขั้นตอนการฝึก



ภาพที่ 4.10 ขั้นตอนการฝึก

- 1) คำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ระหว่างค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน (CIE Lab STD) กับค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive ข้อ 4.1.3 (CIE Lab S) ผลลัพธ์ คือ ค่าความแตกต่างสี (ΔE STD) ซึ่งงานวิจัยจะใช้ค่าความแตกต่างสี (ΔE STD) เป็นมาตรฐานในขั้นตอนการทดสอบต่อไป
- 2) การประมาณค่าในช่วง งานวิจัยใช้ MS Excel ในการทดลองสร้างกราฟและสมการประมาณค่าในช่วงแบบต่างๆ โดยกำหนดค่าแกน x คือ ค่าสีของแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ ข้อ 4.1.4 (CIE Lab Tr) และค่าแกน y คือ ค่าสีของแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive (CIE Lab S)
- 3) จากการทดลองสร้างกราฟและสมการประมาณค่าในช่วง Polynomial Order 1 ถึง 4 สมการต่างๆ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ซึ่งเป็นค่าที่อธิบายตัวแปรอิสระ x สามารถประมาณค่าการแปรปรวน (Variation) ของตัวแปรตาม y ได้มากน้อยเพียงใด เช่น $R^2 = 0.939$ หมายความว่าตัวแปร x สามารถประมาณค่าการแปรปรวนของตัวแปรตาม y ได้ 93.9 %
- 4) ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ของสมการประมาณค่าในช่วง Polynomial Order 1 ถึง 4 เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ x ของแถบควบคุมสีด้านหน้าและด้านหลัง งานวิจัยเลือกใช้ Polynomial Order 4 เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์ x สูงสุดในทุกค่าสีของแถบควบคุมสีด้านหน้าและด้านหลัง

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2

| Poly. | R^2 Front Side | | | R^2 Back Side | | |
|-------|------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| | L | A | B | L | A | B |
| 1 | 0.939 | 0.979 | 0.999 | 0.902 | 0.968 | 0.997 |
| 2 | 0.94 | 0.979 | 0.999 | 0.903 | 0.969 | 0.997 |
| 3 | 0.945 | 0.989 | 0.999 | 0.915 | 0.97 | 0.997 |
| 4 | 0.946 | 0.999 | 0.999 | 0.922 | 0.971 | 0.997 |

5) ดังนั้น สมการ Polynomial Order 4 ที่จะใช้ในขั้นตอนการทดสอบ เพื่อประมาณค่าสีของแถบควบคุมสี มีดังนี้

- สมการสำหรับแถบควบคุมสีด้านหน้า สมการที่ 4.1 – 4.3

สมการ Channel L

$$y = -1E-05x^4 + 0.0014x^3 - 0.053x^2 + 1.3023x + 26.931$$

(4.1)

สมการ Channel a

$$y = 1E-04x^4 + 0.0031x^3 - 0.0448x^2 + 0.4126x + 1.6995$$

(4.2)

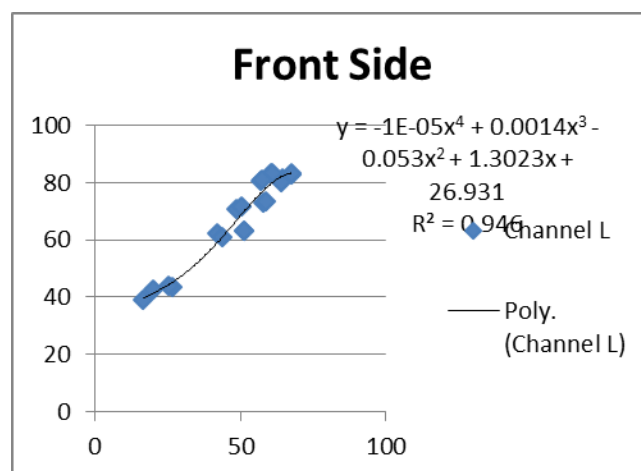
สมการ Channel b

$$y = -4E-07x^4 + 1E-05x^3 + 0.0004x^2 + 0.9903x + 1.6089$$

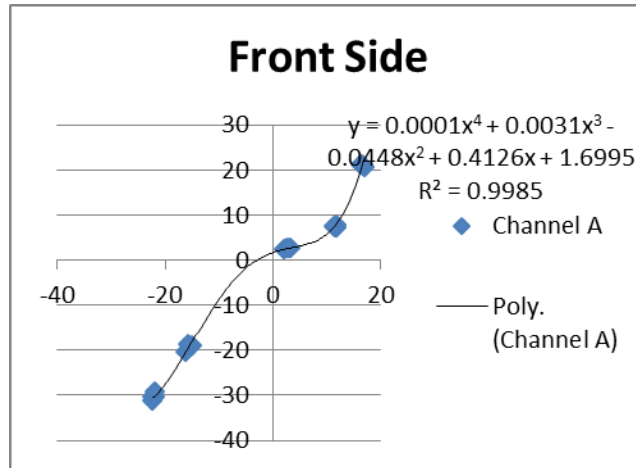
(4.3)

เมื่อ x = ค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ

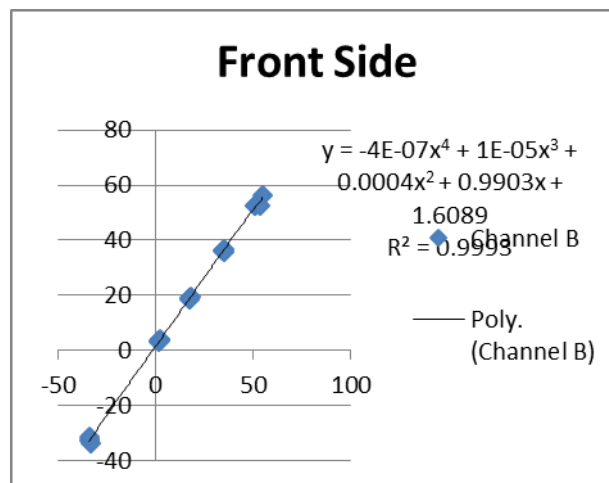
Y = ค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive



ภาพที่ 4.11 การประมาณค่าในช่วง Channel L แถบควบคุมสีด้านหน้า



ภาพที่ 4.12 การประมาณค่าในช่วง Channel a แถบควบคุมสีด้านหน้า



ภาพที่ 4.13 การประมาณค่าในช่วง Channel b แถบควบคุมสีด้านหลัง

- สมการสำหรับแถบควบคุมสีด้านหลัง สมการที่ 4.4 – 4.6

สมการ Channel L

$$y = 6E-05x^4 - 0.0134x^3 + 1.084x^2 - 36.787x + 494.36$$

(4.4)

สมการ Channel L

$$y = 4E-05x^4 - 0.0005x^3 - 0.0254x^2 + 1.5566x + 2.1984$$

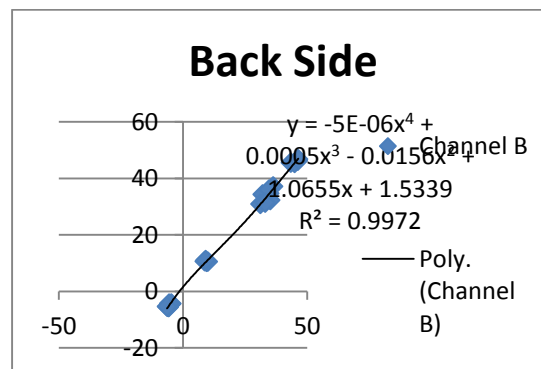
(4.5)

สมการ Channel L

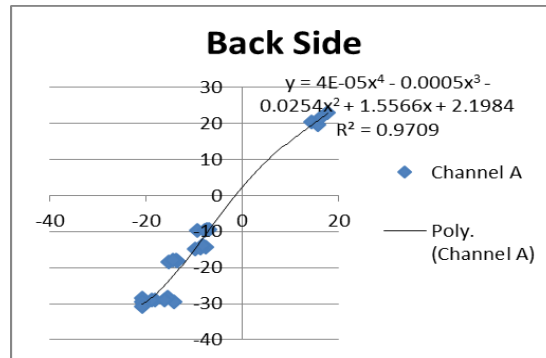
$$y = -5E-06x^4 + 0.0005x^3 - 0.0156x^2 + 1.0655x + 1.5339$$

(4.6)

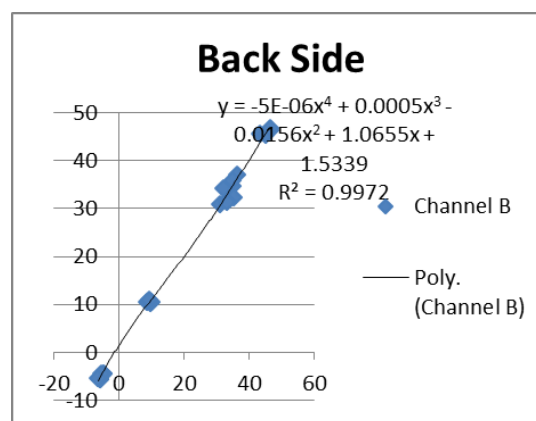
เมื่อ x = ค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ
 Y = ค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive



ภาพที่ 4.14 การประมาณค่าในช่วง Channel L แถบควบคุมสีด้านหลัง

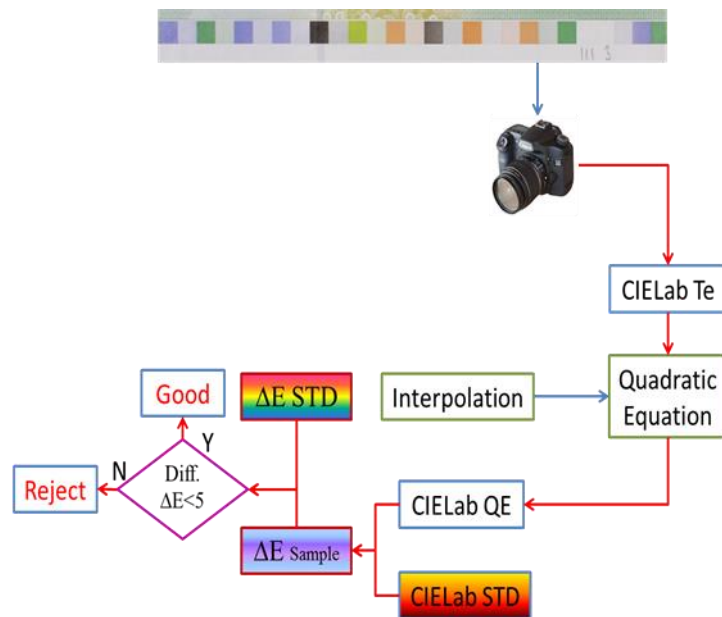


ภาพที่ 4.15 การประมาณค่าในช่วง Channel a แถบควบคุมสีด้านหลัง



ภาพที่ 4.16 การประมาณค่าในช่วง Channel b แถบควบคุมสีด้านหลัง

4.6 ขั้นตอนการทดสอบ



ภาพที่ 4.17 ขั้นตอนการทดสอบ เส้นสีแดง

- 1) ใช้สมการ Polynomial Order 4 ประมาณค่าช่วงข้อมูลสีโดยแทนค่าแกน x ด้วยค่าสีของแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ จากข้อ 4.1.3 (CIE Lab Te) ใน Channel L a และ b ได้ผลลัพธ์ คือ ค่าสีประมาณของแถบควบคุมสี (CIE Lab QE)
- 2) คำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ระหว่างค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน (CIE Lab STD) กับค่าสีแถบควบคุมสี (CIE Lab QE) ผลลัพธ์ คือ ค่าความแตกต่างสี ΔE Sample
- 3) คำนวณผลต่างระหว่าง ค่าความแตกต่างสี (ΔE STD) จากขั้นตอนการฝึก กับค่าความแตกต่างสี ΔE Sample ผลลัพธ์ จุดสีที่มีผลต่าง ΔE น้อยกว่า 5 มีค่าสีถูกต้องตรงตามมาตรฐาน (Good) และจุดสีที่มีผลต่าง Diff. ΔE มากกว่า 5 มีค่าสีไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพ (Reject)
- 4) ตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการทดสอบวัดค่าสีตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหน้าและด้านหลัง ตามขั้นตอนการทดสอบ ภาพที่ 4.16

4.7 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยแบ่งตัวอย่างแถบควบคุมสีออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งใช้ในขั้นตอนการฝึกจำนวน 40 ตัวอย่าง และส่วนที่สองใช้ในขั้นตอนการทดสอบ จำนวน 10 ตัวอย่าง

ในขั้นตอนการฝึก คำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ระหว่างค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน (CIE Lab STD) กับค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive ผลลัพธ์ คือ ค่าความแตกต่างสี (ΔE STD) ซึ่งกำหนดให้เป็นมาตรฐานใช้ในการตัดสินคุณภาพสีในขั้นตอนการทดสอบต่อไป

งานวิจัยใช้การประมาณค่าในช่วง เพื่อประมาณค่าสีระหว่างจุดในแต่ละ Channel ของสี โดยเลือกใช้ Polynomial Order 4 เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดในทุกค่าสี โดยกำหนดค่าแกน x คือ ค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ (CIE Lab Tr) และค่าแกน y คือ ค่าสีของแถบควบคุมสีที่วัดด้วย SpectroDrive (CIE Lab S)

ในขั้นตอนการทดสอบใช้สมการ Polynomial Order 4 ประมาณค่าสีแถบควบคุมสีที่วัดด้วยระบบประมวลผลภาพ ในทุก Channel จากนั้นคำนวณค่าความแตกต่างสีกับค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน (CIE Lab STD) ผลลัพธ์ คือ ค่าความแตกต่างสี ΔE Sample

เมื่อพิจารณาผลต่าง Diff. ΔE ระหว่างค่าความแตกต่างสี (ΔE STD) กับค่าความแตกต่างสี ΔE Sample ผลต่าง Diff. ΔE มีค่าน้อยกว่า 5 แสดงว่าแถบควบคุมสีมีค่าสีถูกต้องตรงตามมาตรฐาน (Good) หากผลต่าง Diff. ΔE มีค่ามากกว่า 5 แถบควบคุมสีนั้นไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพสี (Reject)

จากตารางที่ 4.6 ตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหน้า 5 ตัวอย่างๆ ละ 5 จุดสี รวมจุดสี 25 จุด มีจุดสีที่มีค่าผลต่าง Diff. ΔE มีค่าน้อยกว่า 5 คือ สีถูกต้องตรงตามมาตรฐาน (Good) มีจำนวน 8 จุด คิดเป็นร้อยละ 32 และจุดสีที่มีค่าผลต่าง Diff. ΔE มีค่ามากกว่า 5 คือ สีไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพสี (Reject) มีจำนวน 17 จุด คิดเป็นร้อยละ 68

จากตารางที่ 4.7 ตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหลัง 5 ตัวอย่างๆ ละ 6 จุดสี รวมจุดสี 30 จุด มีจุดสีที่มีค่าผลต่าง Diff. ΔE มีค่าน้อยกว่า 5 คือ สีถูกต้องตรงตามมาตรฐาน (Good) มีจำนวน 26 จุด คิดเป็นร้อยละ 86 และจุดสีที่มีค่าผลต่าง Diff. ΔE มีค่ามากกว่า 5 คือ สีไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพสี (Reject) มีจำนวน 4 จุด คิดเป็นร้อยละ 13

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบการวัดค่าสีตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหน้า

| No. | ΔE Sample | ΔE STD | Diff. ΔE |
|-----|-------------------|----------------|------------------|
| 1 | 6.95 | 5.503 | 1.45 |
| 2 | 9.61 | 12.239 | 2.629 |
| 3 | 14.15 | 5.841 | 8.311 |
| 4 | 14.45 | 9.067 | 5.386 |
| 5 | 13.92 | 8.183 | 5.736 |
| 6 | 15.06 | 5.503 | 9.556 |
| 7 | 12.42 | 12.239 | 0.182 |
| 8 | 21.05 | 5.841 | 15.212 |
| 9 | 20.27 | 9.067 | 11.207 |
| 10 | 22.83 | 8.183 | 14.643 |
| 11 | 20.98 | 5.503 | 15.476 |
| 12 | 14.12 | 12.239 | 1.885 |
| 13 | 21.98 | 5.841 | 16.138 |
| 14 | 21.76 | 9.067 | 12.694 |
| 15 | 26.57 | 8.183 | 18.388 |

ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบการวัดค่าสีตัวอย่างแถบควบคุมสีด้านหลัง

| No. | ΔE Sample | ΔE STD | Diff. ΔE |
|-----|-------------------|----------------|------------------|
| 1 | 4.38 | 6.442 | 2.066 |
| 2 | 8.58 | 9.831 | 1.253 |
| 3 | 9.21 | 8.689 | 0.517 |
| 4 | 3 | 8.335 | 5.33 |
| 5 | 7.24 | 11.448 | 4.207 |
| 6 | 7.54 | 6.505 | 1.034 |
| 7 | 6.05 | 6.442 | 0.387 |
| 8 | 7.49 | 9.831 | 2.339 |
| 9 | 7.83 | 8.689 | 0.86 |
| 10 | 4.45 | 8.335 | 3.88 |
| 11 | 5.62 | 11.448 | 5.833 |
| 12 | 4.47 | 6.505 | 2.035 |
| 13 | 6.78 | 6.442 | 0.341 |
| 14 | 7.56 | 9.831 | 2.268 |
| 15 | 7.93 | 8.689 | 0.76 |
| 16 | 6.82 | 8.335 | 1.516 |
| 17 | 6.05 | 11.448 | 5.399 |
| 18 | 5.29 | 6.505 | 1.216 |
| 19 | 6.69 | 6.442 | 0.247 |
| 20 | 6.9 | 9.831 | 2.929 |
| 21 | 7.7 | 8.689 | 0.986 |
| 22 | 4.62 | 8.335 | 3.711 |
| 23 | 5.75 | 11.448 | 5.698 |
| 24 | 4.63 | 6.505 | 1.879 |
| 25 | 5.81 | 6.442 | 0.634 |
| 26 | 8.69 | 9.831 | 1.144 |
| 27 | 8.88 | 8.689 | 0.187 |
| 28 | 3.91 | 8.335 | 4.425 |
| 29 | 6.73 | 11.448 | 4.716 |
| 30 | 4.19 | 6.505 | 2.315 |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การตรวจสอบคุณภาพแผ่นพิมพ์ธนบัตรถือเป็นขั้นตอนสำคัญขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตธนบัตร เพื่อให้ธนบัตรที่ประชาชนได้รับมีความครบถ้วนสมบูรณ์ และมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานการผลิต งานวิจัยเสนอวิธีการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพด้านสีในการพิมพ์ธนบัตร โดยวัดค่าสีของตัวอย่างแถบควบคุมสี ด้วยระบบประมวลผลภาพ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยมีกระบวนการในการตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ ให้มีความถูกต้องตามขอบเขตและมีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์อยู่ในมาตรฐานที่น่าเชื่อถือ โดยทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment) ที่รู้ค่าความถูกต้องแน่นอน ผลการสอบเทียบจะช่วยให้มีการปรับแก้ไข เพื่อชดเชยความบกพร่องของเครื่องมือ

การสอบเทียบในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นสีมาตรฐาน Munsell Color Checker เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment) ในการสอบเทียบเครื่องมือ Spectrophotometer เมื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่ามีค่าสัมพัทธ์กันทางบวก ในระดับสูงมาก ของระบบสี CIE Lab ในทุก Channel คือ L มีค่า 0.9996, a มีค่า 0.9991 และ b มีค่า 0.9997 และค่าความแตกต่างสี CIE ΔE_{ab} ของข้อมูลสี 24 สี มีค่า ΔE_{ab} ต่ำกว่า 5.0 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือ SpectroDrive สามารถถ่ายถอดค่าสีในทุก Channel ได้อย่างแม่นยำถูกต้อง ใกล้เคียงกับสีมาตรฐานจากผู้ผลิตมาก สามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิง (Reference Standards Equipment)

การสอบเทียบระบบประมวลผลภาพ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันทางบวก ในระดับสูง ของระบบสี CIE Lab ในทุก Channel คือ L มีค่า 0.9528, a มีค่า 0.9727 และ b มีค่า 0.9934 และค่าความแตกต่างสี CIE ΔE_{ab} ข้อมูลสีทั้งหมด 24 สี มีค่า ΔE_{ab} ต่ำสุด 3 และมีค่าสูงสุด 25 แสดงให้เห็นว่าระบบประมวลผลภาพมีความเสถียร (Stability) ในการทำงาน

งานวิจัยแบ่งข้อมูลค่าสีของตัวอย่างแถบควบคุมสีออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งใช้ในขั้นตอนการฝึกโดยคำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ระหว่างค่าสีจาก Spectrophotometer กับค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน และใช้ค่าความแตกต่างสีดังกล่าวเป็นมาตรฐานในขั้นตอนการทดสอบ

ข้อมูลตัวอย่างแถบควบคุมสีที่สองในขั้นตอนการทดสอบ ใช้การประมาณค่าในช่วง ด้วยสมการ Polynomial Order 4 ค่าสีที่ได้คำนวณค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} กับค่าสีแผ่นพิมพ์มาตรฐาน จากนั้นเปรียบเทียบหาผลต่างกับค่าความแตกต่างสีมาตรฐาน

จากตัวอย่างทดสอบ จำนวน 55 ตัวอย่าง เมื่อคำนวณหาผลต่างระหว่างค่าความแตกต่างสีมาตรฐานกับค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ตัวอย่างที่มีค่าน้อยกว่า 5 แสดงว่าแถบควบคุมสีมีค่าสีถูกต้องตรงตามมาตรฐาน (Good) จำนวน 34 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 61

การวิเคราะห์ข้อมูลค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} ของแถบควบคุมสี สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ว่าการวัดค่าสีของตัวอย่างแถบควบคุมสี ด้วยระบบประมวลผลภาพ โดยพิจารณาค่าความแตกต่างสี ΔE_{ab} สามารถนำไปใช้ในการวัดค่าสีและประเมินคุณภาพด้านสีของแถบควบคุมสีได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถตรวจสอบแผ่นพิมพ์ทุกแผ่นในกระบวนการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) งานวิจัยนี้แนะนำเสนอวิธีการ โดยวัดค่าสีของตัวอย่างแถบควบคุมสี ด้วยระบบประมวลผลภาพ ซึ่งวิธีการดังกล่าว สามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้กับเครื่องพิมพ์ธนบัตร เพื่อให้การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพสีในเวลาจริงทำได้อย่างต่อเนื่อง และสอดคล้องกับความเร็วของเครื่องจักร
- 2) ปัจจุบันเครื่องพิมพ์ธนบัตรมีความเร็วในการพิมพ์เพิ่มขึ้น การประเมินผลคุณภาพด้านสีของแผ่นพิมพ์ธนบัตร ด้วยการประมวลผลภาพ ในระบบสี CIE Lab เป็นวิธีการในปัจจุบัน ควรพิจารณาการประมวลผลภาพด้วยวิธีการอื่นๆ เช่น การประมวลผลค่าระดับเทา เป็นต้น
- 3) การเลือกใช้กล้องในระบบประมวลผลภาพ ควรคำนึงถึงการเกิดความบิดเบือนของภาพ (Image Distortion Effect) ควรเลือกใช้รุ่นที่มีผลกระทบน้อยที่สุด เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จะทำให้ได้ภาพและสีที่สมบูรณ์ เช่น การเลือกใช้กล้องแบบ Line Scan เป็นต้น
- 4) การปรับตั้งค่าความเร็วชัดเตอร์ รูรับแสง และ ISO ของกล้องควรพิจารณาให้สัมพันธ์กัน เพื่อให้ภาพมีความคมชัดและลดสัญญาณรบกวน

รายการอ้างอิง

- [1] http://www.bot.or.th/Thai/Banknotes/production_and_security/NPT_BankOfThailand/Pages/Historyof_NPT.aspx
- [2] <http://www.lesa.biz/astromy/light/em-waves>
- [3] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_1/emspectrum.html
- [4] Danny Pascale, A Review of RGB Color Space, The BabelColor Company, 2002-2003
- [5] DETLEV ARENDT, Evolution of eyes and photoreceptor cell types, Int. J. Dev. Biol. 47: 563-571 (2003)
- [6] <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~kchawan/cms/cms>
- [7] กมลทิพย์ พันธุ์ไพบีระ, ปานवास ประสาทศิลป์, คู่มือการผสมหมึกพิมพ์ Offset สำหรับบริษัท Prestige Printing จำกัด
- [8] A Guide to Understanding Graphic Arts Densitometry, X-rite
- [9] http://www.pressproof.com/Graphics_Library/printcncpts/printcncpts_c.html
- [10] <http://www.hunterlab.com/pdf/color.pdf>
- [11] Kit L. Yam , Spyridon E. Papadakis, A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces,
- [12] Cao Congjun, Sun jing, Study on Color Space Conversion between CMYK and CIE L*a*b* based on Generalized Regression Neural Network,
- [13] Katarine Leon, Domingo Mery, Franco Pedreschi Jorge Leon, Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images, P.1084-1091, Food Research International, 11 March 2006
- [14] Kun Li, Qionhai Dai, Wenli Xu, HIGH QUALITY COLOR CALIBRATION FOR MULTI-CAMERA SYSTEMS WITH AN OMNIDIRECTIONAL COLOR CHECKER, P.1026-1029, IEEE, 2010
- [15] X. Sun, H.J. Gong, F. Zhang, K.J. Chen, A digital image method for measuring and analyzing color characteristic of various color scores of beef, IEEE, 2009
- [16] Mokezycki W.S., Tatol M., Colour difference ΔE – A survey, Machine Graphic & Vision, 08.10.2012

- [17] <http://the-print-guide.blogspot.com/search/label/Tolerancing>
Youssef Chherawala, Richard Lepage, Gilles Doyon, Food Grading/Sorting Based on
Color Appearance Through Machine Vision: The Cas of Fresh Cranberries, P.1540-
1545, IEEE, 200

รายการอ้างอิง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ : ไพโรจน์ คล้ายเพชร

ชื่อวิทยานิพนธ์ : วิธีการวัดสีแผ่นพิมพ์ธนบัตรด้วยการประมวลผลภาพดิจิทัล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์สีพื้น

ประวัติการศึกษา :

จบการศึกษาปริญญาตรี พ.ศ. 2540 สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ประวัติการทำงาน :

ธนาคารแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2525 – ปัจจุบัน

สถานที่ติดต่อ :

เลขที่ 37/29 หมู่บ้านเลิศอุบล 3/2 ซอยลาดพร้าว-วังหิน 65 ถนนลาดพร้าว-วังหิน แขวงลาดพร้าว เขตลาดพร้าว จังหวัดกรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10230

