

การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันก์



นางสาวอารีรัตน์ ปฐมชัยวาลย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHARACTERIZATION OF EIGHT-COLOR INK JET PRINTER BASED ON
KUBELKA-MUNK EQUATION



MISS AREERAT PATHOMCHAIWAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkong University

อารีรัตน์ ปฐมชัยวาลย์ : การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มังก์. (CHARACTERIZATION OF EIGHT-COLOR INK JET PRINTER BASED ON KUBELKA-MUNK EQUATION) อ.ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สุจิตรา สีอประสาร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ จำนวน 93 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาลักษณะเฉพาะ (Characterization) ของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากข้อมูลสเปกตรัมด้วยสมการคูเบลคา-มังก์ โดยทำการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะจากชุดตัวอย่างสี (Training set) ที่ประกอบด้วยสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ จำนวน 9 ระดับ ที่ 0, 0.122, 0.247, 0.373, 0.498, 0.624, 0.749, 0.875 และ 1 และทำการวัดค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB ที่กำหนดเพื่อตั้งพิมพ์ และค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ โดยผ่านทางความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K) ของหมึกพิมพ์ที่คำนวณได้จากสมการคูเบลคา-มังก์กับความเข้มข้นของค่าสี RGB และทำการทดสอบความถูกต้องในการทำนายค่าสีด้วยชุดตัวอย่างสีทดสอบ (Test set) จำนวน 50 สี ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 ผลการทดสอบความถูกต้องของการทำนายค่าสเปกตรัมจากค่าสี RGB พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง $33 - 36 \Delta E_{ab}^*$ และความถูกต้องในการทำนายค่าสี RGB จากค่าสเปกตรัม มีค่าอยู่ระหว่าง $33 - 34 \Delta E_{ab}^*$ ซึ่งค่าความแตกต่างสีภายใต้ทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสง มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองลักษณะเฉพาะนี้ช่วยลดปัญหาการเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ลายมือชื่อผู้คิดค้น...
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา...
ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม...

487255283 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEY WORD : SPECTRAL DATA / CHARACTERIZATION / INK JET PRINTER

AREERAT PATHOMCHAIWAL : CHARACTERIZATION OF EIGHT-COLOR INK
JET PRINTER BASED ON KUBELKA-MUNK EQUATION.THESIS ADVISOR :
SUCHITRA SUEEPRASAN,Ph.D. THESIS COADVISOR : ASST. PROF.
PICHAYADA KATEMAKE,Ph.D. 93 pp.

This research aimed at characterizing an 8-color ink jet printer based on spectral reflectance data estimated from Kubelka-Munk equations. The training set was comprised of red, green and blue color patches printed at 9 different concentrations: 0, 0.122, 0.247, 0.373, 0.498, 0.624, 0.749, 0.875 and 1. The spectral data of prints were measured with a spectrophotometer. The relationship between the spectral data and RGB digital values was established through the relationship between the absorption coefficients (K) calculated from Kubelka-Munk equations and the concentrations of RGB values. The accuracy of the characterization model was investigated using a test set containing 50 color patches. CIELAB color difference between the predicted values and the measured values was calculated for 3 different illuminants: D65, A and F11. For the accuracy of spectral data prediction the ΔE_{ab}^* was found to be 33 – 36. In the case of RGB prediction, it was found to be 33 – 34 ΔE_{ab}^* . The results showed that the color differences were not much different for 3 different illuminants, revealing that this method helped reducing illuminant Metamerism.

Department of Imaging and Printing Technology Student's Signature.....*Arunat P.*

Field of Study Imaging Technology

Advisor's Signature.....*Suchitra S.*

Academic Year 2006

Co-advisor's Signature.....*Pichayada K.*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาร ที่ให้ความรู้ตลอดจนแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดี ความหวังใย และกำลังใจที่
ให้มาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ชาย น้องชายที่ให้กำลังใจเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

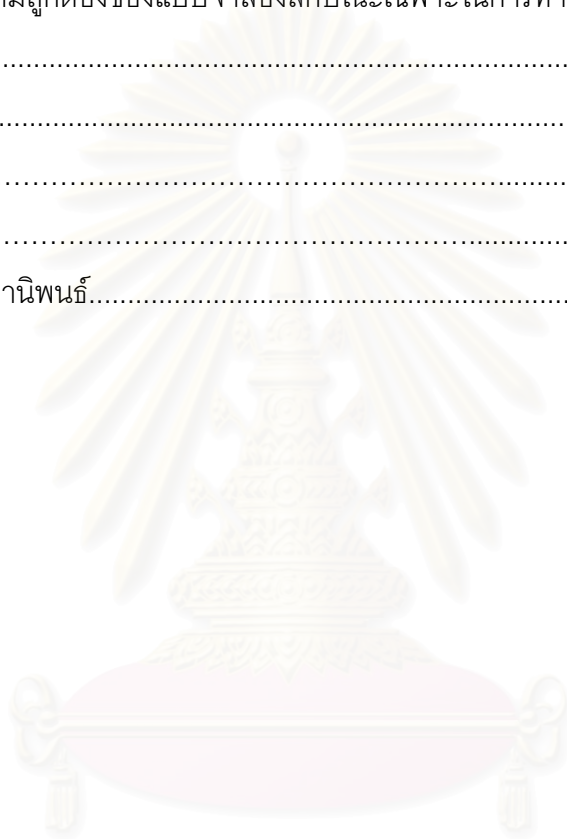
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
สารบัญแผนผัง.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.1.1 การมองเห็นสี.....	4
2.1.1.1 แหล่งกำเนิดแสง.....	4
2.1.1.2 วัตถุ.....	6
2.1.1.3 ตา.....	9
2.1.2 เมแทเมอริซึม.....	10
2.1.2.1 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง.....	11
2.1.2.2 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยผู้สังเกตการณ์.....	11
2.1.2.3 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยระยะทาง.....	11
2.1.2.4 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยการมุมมอง.....	11
2.1.3 การผสมสี.....	12
2.1.3.1 การผสมสีแบบบวก.....	12
2.1.3.2 การผสมสีแบบลบ.....	12
2.1.4 เทคโนโลยีของระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ต.....	13
2.1.4.1 ประเภทของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต.....	13

	หน้า
2.1.4.2 ประเภทของสารให้สีที่ใช้ในหมึกพิมพ์.....	15
2.1.4.3 การแห้งตัวของหมึกพิมพ์.....	15
2.1.4.4 ความละเอียดในการพิมพ์.....	15
2.1.4.5 กระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ต.....	16
2.1.5 การหาลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์.....	16
2.1.5.1 Colour-mixing models.....	16
2.1.5.2 Regression.....	17
2.1.5.3 Look-up table with interpolation.....	17
2.1.5.4 Cognitive methods.....	17
2.1.6 ทฤษฎีคูเบลคา-มันก์.....	18
2.1.7 ระบบการวัดสี CIE.....	23
2.1.7.1 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานซีไออี.....	23
2.1.7.2 วัตถุสี.....	23
2.1.7.3 ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานซีไออี.....	24
2.1.8 ค่าไตรสติมูลัส.....	24
2.1.9 ปริภูมิสี $L^*a^*b^*$	25
2.1.10 ความแตกต่างของสี.....	27
2.1.11 การหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ย.....	28
2.1.12 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ.....	28
2.1.12.1 ค่าเฉลี่ย.....	28
2.1.12.2 ค่ามัธยฐาน.....	29
2.1.12.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	29
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมภาพต้นฉบับ.....	31
3.2.1.1 การสร้างชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ...	32

3.2.1.2 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบ.....	33
3.2.1.2.1 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน.....	34
3.2.1.2.2 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale.....	34
3.2.1.2.3 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม.....	35
3.2.2 ขั้นตอนการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	35
3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ.....	41
3.2.3.1 การทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม.....	41
3.2.3.2 การทดสอบการทำนายค่าสี RGB.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผล.....	44
4.1 ผลการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท.....	44
4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ.....	50
4.2.1 ผลการทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม.....	50
4.2.1.1 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง.....	50
4.2.1.2 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว.....	53
4.2.1.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน.....	56
4.2.1.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม.....	58
4.2.1.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale.....	61
4.2.1.6 ผลการทดสอบรวมทุกชุดตัวอย่างสี.....	63
4.2.2 ผลการทดสอบการทำนายค่าสี RGB.....	64
4.2.2.1 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	64
4.2.2.2 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียวจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	67
4.2.2.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงินจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	69
4.2.2.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	72
4.2.2.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale ของหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	74
4.2.2.6 ผลการทดสอบรวมทุกชุดตัวอย่างสี.....	77
4.3 ความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งกับหมึกพิมพ์ชุดที่สอง.....	78

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.1.1 ความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	80
5.1.2 ความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะในการทำนายค่าสี RGB.....	81
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีแดง ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	53
ตารางที่ 4.2 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีเขียว ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	55
ตารางที่ 4.3 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีน้ำเงิน ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	58
ตารางที่ 4.4 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีผสม ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	60
ตารางที่ 4.5 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของ Gray scale ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	63
ตารางที่ 4.6 ค่า ΔE_{ab}^* ของชุดตัวอย่างสีทดสอบ ในการทำนายค่าสเปกตรัม.....	64
ตารางที่ 4.7 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีแดง ในการทำนายค่าสี RGB.....	66
ตารางที่ 4.8 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีเขียว ในทำนายค่าสี RGB.....	69
ตารางที่ 4.9 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีน้ำเงิน ในทำนายค่าสี RGB.....	71
ตารางที่ 4.10 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของชุดตัวอย่างสีผสม ในการทำนายค่าสี RGB.....	74
ตารางที่ 4.11 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของ Gray scale ในทำนายค่าสี RGB.....	77
ตารางที่ 4.12 ค่า ΔE_{ab}^* ของชุดตัวอย่างสีทดสอบ ในทำนายค่าสี RGB.....	77
ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง.....	79

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการมองเห็นสี.....	4
รูปที่ 2.2 สเปกตรัม.....	5
รูปที่ 2.3 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวเรียบ.....	7
รูปที่ 2.4 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวขรุขระ.....	7
รูปที่ 2.5 การสะท้อนของแสง.....	7
รูปที่ 2.6 การกระเจิงแสง.....	8
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของนัยน์ตา.....	10
รูปที่ 2.8 การผสมสีแบบบวก.....	12
รูปที่ 2.9 การผสมสีแบบลบ.....	13
รูปที่ 2.10 การทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบ Thermal.....	14
รูปที่ 2.11 การทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบ Piezo Electric.....	14
รูปที่ 2.12 การเดินทางของแสงในชั้นหมึกพิมพ์และวัสดุพิมพ์.....	19
รูปที่ 2.13 การเดินทางของแสงจากอากาศไปชั้นหมึกพิมพ์.....	21
รูปที่ 2.14 ผู้สังเกตการณ์ตามมาตรฐานซีไอทีที่มุมการมอง 2° และผู้สังเกตการณ์ตาม มาตรฐานซีไอทีที่มุมการมอง 10°	24
รูปที่ 2.15 ปริภูมิสี $L^*a^*b^*$	27
รูปที่ 3.1 ชุดตัวอย่างสี Training set.....	32
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสีที่พิมพ์ลงบนกระดาษดำ.....	33
รูปที่ 3.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน.....	34
รูปที่ 3.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale	34
รูปที่ 3.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม.....	35
รูปที่ 3.6 การกำหนดสภาวะการพิมพ์.....	36
รูปที่ 3.7 เครื่องมือคาลิเบรทเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	37
รูปที่ 4.1 การสะท้อนแสงของสีแดงที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว.....	44
รูปที่ 4.2 การสะท้อนแสงของสีเขียวที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว.....	45
รูปที่ 4.3 การสะท้อนแสงของสีน้ำเงินที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว.....	46
รูปที่ 4.4 การสะท้อนแสงของกระดาษพิมพ์ในบริเวณสีขาว ($R_{g,w}$) และสีดำของวัสดุพิมพ์ ($R_{g,b}$) บริเวณของแม่สีบนกระดาษขาว(R_w)และบริเวณของแม่สีบนกระดาษดำ(R_b).....	47

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสีแดง..	48
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสีเขียว	49
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสี น้ำเงิน.....	50
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65.....	51
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A.....	52
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11....	52
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65..	54
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A.....	54
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11...	55
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65	56
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A....	57
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11	57
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65..	59
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A.....	59
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11...	60
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scaleภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65.....	61
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scaleภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A.....	62
รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scaleภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11.....	62
รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65.....	65
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A.....	65

สารบัญแผนผัง

	หน้า
แผนผังที่ 3.1 การเตรียมภาพต้นฉบับ.....	32
แผนผังที่ 3.2 การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์.....	35
แผนผังที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บดแสง.....	39
แผนผังที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า K และ S.....	38
แผนผังที่ 3.5 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับ ค่าความเข้มข้นของค่าสี RGB.....	40
แผนผังที่ 3.6 การทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม.....	41
แผนผังที่ 3.7 การทดสอบการทำนายค่าสี RGB.....	43
แผนผังที่ 4.1 ขั้นตอนการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง	79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์ด้วยระบบอิงก์เจ็ตได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ความรวดเร็วในการพิมพ์ สามารถพิมพ์ลงวัสดุได้หลายชนิดทั้งนี้คุณภาพของสิ่งพิมพ์อิงก์เจ็ตยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความละเอียดของสิ่งพิมพ์ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์แต่ละชนิด และชนิดของหมึกพิมพ์ วัสดุรองรับสิ่งพิมพ์ เป็นต้น การพัฒนาคุณภาพของสิ่งพิมพ์อิงก์เจ็ตมีมาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้สิ่งพิมพ์ที่มีความคงทนและความสวยงาม โดยวิธีหนึ่งในการเพิ่มคุณภาพของสิ่งพิมพ์ คือ การเพิ่มจำนวนสีในระบบการพิมพ์จากเดิมที่เป็นระบบการพิมพ์ 4 สี เพิ่มเป็น 6 สี หรือ 8 สี เป็นต้น อย่างไรก็ตามการผลิตสิ่งพิมพ์อิงก์เจ็ตให้มีสีตรงตามต้นฉบับนั้นจำเป็นต้องมีระบบการจัดการสี (color management system) เพื่อให้อุปกรณ์แต่ละชนิดที่มีค่าสีที่ขึ้นอยู่กัอุปกรณ์ (device dependent colours) สามารถสื่อสารข้อมูลสีและแสดงผลออกมาได้ตรงกันโดยใช้ค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ (device independent colours) ซึ่งในปัจจุบันระบบการจัดการสีที่ใช้กันทั่วไปนั้นสามารถควบคุมการผลิตภาพสีและแสดงผลได้เฉพาะสภาวะที่กำหนดเท่านั้น ปัญหานี้เนื่องมาจากค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์และค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์นั้นไม่คำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการรับรู้สีของมนุษย์ที่มีการเปลี่ยนไปตามสภาพแสงต่าง ๆ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าปรากฏการณ์เมแทเมอริซึม (Metamerism) คือปรากฏการณ์การสะท้อนแสงของวัตถุมีสีสองชนิดเข้าสู่ตาแล้วกระตุ้นเซลล์รูปกรวยในจอตา ทำให้เกิดการมองเห็นและรับรู้สีของวัตถุสองชนิดมีสีเหมือนกันภายใต้สภาวะเฉพาะหนึ่ง ๆ โดยเมื่อสภาวะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงก็มีผลทำให้สีของวัตถุสองชนิดแตกต่างกัน แต่ถ้าสามารถผลิตสีของวัตถุให้มีค่าสเปกตรัมเหมือนกัน จะช่วยลดการเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Illuminant Metamerism) ได้

การหาลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ (device characterization) คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์และค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลองลักษณะเฉพาะ (characterization model) ซึ่งก็คือแบบจำลองที่ใช้ในการแปลงค่าสีระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์ไปเป็นค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์สำหรับใช้ในการสื่อสารสีกับอุปกรณ์อื่น และเพื่อควบคุมให้อุปกรณ์ผลิตสีได้ตามต้องการ ดังนั้นแบบจำลองลักษณะเฉพาะจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตภาพสี จึงได้มีงานวิจัยศึกษาการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตจากข้อมูลสเปกตรัม เพื่อให้ภาพที่ผลิตได้มีสีเหมือนกับต้นฉบับภายใต้สภาพ

แสงต่าง ๆ [1-7] โดยพบว่าแบบจำลอง Look-up table มีค่าความถูกต้องในการแปลงค่าสีสำหรับ เครื่องพิมพ์หกสีที่ค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.02 [4] ต่อมา มีการ ประยุกต์ใช้สมการนอยกาบาวที่ปรับเปลี่ยน โดยใช้ยูล-นีลสัน (Yule-Nielson modified spectral Neugebauer equation) ในการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท หกสี [5,6] ซึ่งมีค่าความถูกต้องในการแปลงค่าสี โดยการทดสอบด้วยค่าคลาดเคลื่อนรากกำลัง สองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.063 และค่าความแตกต่างสี ΔE^*_{94} เท่ากับ 1.16 [5] และมีการ พัฒนางานวิจัยต่อมาได้ค่าความถูกต้องในการแปลงค่าสีโดยการทดสอบด้วย ค่าคลาดเคลื่อน รากกำลังสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.028 และค่าความแตกต่างสี ΔE^*_{94} เท่ากับ 2.3 [6] และ แบบจำลองที่ใช้สมการคูเบลคา-มังก์ (Kubelka-Munk equation) ทดสอบกับเครื่องพิมพ์หกสีค่า ความแตกต่างสี ΔE^*_{94} เท่ากับ 0.22 [7]

งานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทบนพื้นฐานของสมการ คูเบลคา-มังก์เพื่อการผลิตภาพผ่านการพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมเนื่องจากเป็นค่าที่ไม่ ขึ้นกับแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB ที่กำหนดเพื่อสั่งพิมพ์ และ ค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ด้วยสมการคูเบลคา-มังก์ เนื่องจากเป็นสมการที่มีหลักการมาจาก สมบัติเชิงแสงของหมึกพิมพ์และวัสดุรองรับการพิมพ์ จึงได้แบบจำลองลักษณะเฉพาะ (characterization model) ที่ใช้ในการแปลงค่าสีเพื่อการผลิตภาพให้มีสีตรงตามต้นฉบับภายใต้ สภาวะแสงต่าง ๆ และจากการใช้ค่าสี RGB ที่ใช้สั่งพิมพ์แทนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ เข้มข้นของหมึกพิมพ์กับค่าสเปกตรัมนั้น ทำให้วิธีการหาลักษณะเฉพาะที่เสนอในงานวิจัยนี้ สามารถใช้ได้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่มีจำนวนสีของหมึกพิมพ์ต่าง ๆ ได้ โดยไม่ต้องคำนึงถึง จำนวนสีของหมึกพิมพ์ในระบบ เพราะเป็นการใช้ข้อมูลสีของภาพดิจิทัลโดยตรงโดยการตรวจสอบ ประสิทธิภาพของแบบจำลองลักษณะเฉพาะดำเนินการโดยใช้ชุดตัวอย่างสีทดสอบ (test set) มา ผ่านการทำนายค่าสเปกตรัม และทำนายค่าสี RGB ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณพิจารณาจากค่า ความแตกต่างสีระหว่างค่าสีของชุดตัวอย่างทดสอบสีกับค่าสีของชุดตัวอย่างสีทำนายได้ และค่า รากที่สองกำลังเฉลี่ยของความแตกต่างของการสะท้อนแสง โดยผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะเป็น ประโยชน์ในการแปลงค่าข้อมูลสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทในการสื่อสารข้อมูลสีกับอุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อช่วยให้การผลิตภาพสีด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทมีสีตรงตามต้นฉบับ ภายใต้สภาวะแสงต่าง ๆ ได้ ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีจากข้อมูลสเปกตรัม
2. เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะที่สร้างบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันท์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันท์ เพื่อให้ได้แบบจำลองลักษณะเฉพาะที่ใช้ในการแปลงค่าสีเพื่อการผลิตภาพให้มีสีตรงตามต้นฉบับภายใต้สภาพแสงต่าง ๆ โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. การเตรียมภาพต้นฉบับดำเนินการโดยการกำหนดค่าสี RGB ในระบบสี 8 บิต ดังนั้นในแต่ละระดับสีจะมีค่าข้อมูลอยู่ในช่วง 0 - 255 สร้างชุดตัวอย่างสีของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่มีระดับความเข้มชั้นต่างกัน 9 ระดับ แล้วบันทึกไฟล์ภาพแบบ TIFF ซึ่งจะไม่มีการบีบอัดข้อมูล
2. การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสี RGB ของภาพต้นฉบับกับค่าสเปกตรัมของตัวอย่างสีที่พิมพ์บนกระดาษพิมพ์อิงค์เจ็ทเคลือบผิวด้าน โดยค่าสเปกตรัมที่ใช้ในความสัมพันธ์มีค่าอยู่ในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร
3. การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ โดยใช้ตัวอย่างสีทดสอบที่เป็นตัวอย่างสีจำนวนทั้งหมด 50 ตัวอย่างสี ซึ่งจะครอบคลุมระดับสีเทา สีผสม และสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน แล้วทำการทดสอบความถูกต้องทั้งในการทำนายค่าสเปกตรัม และการทำนายค่าสี RGB ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ D65, A และ F11

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วิธีการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากข้อมูลสเปกตรัม โดยให้ภาพที่ผลิตได้ใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุด

บทที่ 2

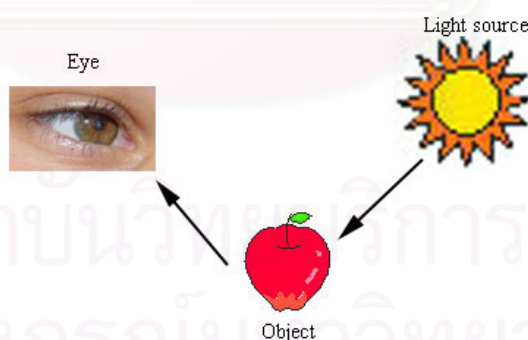
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

งานวิจัยนี้เป็นการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันก์ เพื่อให้สามารถทำนายการผลิตสีหรือกำหนดค่าสีของเครื่องพิมพ์ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยการมองเห็นสีของมนุษย์ที่มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุ และตา โดยทั้งสามองค์ประกอบนี้มีอิทธิพลต่อการเกิดเมแทเมอริซึม หลักการการผสมสีที่เป็นรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแม่สี และการผสมกันของแม่สี เทคโนโลยีของการพิมพ์อิงค์เจ็ท วิธีการหาลักษณะเฉพาะเพื่อให้ได้แบบจำลองลักษณะเฉพาะที่ใช้ในการแปลงค่าสีเพื่อการผลิตภาพให้มีสีตรงตามต้นฉบับภายใต้สภาพแสงต่าง ๆ การคำนวณค่าความแตกต่างสีและวิธีการทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ

2.1.1 การมองเห็นสี

ในกระบวนการมองเห็นสีต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุ และตา โดยมีระบบประสาทและสมองเป็นส่วนแปลความหมาย ดังรูปที่ 2.1

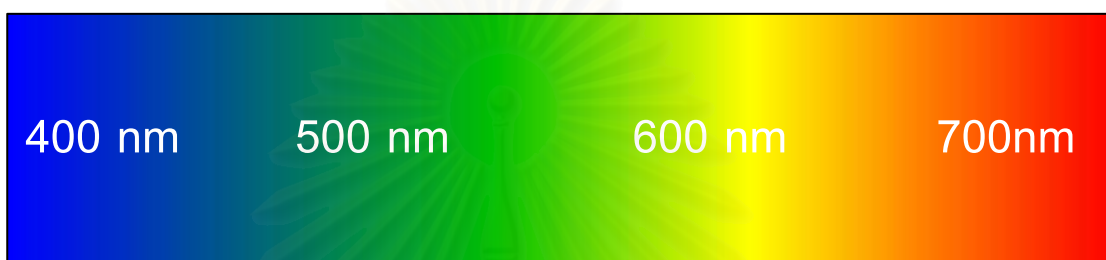


รูปที่ 2.1 กระบวนการมองเห็นสี

2.1.1.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ คือ ดวงอาทิตย์ และยังมีแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น หลอดไฟ ตะเกียง เทียนไข เป็นต้น ดวงอาทิตย์ให้พลังงานออกมาที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ตั้งแต่รังสีคอสมิกจนถึงคลื่นวิทยุ ดังรูปที่ 2.2 แต่แถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อ

ตาคนเราและทำให้เกิดการมองเห็นเป็นเพียงช่วงแคบๆ ระหว่าง 400 - 700 นาโนเมตร เรียกช่วงของการกระจายนี้ว่า Visible spectrum ช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้สามารถแยกให้เห็นแถบของการกระจายพลังงานอย่างกว้างๆ ได้ 7 แถบ แต่ละแถบของการกระจายพลังงาน เรียกว่า Spectrum ช่วงการกระจายที่ต่างกันทำให้มองเห็นสีต่างกันตามลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปมาก คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง [8]



รูปที่ 2.2 สเปกตรัม

แหล่งกำเนิดแสงแต่ละประเภทมีสมบัติทางแสงแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการมองเห็นสีของวัตถุที่แสงตกกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแหล่งกำเนิดแสง สมบัติของแสงที่มีผลต่อการมองเห็นสีและเปลี่ยนแปลงมีดังนี้

1 อุณหภูมิสีของแสง (Color Temperature)

อุณหภูมิสีของแสง มีหน่วยวัดเป็น เคลวิน โดยการเทียบกับวัตถุดำ (black body) เมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดำมากขึ้น วัตถุดำจะเกิดแสงสว่างขึ้น สีของแสงจากวัตถุดำเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของวัตถุดำที่สูงขึ้น จากแสงสีแดงเป็นสีส้ม เหลือง ขาว น้ำเงิน ตามลำดับ [9]

2 การกระจายพลังงานในสเปกตรัม (Spectral Energy Distribution)

การกำหนดคุณสมบัติของแสง โดยพิจารณาจากปริมาณแสงในแต่ละความยาวคลื่น คือ การวัดปริมาณแสงของแต่ละความยาวคลื่นแล้วแสดงผ่านกราฟ เรียกว่า Spectral Power Distribution Curve หรือ Spectral Energy Distribution ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณต่าง ๆ และการใช้สร้างอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ เช่น เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงและของวัตถุต่าง ๆ เป็นต้น [9]

3 การปรากฏสี (Color Rendering)

เมื่อมองเห็นสีสิ่งหนึ่งภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่ง แต่เมื่อแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยนไปเราจะมองเห็นสีเดียวกันนี้มีสีต่างกัน ดังนั้นเมื่อมีการเทียบสีให้ถูกต้อง จำเป็นต้องมีการกำหนดสมบัติแสง โดยที่คณะกรรมการซีไออี (The Commission International de l' Eclairage) ได้กำหนดแสงมาตรฐานเพื่อใช้ในการระบุคุณสมบัติในการปรากฏสีของแสง เรียกว่า ดัชนีการปรากฏสี (Color Rendering Index, RI) ถ้าดัชนีนี้มีค่าสูงแสดงถึงสมบัติในการ ปรากฏสีมีความถูกต้องมากขึ้น [9]

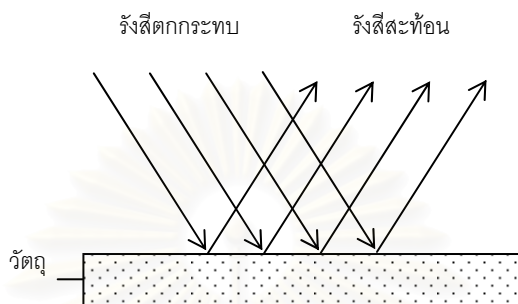
2.1.1.2 วัตถุ

วัตถุแต่ละชนิดมีการตอบสนองต่อแสงต่างกัน ทำให้วัตถุมีสมบัติเชิงแสงต่างกัน ด้วย ฉะนั้นในการมองเห็นวัตถุใด ๆ จำเป็นต้องมีแสงจากวัตถุมาเข้าตา เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีแรก การมองเห็นวัตถุที่มีแสงสว่างในตัวเองจะมีแสงสว่างจากวัตถุเข้าตาโดยตรง ส่วนกรณีที่สอง ถ้าวัตถุนั้นไม่มีแสงสว่างในตัวเอง แสดงว่าต้องมีแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบวัตถุนั้นแล้วสะท้อนเข้าตา โดยสามารถแบ่งสมบัติเชิงแสงของวัตถุที่มีผลต่อการมองเห็นสีได้ดังนี้

1 การสะท้อนแสง (Reflection)

การสะท้อนแสง (Reflection) เป็นคุณสมบัติของแสงอย่างหนึ่งเมื่อแสงเดินทางไปในวัตถุที่มีเนื้อเดียว แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง และเมื่อแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปสู่อีกวัตถุหนึ่ง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวรอยต่อระหว่างวัตถุทั้งสอง ในขณะที่แสงบางส่วนจะหักเห (Refraction) เข้าไปในวัตถุ แต่ถ้าเป็นวัตถุที่บดแสงผิวเรียบจะทำให้แสงเกือบทั้งหมดสะท้อนกลับอย่างมีระเบียบ ดังรูปที่ 2.3 แต่ถ้าวัตถุที่มีผิวขรุขระไม่เรียบจะเกิดการสะท้อนไม่มีระเบียบแสงสะท้อนไปในหลายทิศทาง ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง (The Laws of Reflection) มีอยู่ 2 ประการ คือ ประการแรก รังสีตกกระทบ (incident ray) รังสีสะท้อน (reflected ray) และเส้นปกติ (normal) จะตกอยู่ในระนาบเดียวกัน ประการที่สอง มุมตกกระทบ (angle of incidence) เท่ากับมุมสะท้อน (angle of reflection) ดังรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อรังสีของแสงตกกระทบผิววัตถุที่จุดใดก็ตาม ถ้าเราลากเส้นตั้งฉากกับผิววัตถุนั้น เส้นตั้งฉากที่ลากนี้ เรียกว่า

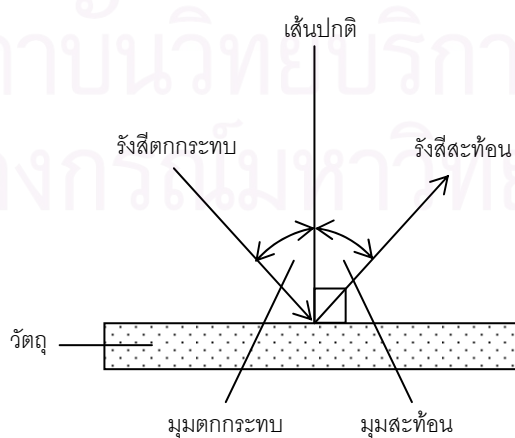
เส้นปกติ และเรียกมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นปกติ เรียกว่า มุมตกกระทบ ส่วนมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวฉาก เรียกว่า มุมสะท้อน [8]



รูปที่ 2.3 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวเรียบ



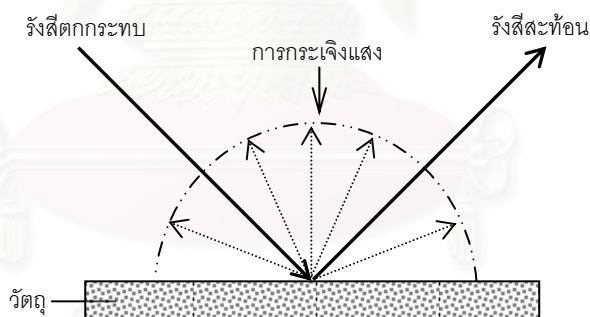
รูปที่ 2.4 การสะท้อนของแสงที่วัตถุผิวขรุขระ



รูปที่ 2.5 การสะท้อนของแสง

2 การกระเจิงแสง (Scattering)

การกระเจิงแสง (Scattering) เป็นคุณสมบัติของวัตถุหรืออนุภาค และเป็นส่วนหนึ่งของการสะท้อนแสงที่ไม่เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.6 ในชีวิตประจำวันที่เราสามารถพบการกระเจิงแสง ในปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ เช่น สีของท้องฟ้าที่เปลี่ยนไปตามเวลาจากช่วงตอนเช้า ท้องฟ้าจะเปลี่ยนสีจากสีส้ม เหลือง ขาว ฟ้าอ่อน ฟ้าเข้ม ตามลำดับ เนื่องจากในบรรยากาศมีละอองน้ำขนาดอนุภาคเล็ก ๆ แสงจากดวงอาทิตย์มาตกกระทบกับละอองน้ำทำให้เกิดการกระเจิงแสงอนุภาคของหยดน้ำจะมีการกระเจิงแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในมุมที่ไม่เท่ากัน เราจึงมองเห็นท้องฟ้าเปลี่ยนสีไปตามแสงที่สะท้อนมาเข้าตาของเรา เมื่อมุมที่แสงจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนไป การประยุกต์ความรู้เกี่ยวกับการกระเจิงแสงเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมการพิมพ์นั้นพบได้ในการผลิตหมึกพิมพ์และการเคลือบผิว โดยการควบคุมขนาดอนุภาคของผงสีให้เกิดการกระเจิงแสงตามที่ต้องการ ขนาดอนุภาคใหญ่การกระเจิงแสงมีมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก รวมถึงการเลือกใช้กระดาษ กระดาษเคลือบผิวด้านมีสมบัติในการกระเจิงแสงมากกว่ากระดาษเคลือบผิวมัน [9]



รูปที่ 2.6 การกระเจิงแสง

3 การส่องผ่าน (Transmission)

การส่องผ่าน (Transmission) เป็นคุณสมบัติของแสง เมื่อแสงตกกระทบที่วัตถุบางชนิดแล้วแสงผ่านไปได้ แต่วัตถุบางชนิดแสงผ่านไม่ได้ เราสามารถแบ่งวัตถุตามปริมาณแสงและลักษณะการส่องผ่านวัตถุได้ 3 ประเภท ดังนี้ [8]

1) วัตถุโปร่งใส (transparent) เป็นวัตถุที่แสงเกือบทั้งหมดสามารถเดินทางผ่านไปได้ เช่น อากาศ กระดาษใส เป็นต้น

2) วัตถุโปร่งแสง (Translucent) เป็นวัตถุที่แสงเพียงบางส่วนสามารถเดินทางผ่านไปได้ เช่น น้ำขุ่น กระจกฝ้า พลาสติก เป็นต้น

3) วัตถุทึบแสง (Opaque) เป็นวัตถุที่แสงเกือบทั้งหมดไม่สามารถเดินทางผ่านไปได้ เช่น ไม้ โลหะ กระจกใส สมุด หนังสือ กระดาษหนา เป็นต้น

4 การดูดกลืนแสง (Absorption)

การที่เรามองเห็นสีของวัตถุ เพราะว่าวัตถุมีการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ต่างกัน เช่น เรามองเห็นวัตถุมีสีแดง เพราะว่าวัตถุมีการสะท้อนแสงสีแดง และดูดกลืนแสงสีเขียวและสีน้ำเงินไว้ ถ้าเรามองเห็นวัตถุมีสีขาวแสดงว่าวัตถุนั้นมีการสะท้อนแสงสีทุกความยาวคลื่น [9]

5 สเปกตรัมของวัตถุ

วัตถุมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น และมีการสะท้อนแสงที่เหลือออกมาไม่เท่ากับแสงที่ตกกระทบ เรียกว่า ค่าการสะท้อนแสงของวัตถุหรือสเปกตรัมของวัตถุ โดยเมื่อแหล่งกำเนิดแสงเปลี่ยน ค่าสเปกตรัมของวัตถุจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การมองเห็นสีของวัตถุที่มีค่าสเปกตรัมของวัตถุเท่ากันเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงมีผลต่อค่าสเปกตรัมของวัตถุ [9]

2.1.1.3 ตา

ตาเป็นอวัยวะที่ช่วยให้เราสามารถรับรู้สิ่งต่าง ๆ จากสภาวะแวดล้อมตลอดจนรับรู้ข้อมูลข่าวสารจากการอ่านและรับรู้สี ส่วนประกอบที่สำคัญของนัยน์ตาสามารถอธิบายได้ดังนี้ [10] แสดงดังรูปที่ 2.7

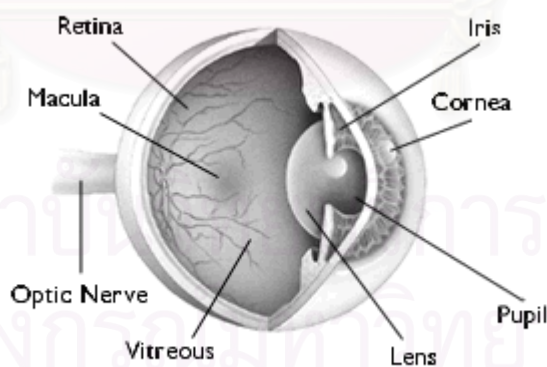
- 1 กระจกตาหรือคอร์เนีย (Cornea) อยู่ที่ผิวหน้าและหุ้มลูกนัยน์ตาไว้
- 2 เลนส์แก้วตา (Lens) เป็นเลนส์นูน มีความยืดหยุ่น เพื่อให้สามารถมองเห็นวัตถุที่ระยะต่าง ๆ กันได้ชัดเจนตลอด
- 3 กล้ามเนื้อยึดเลนส์แก้วตา (Ciliary muscle) สามารถหดตัวหรือคลายตัวได้ เพื่อบีบให้เลนส์นูนมากหรือนูนน้อย (ความยาวโฟกัสน้อยหรือมาก) เมื่อมองวัตถุที่อยู่ระยะทาง

ต่าง ๆ กัน ถ้าวัตถุอยู่ใกล้เลนส์จะหนูนมาก ถ้าวัตถุอยู่ไกลเลนส์จะหนูน้อย นอกจากนี้แล้วยังช่วยทำให้นัยน์ตาสามารถถลอกไปมาได้

4 ม่านตา (Iris) เป็นเนื้อเยื่อส่วนที่มีสีของนัยน์ตา (แล้วแต่เชื้อชาติ) ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแสงที่จะผ่านเข้าสู่เลนส์แก้วตา

5 ปิวปิล (Pupil) ช่องกลมเล็ก ๆ กลางม่านตา เป็นส่วนที่มีสีเข้มกลางนัยน์ตา สำหรับแสงผ่านเข้าสู่เลนส์แก้วตา ขนาดของปิวปิลเปลี่ยนแปลงไปตามการเปิดปิดของม่านตาในที่สว่างมาก ม่านตายอมให้แสงเข้าได้น้อย ปิวปิลจะมีขนาดเล็ก มิฉะนั้นแล้วจะเป็นอันตรายต่อเรตินาได้

6 เรตินา (Retina) เป็นบริเวณเนื้อเยื่อสีดำชั้นในสุดประกอบด้วยใยประสาทที่ไวต่อแสงเป็นจำนวนมาก และที่ผิวหน้าเติมไปด้วยเซลล์ประสาท 2 ชนิด คือ เซลล์ประสาทรูปแท่ง (rod cells) ทำให้เกิดความรู้สึกเกี่ยวกับความมืดและความสว่าง ขาวหรือดำ ส่วนเซลล์ประสาทรูปกรวย (cone cells) ทำให้เกิดความรู้สึกเกี่ยวกับสี เซลล์ประสาทเหล่านี้จะรวมกันเป็นเส้นประสาทรับภาพหรือประสาทตา (optic nerve) ประสาทตาทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่สมอง แล้วสมองแปลความหมายเป็นภาพที่มองเห็น



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆ ของนัยน์ตา [11]

2.1.2 เมแทเมอริซึม (Metamerism)

เมแทเมอริซึมเป็นปรากฏการณ์การสะท้อนแสงของวัตถุที่มีสีสองชนิดเข้าสู่ตาแล้วกระตุ้นเซลล์รูปกรวยในจอตา ทำให้เกิดการมองเห็นและรับรู้สีของวัตถุสองชนิดที่มีสีเหมือนกันภายใต้

สภาวะเฉพาะหนึ่ง ๆ โดยเมื่อสภาวะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงก็มีผลทำให้สีของวัตถุสองชนิดแตกต่างกัน สภาวะที่มีผลต่อปรากฏการณ์เมแทเมอริซึม สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะต่าง ๆ ได้ 4 ประเภท คือ [12]

2.1.2.1 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

การมองเห็นสีของวัตถุสองชนิดเหมือนกัน เมื่อมองภายใต้แหล่งกำเนิดแสงหนึ่ง แต่เมื่อเปลี่ยนชนิดของแหล่งกำเนิดแสงก็พบว่าสีของวัตถุสองชนิดแตกต่างกัน แสดงว่าค่าการสะท้อนแสงของวัตถุสองชนิดแตกต่างกัน แต่มีสีเหมือนกันเมื่อมองภายใต้สภาวะแสงที่มีค่าการกระจายพลังงานแสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม

2.1.2.2 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยผู้สังเกตการณ์

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชนิดเหมือนกัน แต่ผู้สังเกตการณ์อีกคนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุ 2 ชนิดนั้นแตกต่างกันภายใต้แหล่งกำเนิดแสง ระยะเวลาและมุมมองเดียวกัน เพราะตาของผู้สังเกตการณ์แต่ละคนมีความไวแสงในสเปกตรัมต่อการมองเห็นสีแตกต่างกัน และถ้าผู้สังเกตการณ์ทั้งสองมีอายุที่แตกต่างกันมาก การมองเห็นความแตกต่างของสีได้ชัดเจนเนื่องจากปริมาณของ macular pigment ในบริเวณโพเวียของผู้สังเกตการณ์มีปริมาณไม่เท่ากัน และผู้สังเกตการณ์แต่ละคนมีขอบเขตการยอมรับไม่เหมือนกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้สังเกตการณ์แต่ละคน

2.1.2.3 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยระยะเวลา

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุสองชนิดเหมือนกันเมื่อมองดูที่ระยะไกล ซึ่งทำให้มองเห็นวัตถุนั้นมีขนาดเล็กกลง แต่เมื่อมองที่ระยะใกล้ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงและมุมมองเดียวกันกลับมองเห็นสีของวัตถุสองชนิดนั้นแตกต่างกัน

2.1.2.4 เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยการมูมมอง

การที่ผู้สังเกตการณ์คนหนึ่งมองเห็นสีของวัตถุสองชนิดเหมือนกันภายใต้แหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน และมุมที่แสงตกกระทบแต่มุมสังเกตการณ์ที่ต่างกัน จะพบว่ามุมสังเกตการณ์บางมุมมองเห็นสีของวัตถุสองชนิดนั้นแตกต่างกัน

2.1.3 การผสมสี (Color Mixing)

ระบบการผสมสีแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้ [13]

2.1.3.1 การผสมสีแบบบวก (Additive Color Mixing)

การผสมสีแบบบวกเกิดจากแม่สีหลักของแสงสี 3 สี คือ แสงสีแดง (Red) แสงสีเขียว (Green) และแสงสีน้ำเงิน (Blue) ซึ่งเป็นสีปฐมภูมิไปรวมกันบนฉากขาว ดังรูปที่ 2.8 ทำให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ ดังนี้

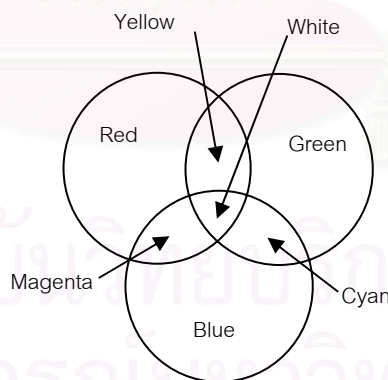
แสงสีแดง รวมกับ แสงสีน้ำเงิน ได้ แสงสีม่วงแดง (Magenta)

แสงสีแดง รวมกับ แสงสีเขียว ได้ แสงสีเหลือง (Yellow)

แสงสีน้ำเงิน รวมกับ แสงสีเขียว ได้ แสงสีน้ำเงินเขียว (Cyan)

แสงสีแดง รวมกับ แสงสีน้ำเงิน รวมกับ แสงสีเขียว ได้ แสงสีขาว (White)

ส่วนแสงสีสองสีที่รวมกันแล้วได้สีขาว สีทั้งสองเป็นสีเติมเต็ม (complementary colors) ของกันและกัน เช่น สีเหลืองเป็นสีเติมเต็มของสีน้ำเงิน ในขณะที่สีน้ำเงินก็เป็นสีเติมเต็มของสีเหลืองด้วย



รูปที่ 2.8 การผสมสีแบบบวก

2.1.3.2 การผสมสีแบบลบ (Subtractive Color Mixing)

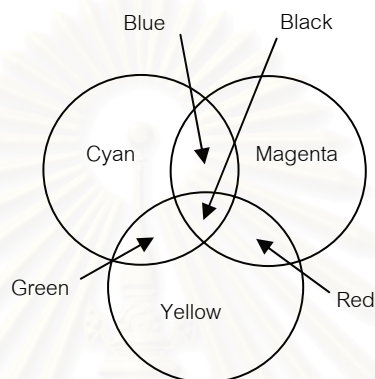
การผสมสีแบบลบเกิดจากแม่สี 3 สี คือ สีน้ำเงินเขียว (Cyan) สีม่วงแดง (Magenta) และสีเหลือง (Yellow) ซึ่งเป็นแม่สีทุติยภูมิ ดังรูปที่ 2.9 การผสมสีแบบนี้ใช้หลักการกันหรือดูดกลืนบางสี ยอมให้แสงสีบางสีส่องผ่าน ทำให้เกิดสีต่าง ๆ ดังนี้

สีน้ำเงินเขียว ซ้อนทับ สีม่วงแดง ได้ สีน้ำเงิน (Blue)

สีน้ำเงินเขียว ซ้อนทับ สีเหลือง ได้ สีเขียว (Green)

สีม่วงแดง ซ้อนทับ สีเหลือง ได้ สีแดง (Red)

สีน้ำเงินเขียว ซ้อนทับ สีม่วงแดง ซ้อนทับ สีเหลือง ได้ สีดำ (Black)



รูปที่ 2.9 การผสมสีแบบลบ

2.1.4 เทคโนโลยีของระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ต

เครื่องพิมพ์แบบอิงก์เจ็ต เป็นเครื่องพิมพ์ชนิด non-impact มีระบบทำงานโดยการพ่นน้ำหมึกเป็นละอองขนาดเล็กลงบนกระดาษโดยตรง ในปัจจุบันเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากเครื่องพิมพ์มีราคาประหยัด พิมพ์สีได้ดีและพิมพ์งานขาวดำได้รวดเร็วและสวยงาม ให้ความละเอียดที่ดี เหมาะกับการพิมพ์รูปภาพสีสี่ พิมพ์บนวัสดุได้หลายแบบ เช่น กระดาษธรรมดา กระดาษอามันแบบภาพถ่าย หรือบนแผ่นพลาสติก นอกจากนี้เครื่องพิมพ์บางรุ่นยังมีความสามารถในการสกรีนภาพหรือข้อความลงบนแผ่นซีดีหรือดีวีดีได้ โดยแผ่นซีดีหรือดีวีดีนั้นต้องถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ ซึ่งจะมีข้อความระบุบนกล่องซีดีหรือดีวีดีว่า Printable Disc หรือ Writable Disc เท่านั้น นับได้ว่าเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตเป็นเครื่องพิมพ์ที่ใช้งานได้แบบเอนกประสงค์ และมีหลายรุ่นหลายระดับให้เลือกตามความต้องการของผู้ใช้ จึงเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีผู้ใช้งานมากที่สุด

2.1.4.1 ประเภทของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต

เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ใช้เทคโนโลยี Drop-On-Demand แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1 Thermal

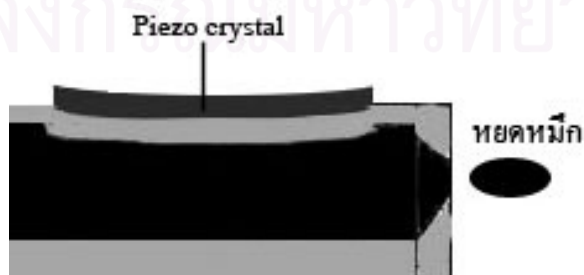
หลักการทำงานแบบ Thermal ทำงานด้วยวิธีสร้างความร้อนที่สูงกว่าจุดเดือดของน้ำหมึกให้แก่น้ำหมึก ในหัวพ่นแต่ละหัวจะมีขดลวดสร้างความร้อนจากกระแสไฟฟ้าหรือฮีทเตอร์ (heater) ความร้อนส่งผลให้ภายในช่องหัวพ่นที่มีน้ำหมึกบรรจุอยู่เกิดฟองอากาศ และฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งดันน้ำหมึกออกไปจากหัวพ่น จากขั้นตอนที่ผ่านมา เครื่องพิมพ์จะหยุดจ่ายไฟให้กับฮีทเตอร์ส่งผลให้ฟองอากาศหายไป และหยดหมึกก็จะหลุดออกไปจากหัวพ่นแล้วไปยังกระดาษ ในระหว่างนี้อุณหภูมิในช่องหัวพ่นจะลดลง ทำให้ความดันอากาศภายในลดต่ำกว่าความดันในห้องหมึก น้ำหมึกจึงไหลเข้าแทนที่ที่ช่องว่างในช่องหัวพ่น แล้วพร้อมที่จะถูกพ่นหมึกอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบ Thermal

2 Piezo Electric

หลักการทำงานแบบ Piezo Electric หัวพ่นทำงานด้วยการสั่นสะเทือนของผลึก Piezo Electric Crystals ซึ่งเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะสั่นสะเทือน และพ่นน้ำหมึกออกมาเป็นหยดหมึกกลมขนาดเล็ก (droplets) และเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าอีกครั้งจะพ่นหมึก ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบ Piezo Electric

2.1.4.2 ประเภทของสารให้สีที่ใช้ในหมึกพิมพ์

หมึกพิมพ์อิงก์เจ็ตที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปเป็นหมึกพิมพ์ฐานน้ำ (Water-based) มีส่วนผสมหลัก คือ น้ำ มีหน้าที่เป็นตัวทำละลาย สารให้สีที่ใช้ในหมึกพิมพ์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ [17,19]

1 สารสี (Pigment)

สารสีมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย ที่ประกอบด้วยผงสีขนาดเล็กที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย แต่จะเกิดการกระจายตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ อยู่ในตัวทำละลาย ข้อดี คือ ทนน้ำ ทนแดดได้ดี ข้อเสีย คือ ทึบแสง แห้งช้า จึงนำมาใช้เป็นหมึกสีดำที่นิยมใช้กับงานพิมพ์เอกสารที่ต้องการความคงทน ถ้านำมาใช้ในงานพิมพ์สีจะให้สีสันทึบไม่ค่อยสดใส เนื่องจากทึบแสงและสร้างเฉดสีได้น้อย

2 สีย้อม (Dye)

สีย้อมมีลักษณะเป็นสารละลาย มีขนาดอนุภาคเม็ดสีเล็กกว่าแบบสารสี ทำให้สร้างหยดหมึกได้ขนาดเล็ก ข้อดี คือ ให้สีสันทึบสดใส และยังสร้างเฉดสีได้มากจึงเหมาะกับงานพิมพ์สี เช่น ภาพถ่าย เป็นต้น ข้อเสีย คือ ทนน้ำทนแดดไม่ได้เท่าสารสี

2.1.4.3 การแห้งตัวของหมึกพิมพ์

การแห้งตัวของหมึกพิมพ์ชนิดสีย้อม เมื่อพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์จะมีการแพร่กระจายลงในผิวหน้าของวัสดุพิมพ์พร้อมกับสารละลาย ในขณะที่การแห้งตัวของหมึกพิมพ์ชนิดสารสีมีโมเลกุลของสารสียังอยู่บริเวณผิวหน้าของวัสดุพิมพ์ แต่สารละลายจะแพร่กระจายลงในวัสดุพิมพ์ [17,19]

2.1.4.4 ความละเอียดในการพิมพ์ (Resolution)

ความละเอียดในการพิมพ์วัดในหน่วย dpi (dot per inch) หรือเป็นจำนวนจุดต่อตารางนิ้ว ในการคำนวณตำแหน่งของจุดพิมพ์ทั้งหน้ากระดาษ เรียกว่า แรสเตอร์ (Raster) โดยจะคำนวณผ่านไครเวอร์ของเครื่องพิมพ์ และความละเอียดของแรสเตอร์นี้จะเป็นตัวกำหนดการใช้สีของงานพิมพ์ และขนาดของแรสเตอร์ที่ละเอียดมากจะทำให้ภาพที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น

ฉะนั้นขนาดของหยดหมึกแต่ละหยดจะเล็กมาก ทำให้น้ำหมึกต่อหนึ่งหยดจะลดลง ดังนั้นเครื่องพิมพ์ที่มีความละเอียดในการพิมพ์สูงก็จะสามารถพิมพ์จุดสีในจุดหนึ่งจุดได้หลายสี ทำให้ได้คุณภาพในการพิมพ์สูง โดยทั่วไปเครื่องพิมพ์จะปิดระบบการพิมพ์ความละเอียดสูงไว้ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท และยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ [14-19]

2.1.4.5 กระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ต

กระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ตเป็นกระดาษเคลือบผิวที่มีหลายชนิด เช่น เคลือบผิวหน้าเดียว เคลือบผิวสองหน้า เคลือบผิวมัน เคลือบผิวด้าน เป็นต้น กระดาษเคลือบผิวทำมาจากการนำกระดาษธรรมดาไปเคลือบผิวด้วยสารที่ทำให้ผิวมีความเรียบและมันมากขึ้น เช่น เคลือบด้วยสารพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ไททาเนียมไดออกไซด์ หรือสารประเภทดินขาว และสารสังเคราะห์อื่น ๆ สารที่เคลือบผิวนี้จะทำให้กระดาษมีผิวที่เรียบและมัน ทำให้มีคุณสมบัติในการรองรับหยดหมึกที่มีการดูดซึมน้อยกว่ากระดาษไม่เคลือบผิว ทำให้เกิดเม็ดสกรีนบวมน้อยลง ความขาวที่เกิดจากสารเคลือบผิวช่วยทำให้การพิมพ์ภาพสี เมื่อมองด้วยตาแล้วมีสีใกล้เคียงกับต้นฉบับ [17,19]

2.1.5 การหาลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์

การหาลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ (device characterization) คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์ (device-dependent colour) กับค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ (device-independent colour) โดยสามารถแปลงค่ากลับไปมาได้ เพื่อใช้สำหรับใช้ในการสื่อสารสีกับอุปกรณ์อื่นและเพื่อควบคุมให้อุปกรณ์ผลิตสีได้ตามต้องการ ในการหาลักษณะเฉพาะสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ดังนี้ [20-21]

2.1.5.1 Colour-mixing models หรือ Physical models

การหาลักษณะเฉพาะที่ใช้พื้นฐานของทฤษฎีการผสมสี (colour-mixing theory) และสมบัติของแสงที่มีผลต่อสีสิ่งพิมพ์ เช่น การสะท้อนแสง การกระเจิงแสง และการดูดกลืนแสง ตัวอย่างเช่น สมการ Neugebauer ได้นำทฤษฎีการผสมสีแบบลบมากำหนดค่าสีของเม็ดสกรีนจากค่าการสะท้อนแสง, สมการ Murray-Davies จะพิจารณาค่าการสะท้อนแสง และค่าการดูดกลืนแสงของเม็ดสกรีน, แบบจำลอง Yule-Nielsen พิจารณาค่าการส่องผ่านทำให้ทราบถึงพื้นที่ของเม็ดสกรีน การดูดกลืนแสงของหมึกพิมพ์กับการกระเจิงแสงและสะท้อนแสงของวัสดุพิมพ์, แบบจำลอง Clapper-Yule พิจารณาจากปริมาณการกระเจิงแสง การสะท้อนแสง และการส่องผ่านภายในชั้น

หมึกพิมพ์, กฎ Beer-Bouguer พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และทฤษฎี Kubelka-Munk พิจารณาจากค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของชั้นหมึกพิมพ์

2.1.5.2 Regression

การหาลักษณะเฉพาะแบบ Regression นี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการโพลิโนเมียล (Polynomial equation) ลักษณะของสมการที่หาได้นี้ต้องสอดคล้องกับการกระจายของข้อมูล โดยใช้วิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least square regression) เพื่อหาฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลที่กำหนด และถ้าสมการโพลิโนเมียลกำลังเท่ากับหนึ่งที่ทำค่าได้เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มข้อมูลเรียกฟังก์ชันเส้นตรงนี้ว่าวิธีการถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression)

2.1.5.3 Look-up table with interpolation

การหาลักษณะเฉพาะแบบนี้เป็นการสร้างตารางชุดข้อมูลเพื่อการแปลงค่าเนื่องจากข้อมูลที่ได้มามีจำนวนมาก ทำให้ต้องเลือกข้อมูลมาจำนวนหนึ่งแล้วมาทำการประมาณค่า สำหรับการประมาณค่าที่ได้จากการเชื่อมต่อกับค่าข้อมูลสองข้อมูลโดยใช้หลักการของสมการเส้นตรงใช้การประมาณค่าที่ตำแหน่งใด ๆ ซึ่งอยู่ระหว่างค่าทั้งสองนั้น โดยการแบ่งค่าเท่า ๆ กันตลอดช่วงข้อมูล เรียกวิธีการนี้ว่าการประมาณค่าระหว่างเชิงเส้น (linear interpolation) และถ้าข้อมูลในแบบ 2 มิติ เรียกว่า bilinear interpolation และ 3 มิติ เรียกว่า trilinear interpolation สำหรับการประมาณค่าตามรูปทรงเรขาคณิตแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ trilinear, prism, pyramid และ tetrahedral

2.1.5.4 Cognitive methods

การหาลักษณะเฉพาะแบบนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ของการเลียนแบบขั้นตอนในการประเมินเหตุการณ์ในการแก้ไขปัญหาบนพื้นฐานความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์แบ่งเป็น 2 แบบ คือ Neural network และ Fuzzy logic สามารถอธิบายได้ดังนี้ แบบ Neural network เป็นแบบจำลองระบบการประมวลผลที่เหมือนเครือข่ายเส้นใยประสาทของสมองมนุษย์ที่เชื่อมโยงกันที่มีกระบวนการเชื่อมต่อในลักษณะคู่ขนาน และการเคลื่อนที่สื่อสารระหว่างกัน ทำให้เกิดเครือข่ายการรับรู้รูปแบบและความสัมพันธ์ในข้อมูลที่มีการประมวลผล ดังนั้นเครือข่ายจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยตรงในการเชื่อมต่อภายในระหว่างปัจจัยการประมวลผลในการตอบสนองเพื่อ

เปลี่ยนแปลงรูปแบบในข้อมูลที่ได้รับและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ส่วนแบบ Fuzzy Logic เป็นวิธีการของการทำให้เหตุผลที่คล้าย ๆ กับมนุษย์โดยแทนในเชิงคณิตศาสตร์การบอกค่าของเหตุการณ์ต่าง ๆ จะถูกสร้างเป็นฟังก์ชัน สำหรับอธิบายความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ว่ามีค่าเท่าใดในช่วงที่กำหนดขึ้น เรียกว่า Fuzzy Set

2.1.6 ทฤษฎีคูเบลคา-มังก์

ทฤษฎีคูเบลคา-มังก์ใช้ในการทำนายสีในชั้นหมึกพิมพ์ที่บดแสง [1,22] แต่สำหรับชั้นหมึกพิมพ์ที่มีลักษณะกึ่งโปร่งแสง ทฤษฎีคูเบลคา-มังก์สามารถทำนายค่าสีโดยพิจารณาจากค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่ทึบแสง (R_{∞}) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (S) ในกรณีนี้ K และ S จะถูกคิดแยกกัน ต่างกับชั้นฟิล์มที่บดแสงที่คำนวณเป็นค่าเดียวโดยคิดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเทียบกับสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (K/S) โดยทั่วไปแล้วชั้นหมึกพิมพ์จะเคลือบบนวัสดุพิมพ์สีจากกระบวนการพิมพ์ที่ปรากฏให้เห็นนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงแสงของหมึกพิมพ์ ความหนาของชั้นหมึกพิมพ์ และการสะท้อนแสงของวัสดุพิมพ์ เช่น กระดาษ เป็นต้น

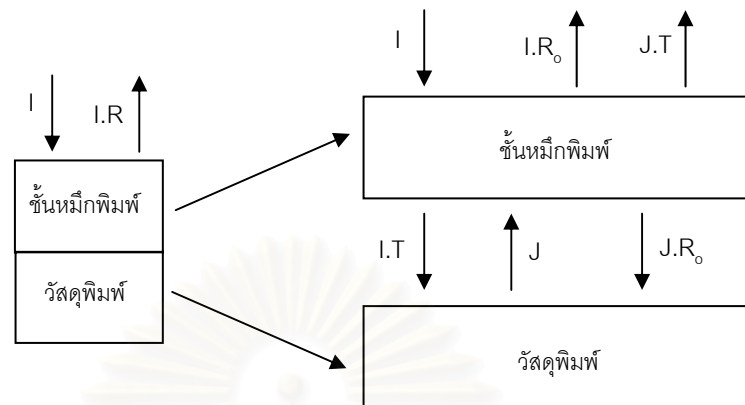
ทฤษฎีคูเบลคา-มังก์อธิบายสมบัติทางแสงของชั้นหมึกพิมพ์ โดยพิจารณาจากค่าการสะท้อนแสง (R_0) ค่าการส่องผ่าน (T) และค่าการดูดกลืนแสง (A) ดังสมการที่ 2.1 - 2.3

$$R_0 = \frac{\text{พลังงานแสงที่สะท้อนจากชั้นหมึกพิมพ์}}{\text{พลังงานแสงที่ตกกระทบชั้นหมึกพิมพ์}} \quad (2.1)$$

$$T = \frac{\text{พลังงานแสงที่ส่องผ่านจากชั้นหมึกพิมพ์}}{\text{พลังงานแสงที่ตกกระทบชั้นหมึกพิมพ์}} \quad (2.2)$$

$$A = 1 - R_0 - T \quad (2.3)$$

ชั้นหมึกพิมพ์โดยทั่วไปเป็นชั้นหมึกพิมพ์กึ่งโปร่งแสง ดังนั้นแสงสะท้อนที่บริเวณผิวหน้าของชั้นหมึกพิมพ์มีการรวมแสงกระเจิงจากสารสีโดยตรง และแสงที่ผ่านไปยังวัสดุพิมพ์จะสะท้อนกลับสู่ผิวหน้าของชั้นหมึกพิมพ์ ชั้นหมึกพิมพ์ที่มีความมันวาวสูงจะมีแสงที่เรียกว่าแสงสเปกคิวลา โดยจะมีการสะท้อนที่ผิวหน้าของชั้นหมึกพิมพ์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเดินทางของแสงในชั้นหมึกพิมพ์และวัสดุพิมพ์

จากรูปที่ 2.12 ได้อธิบายเมื่อมีวัสดุพิมพ์เข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้การเดินทางของแสงในชั้นหมึกพิมพ์และวัสดุพิมพ์มีการสะท้อนแสงจากชั้นหมึกพิมพ์แสดงได้ดังสมการที่ 2.4 - 2.8

$$R = \frac{\text{พลังงานแสงที่สะท้อนจากระบบ}}{\text{พลังงานแสงที่ตกกระทบบระบบ}} \quad (2.4)$$

$$R = \frac{I.R_0 + J.T}{I} \quad (2.5)$$

$$R_g = \frac{\text{พลังงานแสงที่สะท้อนจากวัสดุพิมพ์}}{\text{พลังงานแสงที่ตกกระทบบวัสดุพิมพ์}} \quad (2.6)$$

$$J = (I.T + J.R_0) \cdot R_g \quad (2.7)$$

$$J = \frac{I.T.R_g}{1 - R_0 \cdot R_g} \quad (2.8)$$

โดยที่

I เป็นฟลักซ์ที่ตกกระทบบนผิวชั้นหมึกพิมพ์

$I.R_0$ เป็นปริมาณฟลักซ์ I ที่สะท้อนจากชั้นหมึกพิมพ์

$I.T$ เป็นปริมาณฟลักซ์ I ที่ส่องผ่านจากชั้นหมึกพิมพ์

J เป็นฟลักซ์ที่สะท้อนจากวัสดุพิมพ์ และตกกระทบบนผิวด้านล่างของชั้นหมึกพิมพ์

$J.R_0$ เป็นปริมาณฟลักซ์ J ที่สะท้อนจากผิวด้านล่างของชั้นหมึกพิมพ์ไปวัสดุพิมพ์

$J.T$ เป็นปริมาณฟลักซ์ J ที่ส่องผ่านจากด้านล่างสูผิวหน้าของชั้นหมึกพิมพ์

$$R = \frac{\alpha \cdot R_g + \beta \cdot R_\infty}{\alpha + \beta} \quad (2.9)$$

$$\alpha = \frac{1 - R_\infty^2}{1 - R_g \cdot R_\infty} \quad (2.10)$$

$$\beta = \left[\frac{R_g - R}{R - R_\infty} \right] \cdot \left[\frac{1 - R_\infty^2}{1 - R_g \cdot R_\infty} \right] \quad (2.11)$$

หรือ
$$\beta = e^{2Z} - 1 \quad (2.12)$$

ค่า Z, ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของชั้นหมึกพิมพ์ทึบแสง อธิบายได้จากสมการที่ 2.13 - 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของชั้นหมึกพิมพ์กึ่งโปร่งแสงจะถูกคิดแยกจากกัน ซึ่งต่างกับชั้นหมึกพิมพ์ทึบแสงที่คำนวณหาโดยคิดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (K/S)

$$Z = D \cdot \sqrt{K(K + 2S)} \quad (2.13)$$

หรือ
$$Z = 0.5 \ln(\beta + 1) \quad (2.14)$$

$$K = \frac{Z}{D} \left[\frac{1 - R_\infty}{1 + R_\infty} \right] \quad (2.15)$$

$$S = \frac{Z}{D} \left[\frac{2R_\infty}{1 + R_\infty} \right] \quad (2.16)$$

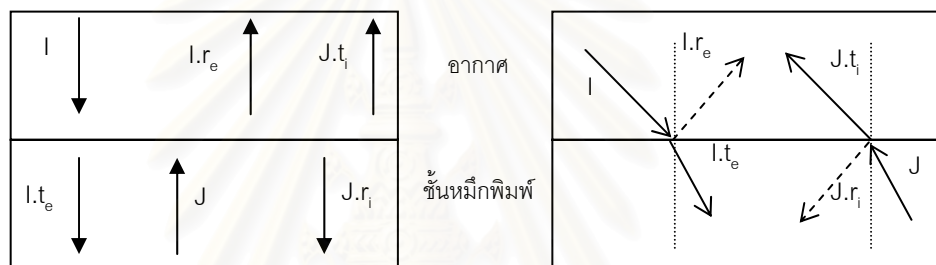
โดยที่

α เป็นฟังก์ชันของชั้นหมึกพิมพ์ทึบแสง (R_∞) และการสะท้อนแสงของวัสดุพิมพ์ (R_g)

β เป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง และความหนาของชั้นหมึกพิมพ์ผ่านทางตัวแปร Z

D เป็นความหนาของชั้นหมึกพิมพ์

ทฤษฎีคูเบลคา-มังก์ไม่ได้มีการพิจารณาการสะท้อนแสงที่เกิดตรงบริเวณผิวหน้าของชั้นหมึกพิมพ์กับอากาศที่เกิดจากการเดินทางของแสงจากอากาศไปยังชั้นหมึกพิมพ์ที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ทำให้ความเร็วของแสงในอากาศกับชั้นหมึกพิมพ์จะมีความเร็วไม่เท่ากัน โดยแสงจะเคลื่อนที่ในอากาศได้เร็วกว่าในชั้นหมึกพิมพ์ ขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของแสงในอากาศและค่าดัชนีการหักเหของหมึกพิมพ์ แสงจะเกิดการหักเหและสะท้อนแสงขึ้นพร้อม ๆ กัน ทำให้ต้องมีการแก้ไขค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้ (ρ) จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อที่จะได้ค่าการสะท้อนแสงที่ไม่รวมค่าการสะท้อนแสงส่วนที่เกิดในบริเวณที่อากาศสัมผัสกับชั้นหมึกพิมพ์ และสามารถหาค่าการสะท้อนแสงที่แท้จริงได้ (R) ดังรูปที่ 2.13 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19 - 2.21



รูปที่ 2.13 การเดินทางของแสงจากอากาศไปชั้นหมึกพิมพ์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการหักเหของอากาศ (n_1) และค่าดัชนีการหักเหของชั้นหมึกพิมพ์ (n_2) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Fresnel ดังสมการที่ 2.17 [22]

$$r = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (2.17)$$

โดยที่

r คือ ขนาดของ Fresnel reflection

n_1 คือ ดัชนีการหักเหของอากาศ

n_2 คือ ดัชนีการหักเหของชั้นหมึกพิมพ์

$$t = 1 - r \quad (2.18)$$

$$\rho = \frac{r_e \cdot I + t_i \cdot J}{I} \quad (2.19)$$

$$\rho = r_c + \frac{t_c t_i R}{1 - r_i R} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{\rho - r_c}{t_c \cdot t_i + r_i \cdot (\rho - r_c)} \quad (2.21)$$

โดยที่

พลักซ์ I เป็นปริมาณพลังงานแสงที่เดินทางจากอากาศสู่ชั้นหมึกพิมพ์
 พลักซ์ J เป็นปริมาณพลังงานแสงที่เดินทางจากชั้นหมึกพิมพ์สู่อากาศ
 r_c เป็นส่วนหนึ่งของพลักซ์ I ที่สะท้อนออกไปจากชั้นหมึกพิมพ์ด้านนอก
 t_c เป็นส่วนหนึ่งของพลักซ์ I ที่ส่องผ่านเข้ามายังชั้นหมึกพิมพ์
 r_i เป็นส่วนหนึ่งของพลักซ์ J ที่สะท้อนกลับลงมาโดยขอบชั้นหมึกพิมพ์ด้านใน
 t_i เป็นส่วนหนึ่งของพลักซ์ J ที่ส่องผ่านขอบชั้นหมึกพิมพ์ออกไป

เนื่องจากชั้นหมึกพิมพ์ของระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ตเป็นชั้นหมึกพิมพ์กึ่งโปร่งแสง นอกจากนี้อัตราการดูดซับของทฤษฎีคูเบลดคา-มังก์ที่ทำนายค่าสีจากค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่ทึบแสง (R_∞) ไม่เหมาะกับการทำนายค่าสีของชั้นหมึกพิมพ์กึ่งโปร่งแสง ฉะนั้นจึงต้องมีการหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่ทึบแสงจากค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์บนกระดาษขาวและกระดาษดำ ดังสมการที่ 2.22

$$R_\infty = B - \sqrt{B^2 - 1} \quad (2.22)$$

$$B = \frac{(1 + R_b R_w)(R_{g,w} - R_{g,b}) - (1 + R_{g,b} R_{g,w})(R_w - R_b)}{2(R_b R_{g,w} - R_{g,b} R_w)} \quad (2.23)$$

โดยที่

R_w คือ ค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่พิมพ์บนกระดาษขาว

R_b คือ ค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่พิมพ์บนกระดาษดำ

$R_{g,w}$ คือ ค่าการสะท้อนแสงบริเวณสีขาวของวัสดุพิมพ์

$R_{g,b}$ คือ ค่าการสะท้อนแสงบริเวณสีดำของวัสดุพิมพ์

2.1.7 ระบบการวัดสี CIE

CIE (Commission International de l'Eclairage) ได้พัฒนาการหาตัวเลขแทนด้วยองค์ประกอบที่สำคัญในการมองเห็นสี 3 องค์ประกอบ คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุสี และผู้สังเกตการณ์ เพื่อใช้ทดแทนวิธีการสังเกตด้วยสายตา ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อน และแปรเปลี่ยนค่าไปตามประสบการณ์ ความชำนาญของผู้สังเกตการณ์วัดเปรียบเทียบสี แต่ไม่สามารถกำหนดขอบเขตการยอมรับค่าสีเป็นตัวเลขที่ถูกต้องแน่นอนได้ [13]

2.1.7.1 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานซีไออี (CIE Standard Illuminants)

CIE ได้กำหนดแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานต่าง ๆ ไว้ โดยให้มิตีค่าอุณหภูมิสี และการกระจายพลังงานแสงในแต่ละความยาวคลื่นดังต่อไปนี้

1 แหล่งกำเนิดแสง A เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 2856 เคลวิน

2 แหล่งกำเนิดแสง B เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 4874 เคลวิน

3 แหล่งกำเนิดแสง C เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียง 6774 เคลวิน

4 แหล่งกำเนิดแสงกลางวัน (daylight) หรือแหล่งกำเนิดแสง D แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียงที่ 5000, 5500, 6500 และ 7500 เคลวิน หรือแทนด้วยสัญลักษณ์ D50, D55, D65 และ D75 ตามลำดับ

5 แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์หรือแหล่งกำเนิดแสง F เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีอุณหภูมิสีเทียบเคียงตั้งแต่ 2940 ถึง 6500 เคลวิน

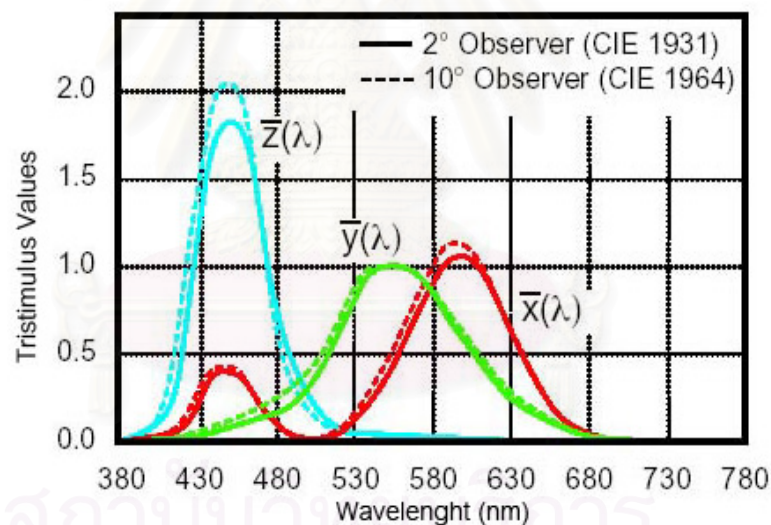
2.1.7.2 วัตถุสี

เมื่อแสงตกกระทบวัตถุสีจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนแสง การส่องผ่านและการกระเจิงของแสง ซึ่งอนุภาคของสารให้สีจะดูดกลืนแสงบางช่วงคลื่นไว้ และสะท้อนแสงบางช่วง

คลื่น ทำให้เกิดการมองเห็นสีแตกต่างกันตามความยาวคลื่นที่สะท้อน ซึ่งค่าการสะท้อนแสงของวัตถุมีสีวัดได้จากเครื่องมือวัดสีที่เรียกว่า สเปกโทรโฟโตมิเตอร์หรือคัลเลอริมิเตอร์

2.1.7.3 ผู้สังเกตการณ์มาตรฐานซีไออี (ซีไออี Standard observer)

ในปี ค.ศ. 1931 ซีไออีกำหนดให้ผู้สังเกตการณ์ที่มีการมองเห็นสีปกติทำการทดลองเทียบปรับสี (Color matching experiment) ที่มุมการมอง 2 องศา (2° 1931 CIE Standard observer) แทนด้วยสัญลักษณ์ \bar{x} \bar{y} \bar{z} เป็นมุมมองที่จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่มีเซลล์รูปกรวยเท่านั้น และในปี ค.ศ. 1964 ซีไออีกำหนดมุมมองการมอง 10 องศา (10° 1964 CIE Standard observer) แทนด้วยสัญลักษณ์ \bar{x}_{10} \bar{y}_{10} \bar{z}_{10} การเพิ่มมุมมองการมองเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการปรับเทียบสีให้มีความสัมพันธ์กับการมองเห็นของวัตถุที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ภาพที่มองเห็นต้องอาศัยการทำงานของเซลล์รูปกรวยและเซลล์รูปแท่ง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผู้สังเกตการณ์ตามมาตรฐานซีไออีที่มุมการมอง 2° และผู้สังเกตการณ์ตามมาตรฐานซีไออีที่มุมการมอง 10°

2.1.8 ค่าไตรสติมูลัส (Tristimulus values)

ค่าสีไตรสติมูลัสเป็นค่าสีในระบบการวัดสีซีไออีที่คำนวณจากค่าการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสง การสะท้อนแสงของวัตถุ และการตอบสนองของตาทำให้สามารถระบุค่าสีของวัตถุออกเป็นตัวเลขได้ โดยนำค่าทั้งสามที่แต่ละความยาวคลื่นเดียวกันมารวมกันตั้งแต่ความยาว

คลื่นที่ 400 – 700 นาโนเมตร มาคูณกันได้เป็นค่าตัวเลขสามค่าที่ใช้ในการระบุสี ของวัตถุ คือ X, Y และ Z ดังสมการที่ 2.27 - 2.29 [13]

$$X = k \int_{400}^{700} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (2.27)$$

$$Y = k \int_{400}^{700} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (2.28)$$

$$Z = k \int_{400}^{700} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad (2.29)$$

$$k = \frac{100}{\int_{400}^{700} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda} \quad (2.30)$$

โดยที่

$S(\lambda)$ คือ ค่าการกระจายพลังงานสัมพัทธ์ของแหล่งกำเนิดแสงในทุก ๆ ความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร

$R(\lambda)$ คือ ค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างในทุก ๆ ความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร

\bar{x} \bar{y} \bar{z} คือ ฟังก์ชันความไวแสงของผู้สังเกตการณ์ตามมาตรฐานซีไออี ที่ 2° ปี 1931

หรือ \bar{x}_{10} \bar{y}_{10} \bar{z}_{10} คือ ฟังก์ชันความไวแสงของผู้สังเกตการณ์ตามมาตรฐานซีไออี ที่ 10° ปี 1964

k คือ ค่าคงที่

$d\lambda$ คือ ช่วงความยาวคลื่น

2.1.9 ปริภูมิสี L*a*b*

ปริภูมิสี L*a*b* กำหนดขึ้นโดยซีไออี ในปี ค.ศ. 1976 แสดงขอบเขตสีที่ให้ระยะสเกลที่มีความสม่ำเสมอ ระบบสีประเภทนี้ประกอบด้วยตัวแปร 3 ค่า คือ ค่า L* จะหมายถึง ความสว่างสี ตั้งแต่ 0 (ดำ) ถึง 100 (ขาว) อยู่ในแกนตั้งฉากกับระนาบ a*, b* ส่วนค่า a* และ b* เป็นค่าสัมประสิทธิ์สี

โดยที่

- + a^* หมายถึง อยู่ในทิศของสีแดง
- a^* หมายถึง อยู่ในทิศของสีเขียว
- + b^* หมายถึง อยู่ในทิศของสีเหลือง
- b^* หมายถึง อยู่ในทิศของสีน้ำเงิน

ส่วนพื้นที่ตรงกลางจะไม่สามารถแยกสีได้ (achromatic) เป็นตำแหน่งของสีกลาง คือ สีเทา
 ดังรูปที่ 2.15

ค่า $L^* a^* b^*$ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.31 - 2.33 ดังนี้

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad (2.31)$$

$$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \quad (2.32)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] \quad (2.33)$$

ถ้าค่า X/X_n , Y/Y_n , หรือ Z/Z_n มีค่าน้อยกว่า 0.008856 ต้องเปลี่ยนสมการที่ 2.34 – 2.36
 ดังนี้

$$(X/X_n)^{1/3} \text{ ถูกแทนโดย } 7.787(X/X_n) + (16/116) \quad (2.34)$$

$$(Y/Y_n)^{1/3} \text{ ถูกแทนโดย } 7.787(Y/Y_n) + (16/116) \quad (2.35)$$

$$(Z/Z_n)^{1/3} \text{ ถูกแทนโดย } 7.787(Z/Z_n) + (16/116) \quad (2.36)$$

โดยที่

$X Y Z$ คือ ค่าไตรสติมูลต์ของตัวอย่าง สำหรับมาตรฐานการมองที่ 2°

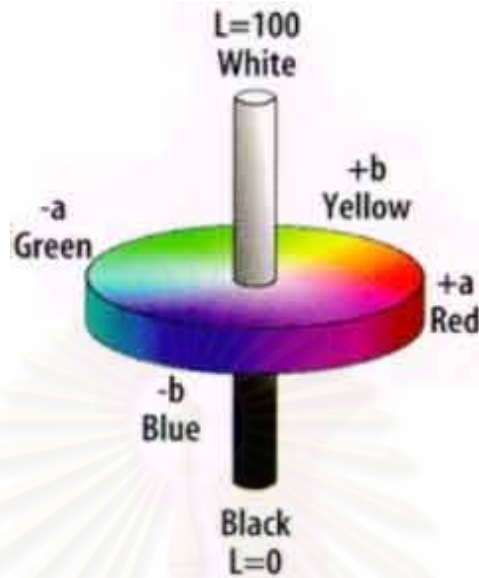
หรือ $X_{10} Y_{10} Z_{10}$ คือ ค่าไตรสติมูลต์ของตัวอย่าง สำหรับมาตรฐานการมองที่ 10°

X_n, Y_n, Z_n คือ ค่าไตรสติมูลต์ของวัตถุที่มีการสะท้อนแสงกระเจิงอย่างสมบูรณ์

สำหรับมาตรฐานการมองที่ 2° [23]

หรือ $X_{10n} Y_{10n} Z_{10n}$ คือ ค่าไตรสติมูลต์ของวัตถุที่มีการสะท้อนแสงกระเจิงอย่างสมบูรณ์

สำหรับมาตรฐานการมองที่ 10°



รูปที่ 2.15 ปริภูมิสี L*a*b*

2.1.10 ความแตกต่างของสี

ความแตกต่างของสี (ΔE_{ab}^*) ในปริภูมิสี L*a*b* แสดงถึงความแตกต่างของสีเท่านั้นไม่ได้ระบุทิศทางไว้ [13] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.37 และ 2.38

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (2.37)$$

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.38)$$

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2.39)$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab1}^* - C_{ab2}^* \quad (2.40)$$

โดยที่

$L_1^* a_1^* b_1^*$ คือ ค่าสี CIE L*a*b* ของสีตัวอย่าง

$L_2^* a_2^* b_2^*$ คือ ค่าสี CIE L*a*b* ของสีหลักที่ใช้เทียบ

$\Delta L^* \Delta a^* \Delta b^*$ คือ ค่าความแตกต่างระหว่างพิกัดของสีทั้งสอง

C_{ab1}^* คือ ค่า chroma ของสีตัวอย่าง

C_{ab2}^* คือ ค่า chroma ของสีหลักที่ใช้เทียบ

ΔC_{ab}^* คือ ค่าความแตกต่างของค่า chroma ของสีทั้งสอง

2.1.11 การหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

การคำนวณหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดกับค่าสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณ ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร ทุก ๆ 10 นาโนเมตร ดังสมการที่ 2.41

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{(R_{400} - \bar{R}_{400})^2 + (R_{410} - \bar{R}_{410})^2 + \dots + (R_{700} - \bar{R}_{700})^2}{\text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด}}} \quad (2.41)$$

โดยที่

R คือ ค่าสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณ ณ ความยาวคลื่นใด ๆ

\bar{R} คือ ค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัด ณ ความยาวคลื่นใด ๆ

2.1.12 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis)

ข้อมูลเชิงปริมาณ ได้แก่ ข้อมูลที่ได้จากการวัด การคำนวณ และรวบรวมอยู่ในรูปแบบตัวเลข เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากวัดเป็นตัวเลขที่อาจเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนที่เป็นทศนิยม ซึ่งถือว่าเป็นตัวเลขที่มีค่าต่อเนื่อง (continuous) การวิเคราะห์สำหรับข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อหาค่าดังต่อไปนี้ [24]

2.1.12.1 ค่าเฉลี่ย (Average)

ค่าเฉลี่ย (Average) ใช้สัญลักษณ์ \bar{X} เป็นค่าที่บอกศูนย์กลางของข้อมูล หาได้จากการนำข้อมูลแต่ละค่ามารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด [24] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.42

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (2.42)$$

โดยที่

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ย

$\sum X$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.1.12.2 ค่ามัธยฐาน (Median)

ค่ามัธยฐาน (Median) คือ ค่าของข้อมูลที่มีตำแหน่งตรงกลางข้อมูลทั้งหมด ในการหามัธยฐานของข้อมูลทั่ว ๆ ไปที่ยังไม่ได้แจกแจงความถี่ สามารถหาได้โดยการเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยไปหามากหรือจากมากไปหาน้อย ถ้าจำนวนข้อมูลเป็นจำนวนคี่ ข้อมูลที่มีตำแหน่งอยู่ตรงกลางจะเป็นมัธยฐาน แต่ถ้าจำนวนข้อมูลเป็นจำนวนคู่ ค่ามัธยฐานหาได้จากการนำข้อมูล 2 ค่า ที่มีตำแหน่งอยู่ตรงกลางมารวมกันแล้วหารด้วย 2 [24]

2.1.12.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็นการวัดความเบี่ยงเบนของข้อมูลที่ออกมาจากค่าเฉลี่ยหรือเป็นการวัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละค่ากับค่าเฉลี่ย ถ้าความแตกต่างมีมากแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายออกจากค่าเฉลี่ยมาก การวัดการกระจายของข้อมูล [24] โดยใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.43

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N}} \quad (2.43)$$

X คือ ค่าข้อมูลแต่ละค่า

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ย

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Imai และคณะ [2] ทำการศึกษาวิธีการผลิตภาพสีโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัม โดยเริ่มกระบวนการจากการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลผ่านฟิลเตอร์หลากสี เพื่อบันทึกข้อมูลสเปกตรัมของต้นฉบับและผ่านการประมวลผลภาพด้วยระบบ MVSI (Multi-channel Visible Spectrum Imaging) พิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตสีสี่ (CMYK) จากผลการทดลองพบว่า การผลิตสิ่งพิมพ์โดยอาศัยข้อมูลสเปกตรัมช่วยลดการเกิดเมแทเมอริซึม โดยการทำงานของระบบมีความถูกต้องเท่ากับ $1.5 \Delta E_{94}^*$ และมีความผิดพลาดของค่าสเปกตรัมเท่ากับ 0.9 %

Hardeberg และคณะ [3] ทำการทดลองบันทึกข้อมูลสเปกตรัมของภาพผ่านระบบกล้องดิจิทัลที่ใช้ฟิลเตอร์แยกแสงสีจำนวนต่าง ๆ กัน ได้แก่ 5, 7 และ 10 แผ่นที่ให้ค่าการส่องผ่านครอบคลุม

ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400 – 700 นาโนเมตร จากนั้นทำการแปลงค่าข้อมูลการตอบสนองของกล้องที่บันทึกได้เป็นค่าสเปกตรัมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ผลการทดลองพบว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีเมื่อใช้ฟิลเตอร์ 5 แผ่น เท่ากับ $1.58 \Delta E_{94}^*$, 7 แผ่น เท่ากับ $0.56 \Delta E_{94}^*$ และ 10 แผ่น เท่ากับ $0.14 \Delta E_{94}^*$

Rosen และคณะ [4] ทำการทดสอบการพิมพ์ภาพสีด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ททกสี (CMYKGO) โดยการนำข้อมูลสเปกตรัมของภาพต้นฉบับผ่าน Look-up table ขนาด $5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5$ เพื่อแปลงเป็นค่าสีในการสั่งพิมพ์ จากผลการทดลองพบว่า ค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์มีค่าคลาดเคลื่อนรบกวนกำลังสองเฉลี่ย (RMS error) จากค่าต้นฉบับเท่ากับ 0.02

จากการทดลองของ Tzeng และ Berns [5,6] ในการพิมพ์ภาพสีด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ททกสี โดยการประยุกต์ใช้สมการนอยกาบาวที่ปรับเปลี่ยนโดยใช้ยูล-นีลสัน (Yule-Nielson modified spectral Neugebauer equation) ในการแปลงค่าสเปกตรัมเป็นค่าสีที่ใช้สั่งพิมพ์ และเลือกชุดหมึกพิมพ์สีจากทกสีที่ให้ผลความผิดพลาดของค่าสเปกตรัมที่ดีที่สุด พบว่าได้ค่าคลาดเคลื่อนรบกวนกำลังสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.063 และค่าความแตกต่างสี ΔE_{94}^* เท่ากับ 1.16 [5] และมีการพัฒนางานวิจัยต่อมาได้ค่าความถูกต้องในการแปลงค่าสีโดยการทดสอบด้วยค่าคลาดเคลื่อนรบกวนกำลังสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.028 และค่าความแตกต่างสี ΔE_{94}^* เท่ากับ 2.3 [6]

Tzeng และ Berns [7] พัฒนาการเลือกชุดหมึกพิมพ์ที่เหมาะสมในการพิมพ์ภาพสีที่ให้ค่าสเปกตรัมใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองของสมการคูเบลคา-มังก์ (Kubelka-Munk equation) เลือกชุดหมึกพิมพ์ในการพิมพ์ทกสี จากผลการทดลองพบว่า ภาพสีที่พิมพ์ได้มีความแตกต่างสีจากต้นฉบับ ΔE_{94}^* เท่ากับ 0.22

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. กระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ทน้ำหนัก 120 แกรม ของ Hi-jet
2. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ทแคนนอน : Canon i9950
 - เครื่องพิมพ์ระบบหมึกพิมพ์ 8 สี ได้แก่ สี Red, สี Green, สี Black, สี Yellow, สี Magenta, สี Photo Magenta, สี Cyan และสี Photo Cyan
 - ความละเอียด 4,800 x 2,400 dpi
 - หมึกพิมพ์ประเภทสารให้สีชนิดสีย้อม
3. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ X-Rite Spectrophotometer รุ่น SP62
4. โปรแกรม X-Rite® Color Master III
5. โปรแกรม Adobe Photoshop CS2
6. โปรแกรม Microsoft Office Excel 2003

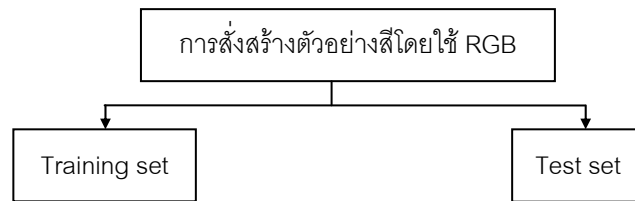
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1. ขั้นตอนการเตรียมภาพต้นฉบับ 2. ขั้นตอนการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ท 3. ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมภาพต้นฉบับ

ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะเป็นภาพที่ประกอบด้วยตัวอย่างสีหลายสี โดยชุดตัวอย่างสีแบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ เรียกว่า Training set และชุดตัวอย่างสีทดสอบ เรียกว่า Test set โดยในการทดลองนี้สร้างชุดตัวอย่างสีขึ้นจากหลักการการผสมสีแบบบวก ดังแสดงในแผนผังที่ 3.1 รายละเอียดในการสร้าง Training set และ Test set ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ

3.2.1.1 และ 3.2.1.2 ตามลำดับ

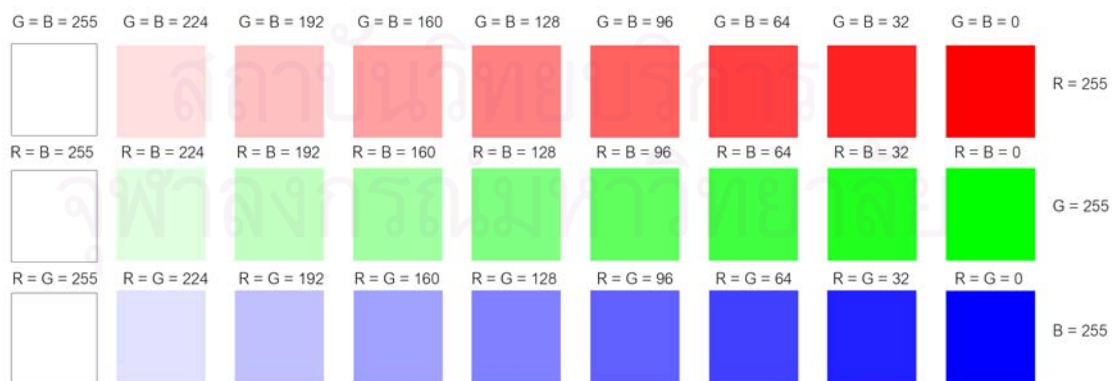


แผนผังที่ 3.1 การเตรียมภาพต้นฉบับ

3.2.1.1 การสร้างชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ (Training set)

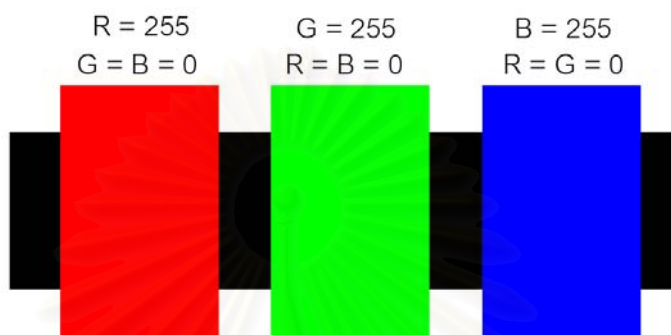
จากหลักการการผสมสีแบบบวกที่ประกอบด้วยแม่สี 3 สี ได้แก่ สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ในการทดลองนี้จึงสร้างตัวอย่างสีที่ให้การพิมพ์สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสี RGB แตกต่างกัน 9 ระดับ จากน้อยที่สุด คือ สีขาวของกระดาษและค่อย ๆ มีสีเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มของสีนั้นมากที่สุด โดยมีรายละเอียดการสร้างตัวอย่างสีดังนี้

1. กำหนดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 เพื่อสร้างชุดตัวอย่างสีแดงที่มีความเข้มของค่าสีแตกต่างกัน 9 ระดับ โดยการกำหนดค่าสีแดง (R) เท่ากับ 255 จากนั้นกำหนดค่าสีอีกสองสีที่เหลือ นั่นคือ สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ในทุกตัวอย่างสีให้มีค่าสีลดหลั่นลงในระดับเท่า ๆ กันดังนี้ 255, 224, 192, 160, 128, 96, 64, 32 และ 0 ตามลำดับ และทำเช่นเดียวกันนี้เพื่อสร้างชุดตัวอย่างสีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ในลักษณะเดียวกัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดตัวอย่างสี Training set

2. สร้างตัวอย่างสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) สำหรับพิมพ์ลงบนกระดาษดำ โดยกำหนดค่าสีนั้น ๆ เท่ากับ 255 และกำหนดอีกสองสีที่เหลือให้เท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสีที่พิมพ์ลงบนกระดาษดำ

3. ทหาระดับความเข้มขึ้นของค่าสีแดง (R) โดยสามารถหาได้จากสูตร $\left(1 - \frac{G+B}{2 \times 255}\right)$ โดยการแทนค่าสีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) จากค่าสี 255, 224, 192, 160, 128, 96, 64, 32 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วจะได้ความเข้มขึ้นของค่าสีแดงเท่ากับ 0, 0.122, 0.247, 0.373, 0.498, 0.624, 0.749, 0.875 และ 1 ตามลำดับ และในทำนองเดียวกันการหาค่าระดับความเข้มขึ้นของค่าสีเขียวต้องเปลี่ยนสูตรเป็น $\left(1 - \frac{R+B}{2 \times 255}\right)$ และการหาระดับความเข้มขึ้นของค่าสีน้ำเงินต้องเปลี่ยนสูตรเป็น $\left(1 - \frac{R+G}{2 \times 255}\right)$ ทำการคำนวณหาค่าระดับความเข้มขึ้นของค่าสีเขียวและสีน้ำเงินเหมือนกับการคำนวณหาค่าระดับความเข้มขึ้นของค่าสีแดง

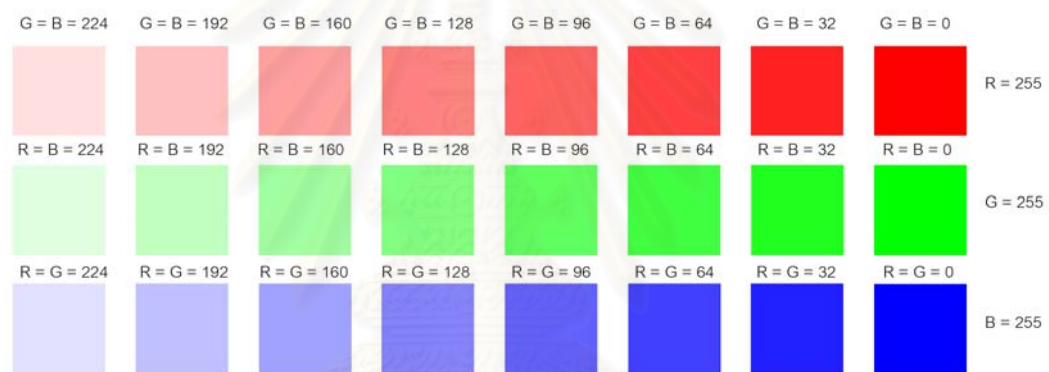
3.2.1.2 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบ (Test set)

เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะที่ได้สร้างขึ้น จึงได้สร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบจำนวน 50 ตัวอย่างสี โดยทำการแบ่งชุดตัวอย่างสีทดสอบออกเป็น 3 ชุดตัวอย่างสี ได้แก่ 1.ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินจำนวน 24 ตัวอย่างสี เพื่อทดสอบความถูกต้องของฐานข้อมูลค่าสี RGB ที่นำมาสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ 2.ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale จำนวน 8 ตัวอย่างสี เพื่อทดสอบความถูกต้องของการผสมค่าสี RGB ที่เท่า ๆ กัน 3.ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี เพื่อทดสอบความถูกต้องของการผสมค่าสี RGB ในระดับที่ไม่เท่ากัน โดยกำหนดให้ตัวอย่างสีทดสอบมีการกระจาย

ตัวครอบคลุมสีในทุก ๆ เฉดสี ซึ่งมีรายละเอียดในการสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบทั้ง 3 ชุดตัวอย่างสี ดังนี้

3.2.1.2.1 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

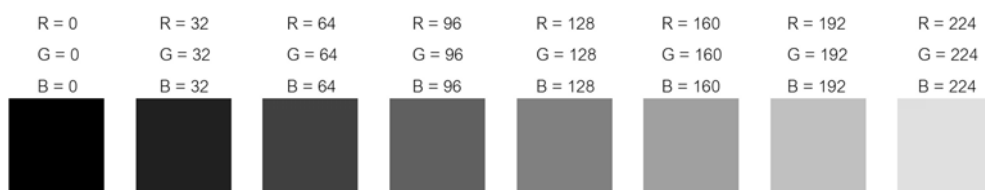
กำหนดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 เพื่อสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงที่ความเข้มข้นของค่าสีต่างกัน 8 ระดับ โดยการกำหนดค่าสี R เท่ากับ 255 ในทุกตัวอย่างสี และกำหนดค่าสี G และ B ให้มีระดับค่าสีเท่า ๆ กันดังนี้ 224, 192, 160, 128, 96, 64, 32 และ 0 ตามลำดับ ในการสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว และสีน้ำเงินนั้นให้เปลี่ยนจากรูปสีแดง (R) เป็นสีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

3.2.1.2.2 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale

กำหนดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 เพื่อสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale ที่ความเข้มข้นของค่าสีต่างกัน 8 ระดับ โดยการกำหนดค่าสี RGB ในทุกตัวอย่างสีให้มีค่าสี RGB เท่า ๆ กันดังนี้ 0, 32, 64, 96, 128, 160, 192 และ 224 ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale

3.2.1.2.3 การสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม

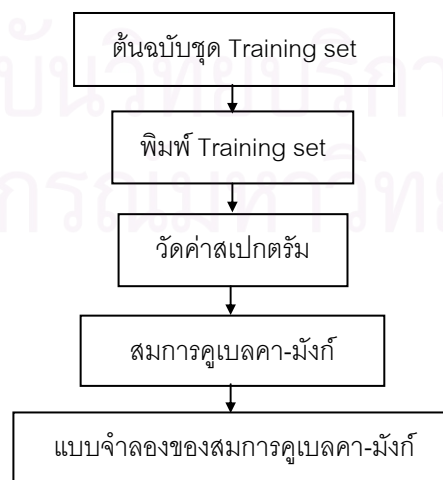
กำหนดค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 เพื่อสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม โดยการกำหนดค่าสี RGB ที่เป็นสีผสมจำนวนทั้งหมด 18 ตัวอย่างสีที่ไม่ซ้ำกับตัวอย่างสีในข้อ 3.2.1.2.1 และข้อ 3.2.1.2.2 ซึ่งในการกำหนดค่าสี RGB ของตัวอย่างสีของสีผสมให้มีค่าสีที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0, 128 และ 255 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม

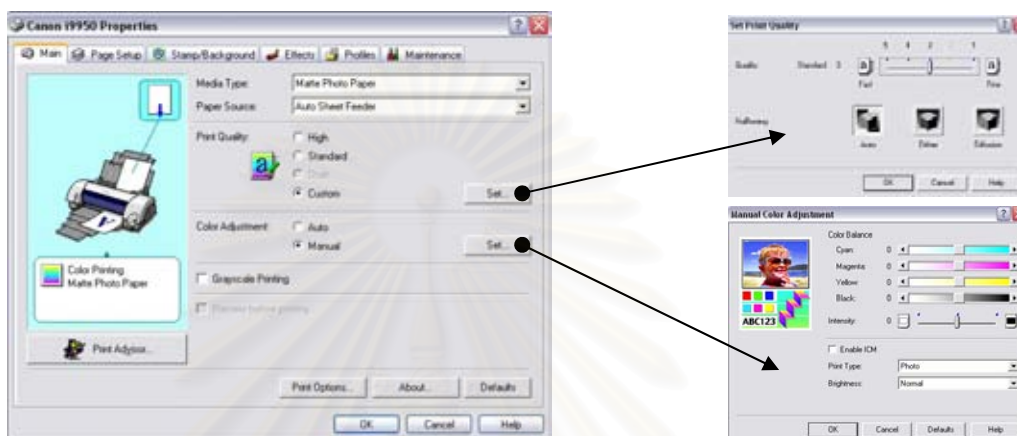
3.2.2 ขั้นตอนการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทเป็นขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์กับค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ เพื่อนำไปใช้กำหนดค่าสีที่ส่งไปยังเครื่องพิมพ์ให้ผลิตสีได้ตรงกับความต้องการ โดยมีขั้นตอนดังแผนผังที่ 3.2 และมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้



แผนผังที่ 3.2 การหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์

1. พิมพ์ชุดตัวอย่างสี Training set จากขั้นตอน 3.2.1.1 บนกระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ตขาวดำที่ได้พิมพ์สีดำไว้ก่อน แล้วทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน โดยกำหนดสภาวะการพิมพ์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การกำหนดสภาวะการพิมพ์

รายละเอียดการตั้งค่าการพิมพ์มีดังนี้

1) เลือกชนิดกระดาษ : Matte Photo Paper

2) เลือกคุณภาพกระดาษ : Custom

- ตั้งค่าคุณภาพมาตรฐาน โดยทั่วไปเลือกค่าเท่ากับ 3
- ตั้งค่าฮาล์ฟโทน โดยอัตโนมัติ

3) เลือกการปรับคุณภาพสี : Manual

- ตั้งค่าความสมดุลของสี Cyan, สี Magenta, สี Yellow และสี Black โดยเลือกค่าสีเท่ากับ 0
- ตั้งค่าความเข้มของสี โดยเลือกค่าสีเท่ากับ 0
- ไม่เลือก Enable ICM

2. วัดค่าสเปกตรัมของชุดตัวอย่างสีที่พิมพ์ ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ผ่านโปรแกรม X-Rite® Color Master III โดยกำหนดสภาวะการวัดสเปกตรัมดังนี้

1) ทำการคาลิเบรทเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ด้วยเครื่องมือคาลิเบรทที่ประกอบด้วย แผ่นเซรามิกสีขาว และช่องกลวงสีดำ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องมือคาลิเบรทเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

2) กำหนดการวัดแบบรวมแสงสเปกคิวลา

3) วัดค่าสเปกตรัมทุก ๆ 10 นาโนเมตร ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร

3. นำค่าสเปกตรัมมาสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์จากสมการคูเบลคา-มันท์ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณ 3 ขั้นตอน คือ

1) ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บดแสง โดยมีกระบวนการดังแสดงในแผนผังที่ 3.3

2) ขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (S) ของชั้นหมึกพิมพ์ โดยมีกระบวนการดังแสดงในแผนผังที่ 3.4

3) ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K_R , K_G และ K_B ของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ) กับค่าความเข้มข้นของค่าสี RGB ที่สั่งพิมพ์ (C_R , C_G และ C_B ตามลำดับ) มีขั้นตอนดังแผนผังที่ 3.5 โดยกำหนดความสัมพันธ์สมการที่ 3.1 - 3.3 ทำการแก้สมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square method) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a_i , b_i และ c_i ($i=1,2,\dots,7$) ที่ใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำนายค่าสเปกตรัมต่อไป

$$K_R = a_1 C_R + a_2 C_G + a_3 C_B + a_4 C_R C_G C_B + a_5 C_R^3 + a_6 C_G^3 + a_7 C_B^3 \quad (3.1)$$

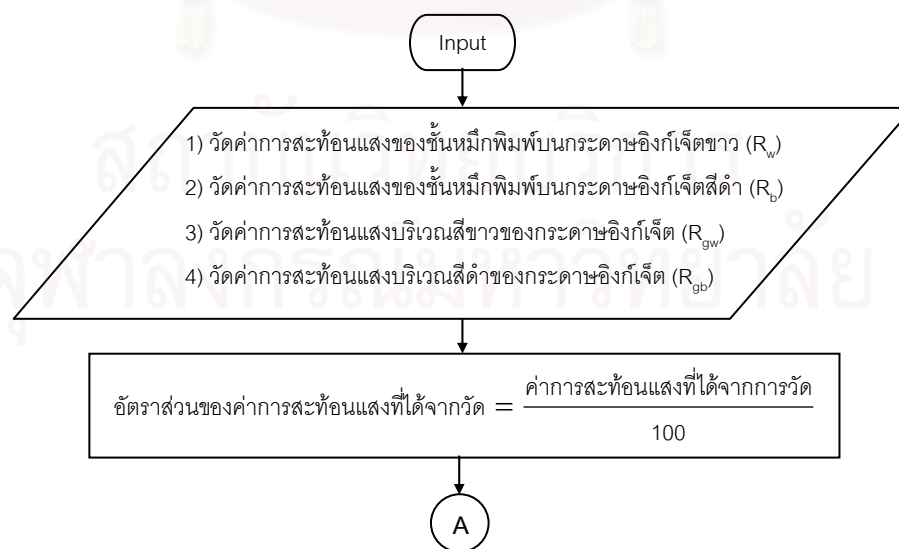
$$K_G = b_1 C_R + b_2 C_G + b_3 C_B + b_4 C_R C_G C_B + b_5 C_R^3 + b_6 C_G^3 + b_7 C_B^3 \quad (3.2)$$

$$K_B = c_1 C_R + c_2 C_G + c_3 C_B + c_4 C_R C_G C_B + c_5 C_R^3 + c_6 C_G^3 + c_7 C_B^3 \quad (3.3)$$

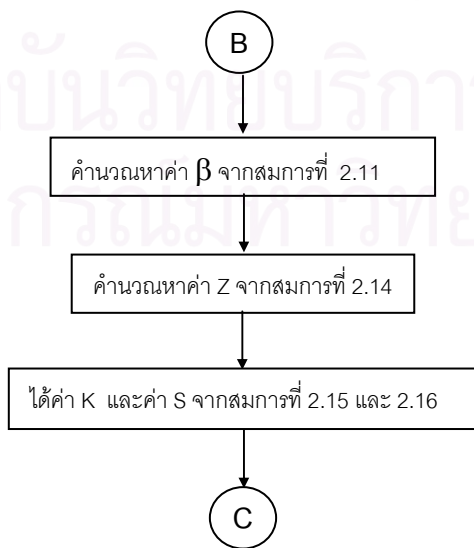
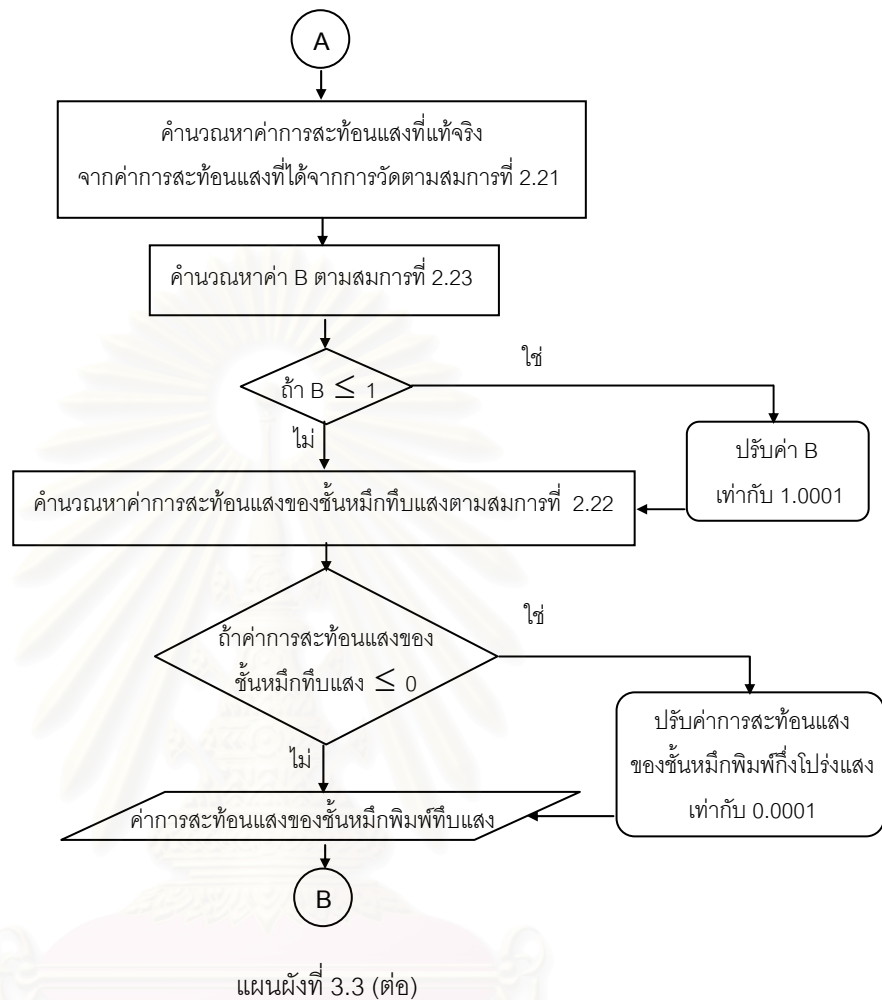
ในหมึกพิมพ์ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของค่าสีที่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น เมื่อความเข้มข้นของค่าสีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นด้วย จึงสามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_R , K_G และ K_B ที่ได้จากสมการที่ 3.1 - 3.3 กับค่าความเข้มข้นของค่าสี C_R , C_G และ C_B เป็นดังนี้ $K_R = aC_R$, $K_G = bC_G$ และ $K_B = cC_B$ โดยทำการแก้สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a , b และ c ที่ใช้เป็นฐานข้อมูลในการทำนายค่าสี RGB ต่อไป ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของค่าสีของแต่ละสีที่ต้องใช้ เพื่อการทำนายค่าสี ดังสมการที่ 3.4 โดยสามารถหาค่า K_M และค่า S_M ของหมึกพิมพ์สีผสม และคำนวณหาค่าสเปกตรัมของสีที่ทำนายต่อไป

$$K_M = K_R + K_G + K_B \quad (3.4)$$

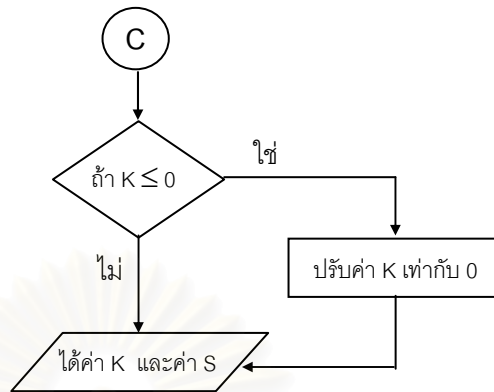
$$S_M = S_R + S_G + S_B \quad (3.5)$$



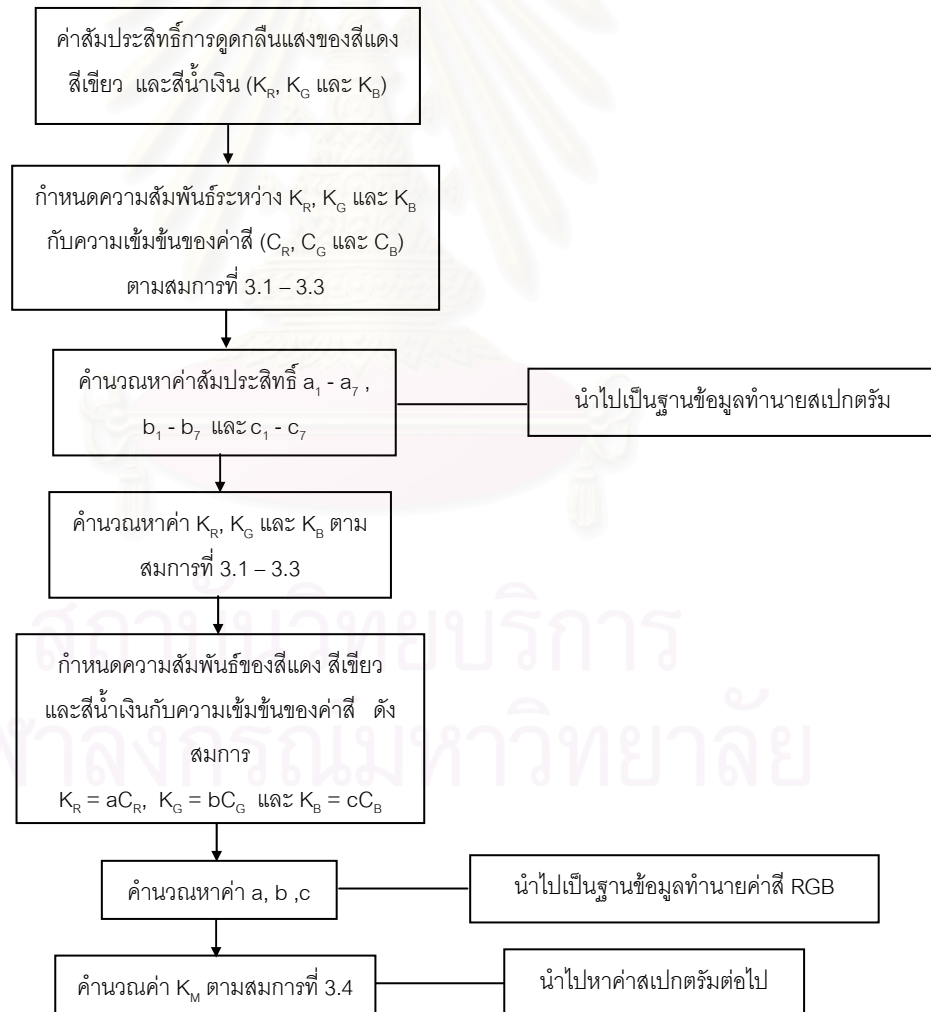
แผนผังที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บดแสง



แผนผังที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่า K และ S



แผนผังที่ 3.4 (ต่อ)



แผนผังที่ 3.5 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
กับค่าความเข้มของค่าสี RGB

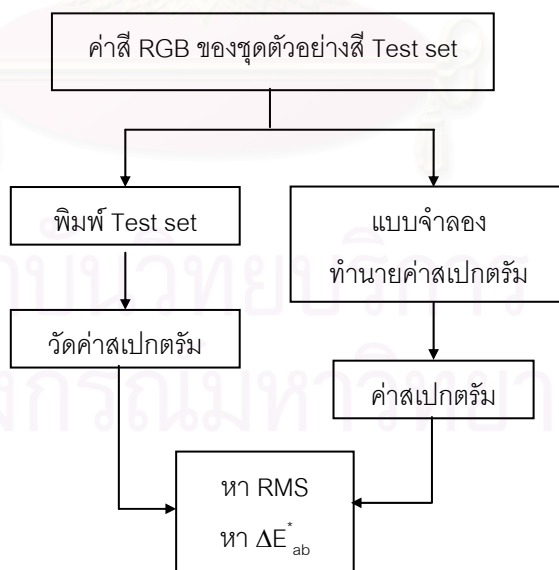
3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ

นำแบบจำลองลักษณะเฉพาะที่มีพื้นฐานมาจากสมการคูเบลคา-มันท์ที่ได้จากขั้นตอน 3.2.2 มาทดสอบความถูกต้องในการทำนายค่าสี RGB และค่าสเปกตรัมของสีสิ่งพิมพ์ที่ได้ ซึ่งความถูกต้องในการทำนายค่าสีจะทดสอบด้วยชุดตัวอย่างสี Test set ซึ่งมีการตั้งสภาวะการพิมพ์และการวัดค่าสเปกตรัมเหมือนกับขั้นตอนการหาลักษณะเฉพาะทุกประการ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.2.3.1 การทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม

แผนผังที่ 3.6 แสดงการทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัมของแบบจำลองลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. นำค่าสี RGB ของชุดตัวอย่างสี (Test set) จากขั้นตอน 3.2.1.2 มาผ่านแบบจำลองทำนายค่าสเปกตรัม โดยการคำนวณย้อนกลับของขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 3 ตามแผนผังที่ 3.3 และ 3.4 ได้ค่าสเปกตรัมจากการทำนาย ดังแสดงในแผนผังที่ 3.6



แผนผังที่ 3.6 การทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม

2. พิมพ์ค่าสี RGB ของชุดตัวอย่างสี (Test set) บนกระดาษอิงก์เจ็ต โดยกำหนดสภาวะการพิมพ์ดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 1

3. วัดค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยกำหนดสภาวะการวัดค่าสเปกตรัมดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 2

4. เปรียบเทียบค่าสเปกตรัมที่ได้จากการทำนาย (ข้อ 1) กับค่าการวัด (ข้อ 3) โดยการคำนวณหาค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) โดยการแปลงค่าสเปกตรัมไปเป็นค่า XYZ ที่มุมการมองมาตรฐาน 2 องศา ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 ด้วยสมการที่ 2.27 - 2.29 จากนั้นแปลงค่า XYZ เป็นค่า $L^*a^*b^*$ ด้วยสมการที่ 2.31 - 2.33 และหาค่าเฉลี่ย ΔE^*_{ab} ระหว่างค่าทำนายกับค่าการวัด และคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ด้วยสมการที่ 2.41

3.2.3.2 การทดสอบการทำนายค่าสี RGB

แผนผังที่ 3.7 แสดงการทดสอบการทำนายค่าสี RGB ของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. พิมพ์ชุดตัวอย่างสี (Test set) จากขั้นตอน 3.2.1.2 บนกระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยกำหนดสภาวะการพิมพ์ดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 1 ดังแสดงในแผนผังที่ 3.7

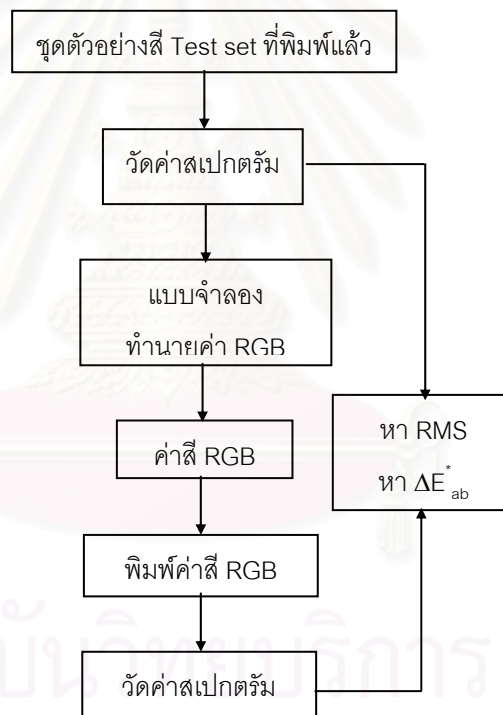
2. วัดค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยกำหนดสภาวะการวัดค่าสเปกตรัมดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 2

3. นำค่าสเปกตรัมที่วัดได้จากข้อ 2 ผ่านแบบจำลองทำนายค่าสี RGB โดยการกำหนดค่าความเข้มข้นของค่าสีเริ่มต้นของค่าสี RGB เท่ากับ 1 เพื่อทำการคำนวณย้อนกลับในขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 3 ตามแผนผังที่ 3.3 และ 3.4 ทำการปรับค่าความเข้มข้นของสี RGB ซึ่งจะได้ค่าสเปกตรัมที่ทำนายเปรียบเทียบกับค่าสเปกตรัมที่วัด (ข้อ 2) เพื่อให้ได้ค่า ΔE^*_{ab} ที่มีค่าน้อยที่สุด และนำค่าความเข้มข้นของค่าสี RGB แปลงเป็นค่าสี RGB โดยการคำนวณจากค่าความเข้มข้นของค่าสี RGB คูณกับ 255 จะได้ค่าสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B)

4. นำค่าสี RGB (ข้อ 3) มาสร้างชุดตัวอย่างสีที่ผ่านการทำนายค่าสี RGB ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 และพิมพ์ชุดตัวอย่างสีที่ผ่านการทำนายค่าสี RGB บนกระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ต โดยกำหนดสภาวะการพิมพ์ดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 1

5. วัดค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ที่ได้จากข้อ 4 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยกำหนดสภาวะการวัดค่าสเปกตรัมดังขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อ 2

6. เปรียบเทียบค่าสเปกตรัมที่ได้จากการวัดจากต้นฉบับ (ข้อ 2) กับค่าการวัดจากภาพพิมพ์ที่ได้จากการทำนาย (ข้อ 5) โดยการคำนวณหาค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) โดยการแปลงค่าสเปกตรัมไปเป็นค่า XYZ ที่มุมการมองมาตรฐาน 2 องศา ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 ด้วยสมการที่ 2.27 - 2.29 จากนั้นแปลงค่า XYZ เป็นค่า $L^*a^*b^*$ ด้วยสมการที่ 2.31 - 2.33 และหาค่าเฉลี่ย ΔE^*_{ab} ระหว่างค่าทำนายกับค่าการวัด และคำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ด้วยสมการที่ 2.41



แผนผังที่ 3.7 การทดสอบการทำนายค่าสี RGB

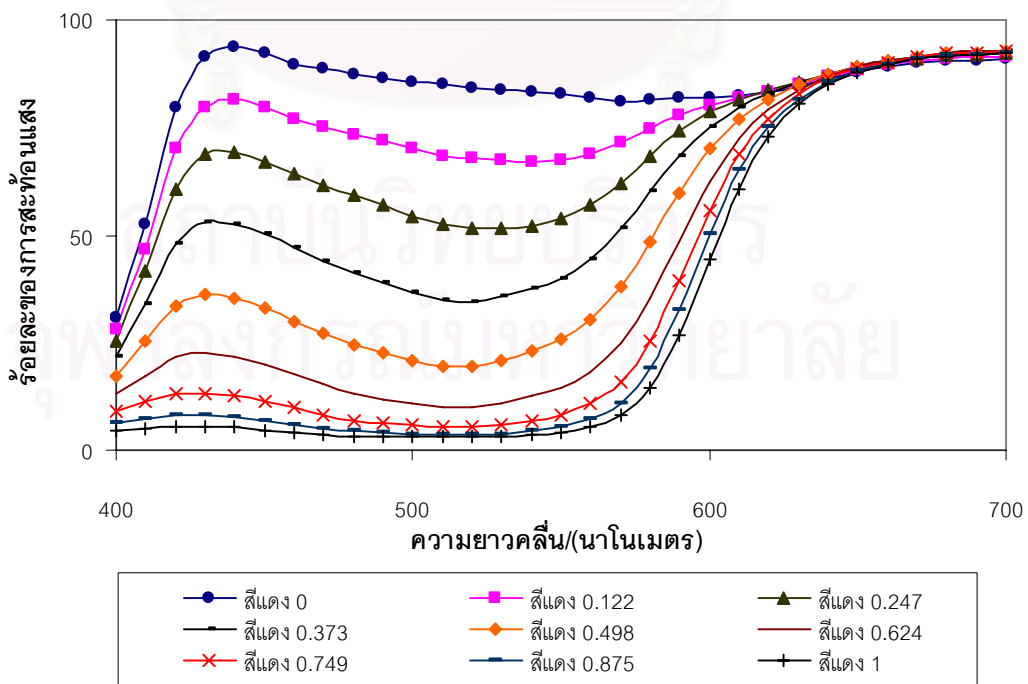
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

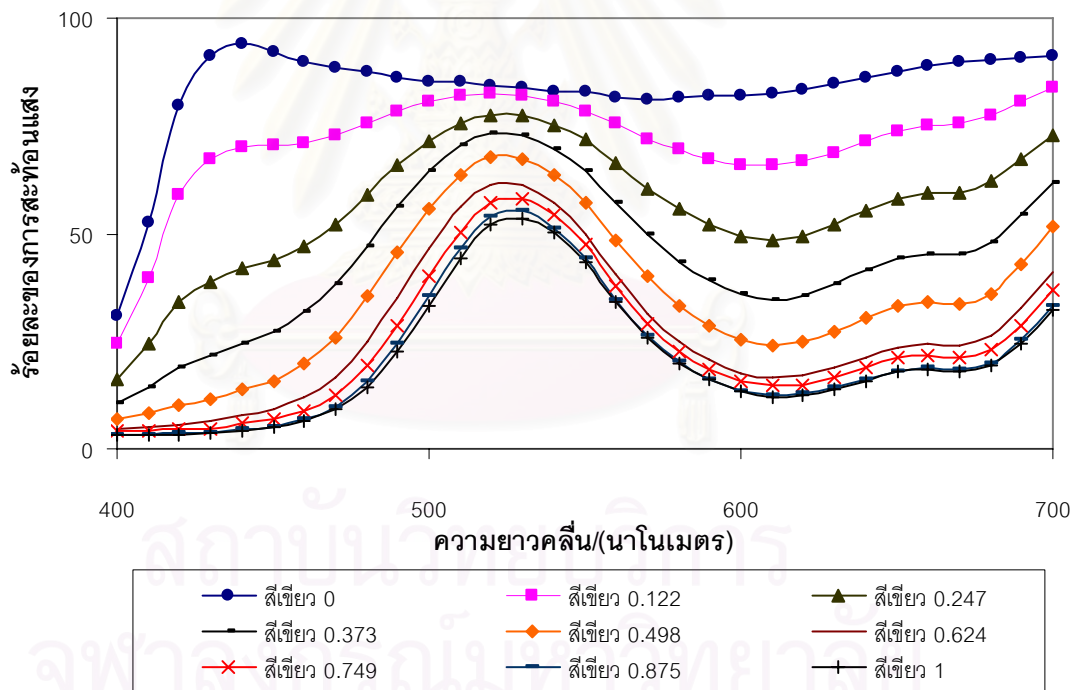
ชุดตัวอย่างสี (Training set) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะ ประกอบด้วย สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาวมีค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 การสะท้อนแสงของสีแดงที่ทุกความเข้มข้นของค่าสีที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของค่าสีต่ำสุดพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์ บริเวณนั้นมีการสะท้อนแสงสูงสุดในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงของกระดาษขาว เพราะที่ความเข้มข้นของค่าสีนี้จะไม่มีการพิมพ์สีใด ๆ ลงไปบนกระดาษ ส่วนสเปกตรัมของความเข้มข้นของค่าสีสูงสุดที่พิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์ พบว่ามีการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีน้ำเงิน และสีเขียว (400 - 600 นาโนเมตร) น้อยที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีอื่นที่ลดหลั่นลงมามีค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันนี้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีแดง (600 - 700 นาโนเมตร) มีค่าที่เท่า ๆ กันในทุกระดับความเข้มข้นของค่าสี ดังนั้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสีแดงลดลง ความอิมพัลส์จะลดลงและมีความสว่างสีเพิ่มขึ้น เพราะมีการสะท้อนแสงสีในช่วงความยาวคลื่นอื่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 การสะท้อนแสงของสีแดงที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว

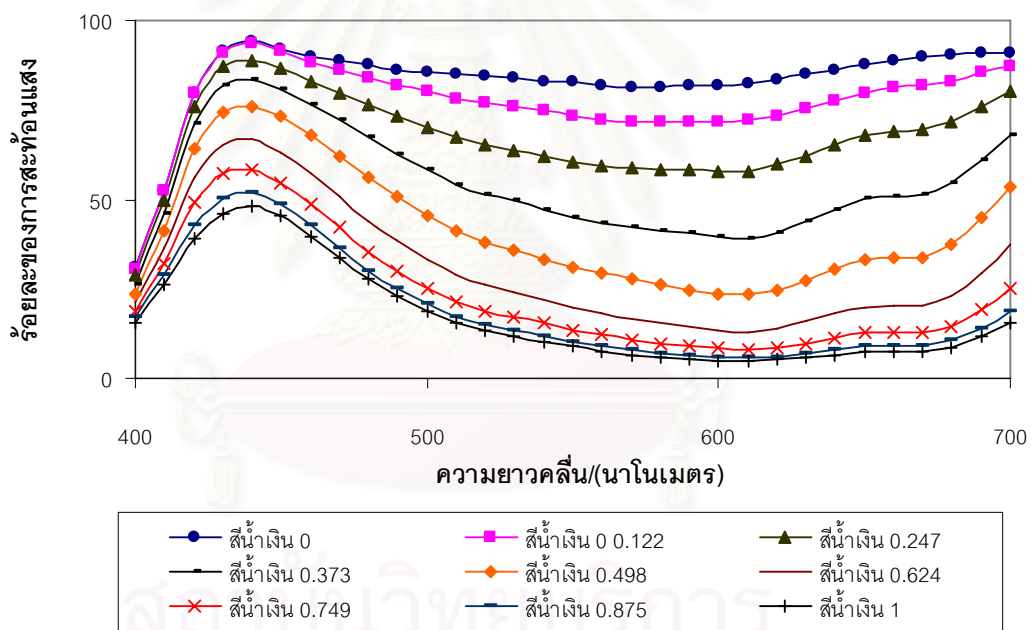
จากรูปที่ 4.2 การสะท้อนแสงของสีเขียวที่ทุกความเข้มข้นของค่าสีที่แตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของค่าสีต่ำสุดที่พิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์มีการสะท้อนแสงสูงสุดในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงของกระดาษขาว เพราะที่ความเข้มข้นของค่าสีนี้จะไม่มีการพิมพ์สีใด ๆ ลง ไปบนกระดาษ ส่วนสเปกตรัมของความเข้มข้นของค่าสีสูงสุดที่พิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์ พบว่ามีการ สะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีน้ำเงิน (400 - 500 นาโนเมตร) และช่วงความยาวคลื่นของ สีแดง (600 - 700 นาโนเมตร) น้อยที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีอื่นที่ลดหลั่นลงมีการ สะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันนี้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาว คลื่นของสีเขียว (500 - 600 นาโนเมตร) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเมื่อความเข้มข้นของค่าสีลดลง ดังนั้นเมื่อระดับความเข้มข้นของค่าสีเขียวลดลงความอิมพัลส์จะลดลงและมีความสว่างสีเพิ่มขึ้น เพราะมีการสะท้อนแสงสีในทุกช่วงความยาวคลื่นอื่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 การสะท้อนแสงของสีเขียวที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว

จากรูปที่ 4.3 การสะท้อนแสงของสีน้ำเงินที่ทุกความเข้มข้นของค่าสีที่แตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของค่าสีต่ำสุดที่พิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์มีการสะท้อนแสงสูงสุดในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงของกระดาษขาว เพราะที่ความเข้มข้นของค่าสีนี้จะไม่มีการพิมพ์สีใด ๆ ลง

ไปบนกระดาษ ส่วนสเปกตรัมของความเข้มข้นของค่าสีสูงสุดที่พิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์ พบว่ามีการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีเขียว (500 - 600 นาโนเมตร) และช่วงความยาวคลื่นของสีแดง (600 - 700 นาโนเมตร) น้อยที่สุด โดยที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีอื่นที่ลดหลั่นลงมามีค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันนี้เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ส่วนค่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีน้ำเงิน (400 - 500 นาโนเมตร) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของค่าสีลดลง ดังนั้นเมื่อระดับความเข้มข้นของค่าสีน้ำเงินลดลง ความอึมตัวสีจะลดลงและมีความสว่างสีเพิ่มขึ้น เพราะมีการสะท้อนแสงสีในช่วงความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าความเข้มข้นของค่าสีแปรผันตรงกับความอึมตัวสี แต่แปรผกผันกับความสว่างสี กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของค่าสีเพิ่มขึ้น ตัวอย่างสีที่พิมพ์จะมีความเป็นสีมากขึ้นแต่มีความสว่างลดลง

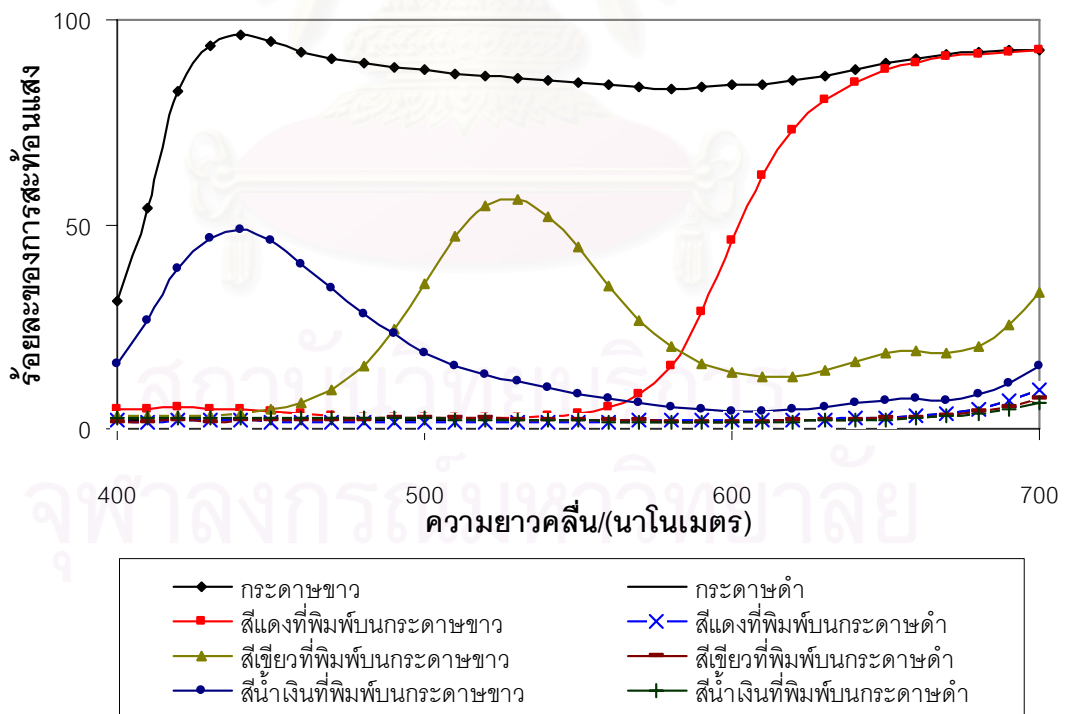


รูปที่ 4.3 การสะท้อนแสงของสีน้ำเงินที่ความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ บนกระดาษขาว

การหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่ที่บแสงนั้น เราต้องพิมพ์หมึกลงบนวัสดุพิมพ์จนทึบแสง ซึ่งจะได้ความหนาของชั้นหมึกพิมพ์มากทำให้เกิดการแห้งตัวช้าจึงเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการใช้สมการคูเบลคา-มังก์ ทำให้ต้องมีการหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บแสงโดยการพิมพ์หมึกลงบนกระดาษขาวและกระดาษดำ ซึ่งหากชั้นหมึกพิมพ์ที่บแสงค่าการสะท้อนแสงที่ได้บนกระดาษขาวและกระดาษดำจะมีค่าเท่ากัน หากไม่เท่ากันแสดงว่ามีการสะท้อนแสงของกระดาษรวมอยู่ด้วย จากหลักการนี้สามารถนำมาหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บ

แสง (R_{∞}) ได้จากสมการที่ 2.22 ซึ่งคำนวณจากค่าการสะท้อนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีเท่ากับ 1 ที่พิมพ์บนกระดาษขาวและกระดาษดำ ได้ค่าการสะท้อนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินบนกระดาษขาวและกระดาษดำแสดงดังรูปที่ 4.4

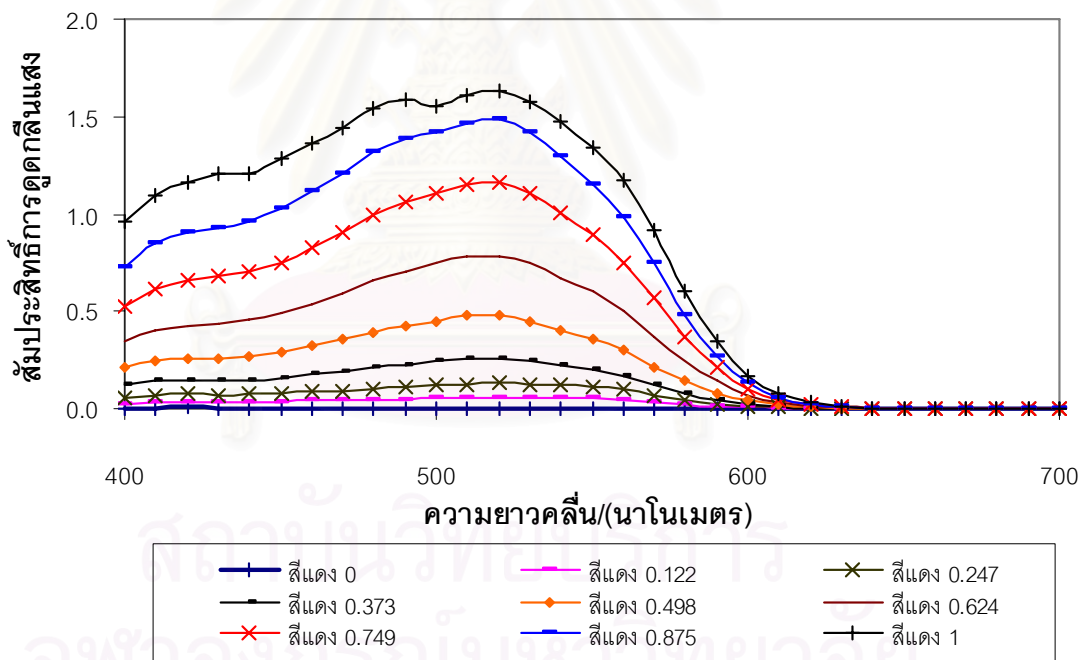
จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าสเปกตรัมของการสะท้อนแสงของแม่สีทั้งสามที่ความเข้มข้นของค่าสีเท่ากับ 1 บนกระดาษขาวและบนกระดาษดำ และค่าสเปกตรัมของการสะท้อนแสงของกระดาษพิมพ์ในบริเวณขาวและดำของวัสดุพิมพ์ พบว่าการสะท้อนแสงของสีแดงบนกระดาษขาวมีค่าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 - 700 นาโนเมตร และสีเขียวอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 - 600 นาโนเมตร สีน้ำเงินอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 - 500 นาโนเมตร แต่การสะท้อนแสงของแม่สีทั้งสามบนกระดาษดำนั้นมีค่าเท่า ๆ กันในทุกช่วงความยาวคลื่น และมีค่าใกล้เคียงกับการสะท้อนแสงของกระดาษดำที่ไม่มีการพิมพ์สีใดลงไป แสดงให้เห็นว่าหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทเป็นหมึกพิมพ์ที่โปร่งแสง จึงต้องมีการคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่บดแสง เพื่อให้การคำนวณหาความสัมพันธ์การดูดกลืนแสงด้วยสมการคูเบลคา-มังก์มีความถูกต้อง



รูปที่ 4.4 การสะท้อนแสงของกระดาษพิมพ์ในบริเวณสีขาว ($R_{g,w}$) และสีดำของวัสดุพิมพ์ ($R_{g,b}$) บริเวณของแม่สีบนกระดาษขาว (R_w) และบริเวณของแม่สีบนกระดาษดำ (R_b)

ผลของการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

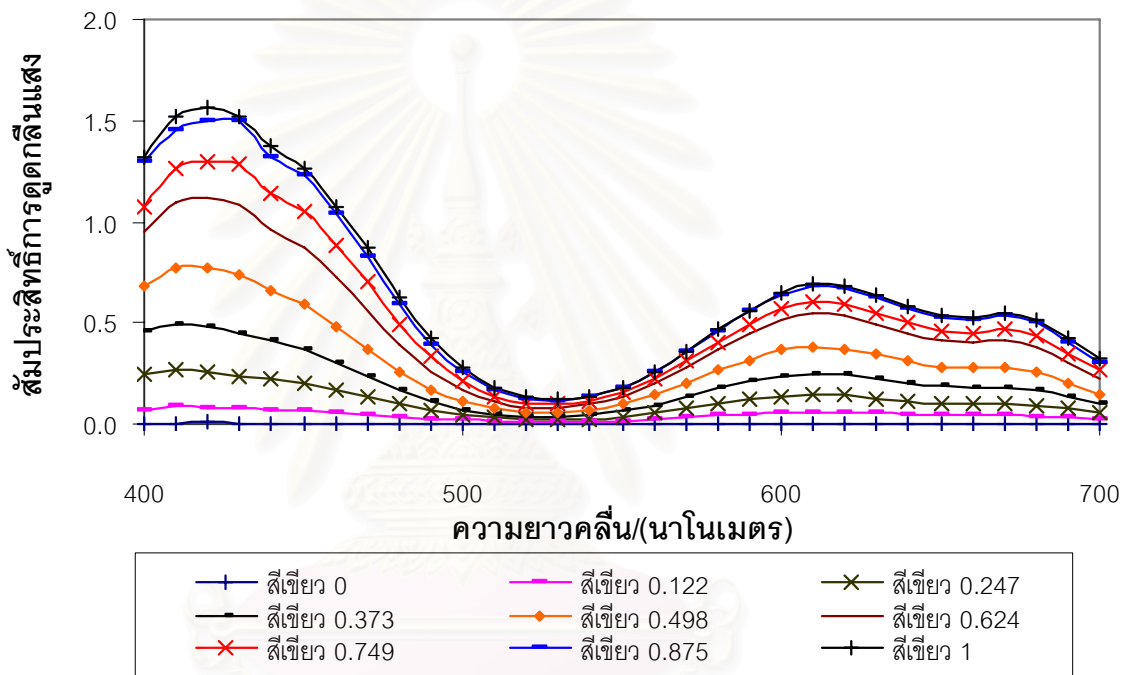
จากรูปที่ 4.5 พบว่าสีแดงมีการดูดกลืนแสงน้อยในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 - 700 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับในทุกระดับความเข้มข้นของค่าสี ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 - 600 นาโนเมตร มีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของค่าสีสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลค่าการสะท้อนแสงที่แสดงในรูปที่ 4.1 ในลักษณะผกผัน กล่าวคือ เมื่อมีการดูดกลืนแสงมากจะมีการสะท้อนแสงน้อย ดังจะเห็นได้จากสีแดงที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีเท่ากับ 1 มีการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 400 - 600 นาโนเมตร จะมีการสะท้อนแสงในช่วงนี้น้อย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จึงใช้เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของค่าสีกับค่าการสะท้อนแสงในสเปกตรัมได้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสีแดง

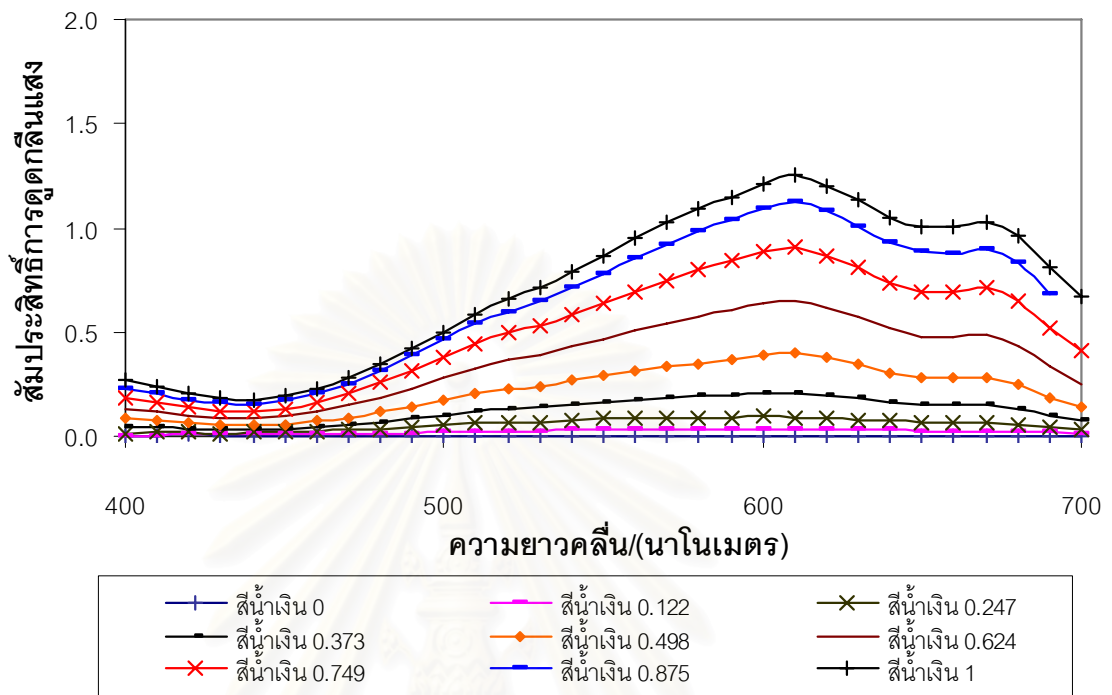
จากรูปที่ 4.6 พบว่าสีเขียวมีการดูดกลืนแสงน้อยในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 - 600 นาโนเมตร และมีค่าเท่า ๆ กันในทุกระดับความเข้มข้นของค่าสี ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 - 500 นาโนเมตร และในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 - 700 นาโนเมตร มีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของค่าสีสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลค่าการ

สะท้อนแสงที่แสดงในรูปที่ 4.2 ในลักษณะผกผัน กล่าวคือ เมื่อมีการดูดกลืนแสงมากจะมีการสะท้อนแสงน้อย ดังจะเห็นได้จากสีเขียวที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีเท่ากับ 1 และมีการดูดกลืนแสงน้อยที่สุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 - 600 นาโนเมตร จะมีการสะท้อนแสงในช่วงนี้มาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จึงใช้เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของค่าสีกับค่าการสะท้อนแสงในสเปกตรัมได้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสีเขียว

จากรูปที่ 4.7 พบว่าสีน้ำเงินมีการดูดกลืนแสงน้อยในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 - 500 นาโนเมตร มีค่าใกล้เคียงในทุกระดับความเข้มข้นของค่าสี ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 - 700 นาโนเมตร มีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของค่าสีสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลค่าการสะท้อนแสงที่แสดงในรูปที่ 4.3 ในลักษณะผกผัน กล่าวคือ เมื่อมีการดูดกลืนแสงมาก จะมีการการสะท้อนแสงน้อย ดังจะเห็นได้จากสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีเท่ากับ 1 มีการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 500 - 700 นาโนเมตร จะมีการสะท้อนแสงในช่วงนี้น้อย ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จึงใช้เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของค่าสีกับค่าการสะท้อนแสงในสเปกตรัมได้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของค่าสีน้ำเงิน

4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ

4.2.1 ผลการทดสอบการทำนายค่าสเปกตรัม

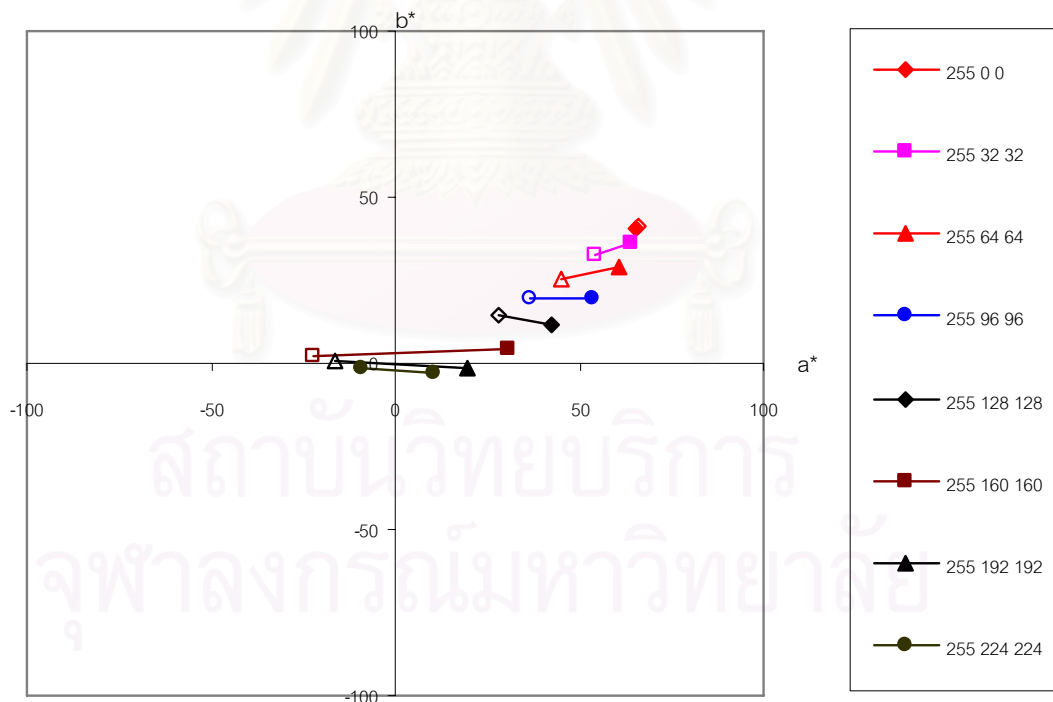
การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะที่สร้างขึ้นใช้ชุดตัวอย่างสีที่ประกอบด้วย ตัวอย่างสีทดสอบจำนวน 50 ตัวอย่างสี ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชุดตัวอย่างสี ได้แก่ 1.ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จำนวน 24 ตัวอย่างสี 2.ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale จำนวน 8 ตัวอย่างสี และ 3.ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี จากการทดสอบทั้ง 3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ ได้ผลการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังนี้

4.2.1.1 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง

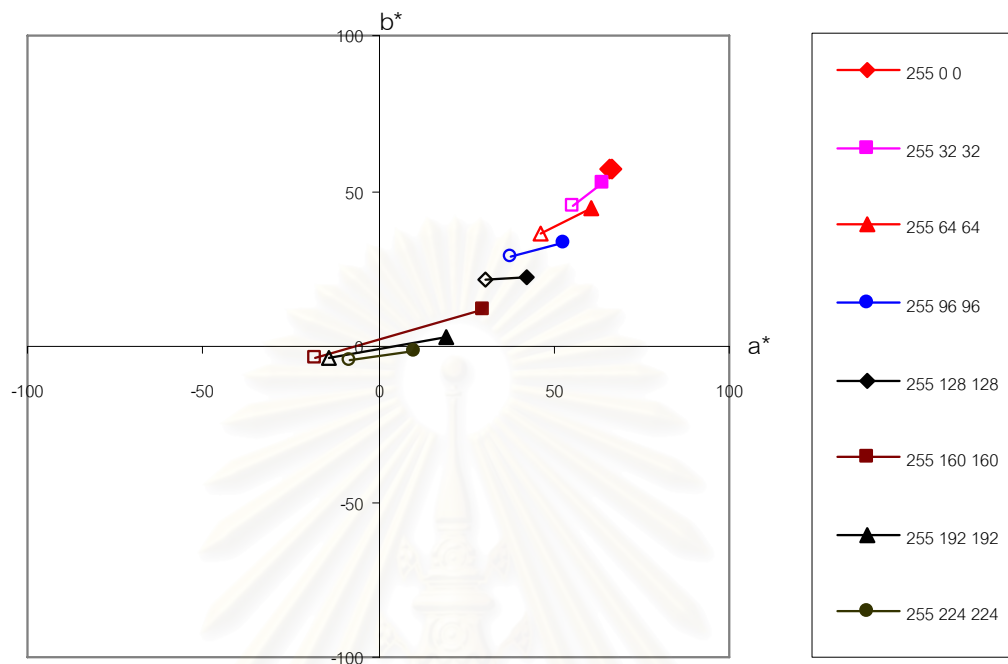
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 - 4.10 ตามลำดับ โดย

รูปสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีเริ่มต้น และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนายเส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดในการทำนายค่าสี

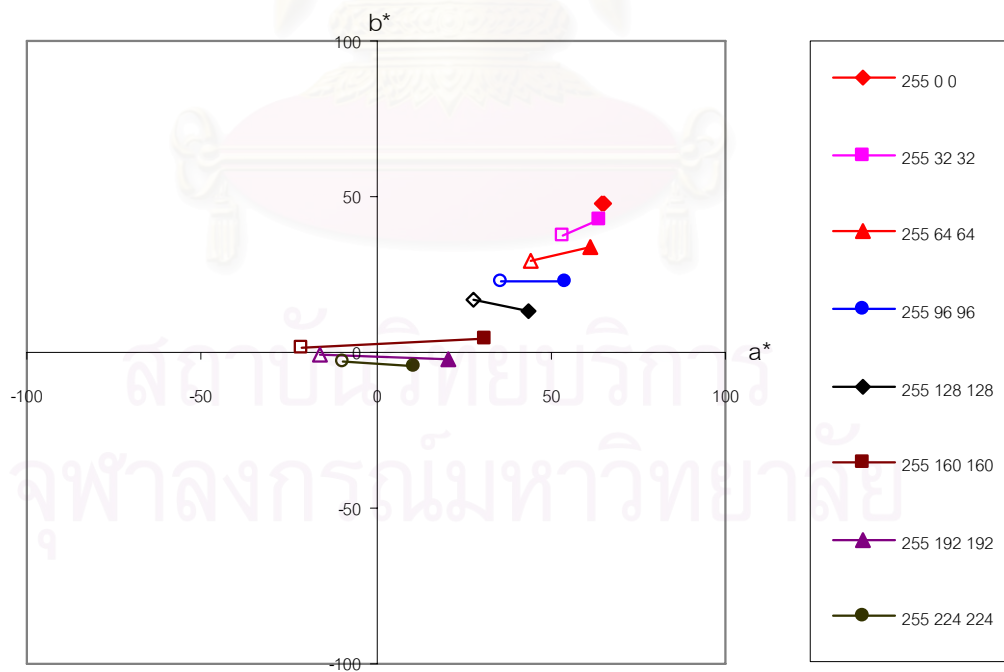
จากรูปที่ 4.8 - 4.10 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีแดงมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีแดงที่ระดับความอิ่มตัวสีแตกต่างกัน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง โดยภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A ค่าสี a^* b^* จะค่อนข้างไปทางแกน $+b^*$ มากกว่าภายใต้อีก 2 แหล่งกำเนิดแสง (นั่นคือมี hue-angle มากกว่า) แสดงว่าตัวอย่างสีเหล่านี้เมื่อมองภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A จะมีเฉดสีค่อนข้างไปทางสีเหลืองมากขึ้น และเมื่อพิจารณาทิศทางและขนาดความผิดพลาดของค่าที่ทำนาย พบว่าค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกัน คือ สีที่ทำนายได้จะมีความผิดพลาดไปในทิศทางของสีเหลือง และมีค่าความอิ่มตัวสีลดลง โดยในตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีสูงจะมีความผิดพลาดของความอิ่มตัวสีสูงกว่าตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีต่ำ แต่ในตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีต่ำนี้ จะมีความผิดพลาดของเฉดสีมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีสูงมีความผิดพลาดในการทำนายน้อยกว่าตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีต่ำ



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีแดง ในการทำนายค่าสเปกตรัม

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสี แดง	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	28.91	30.09	30.47	29.32
Mean	28.44	28.65	29.34	26.87
Minimum	0.60	0.66	0.43	0.49
Maximum	53.58	53.24	53.97	45.89
Standard deviation	16.97	16.78	17.14	14.43

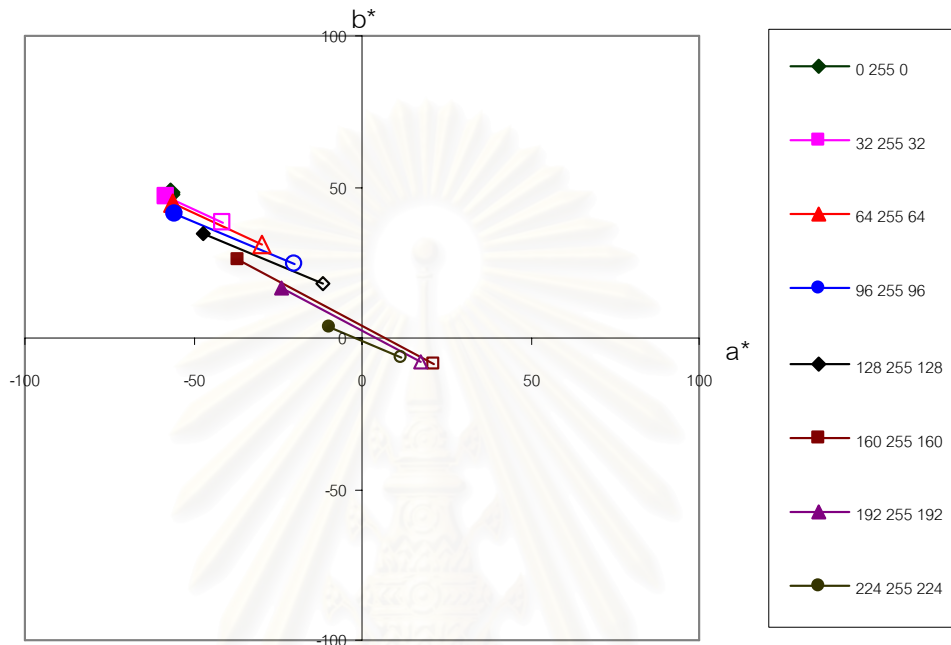
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median และค่า Mean แตกต่างกันเล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาค่า Standard deviation ถือได้ว่าค่าทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

4.2.1.2 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว

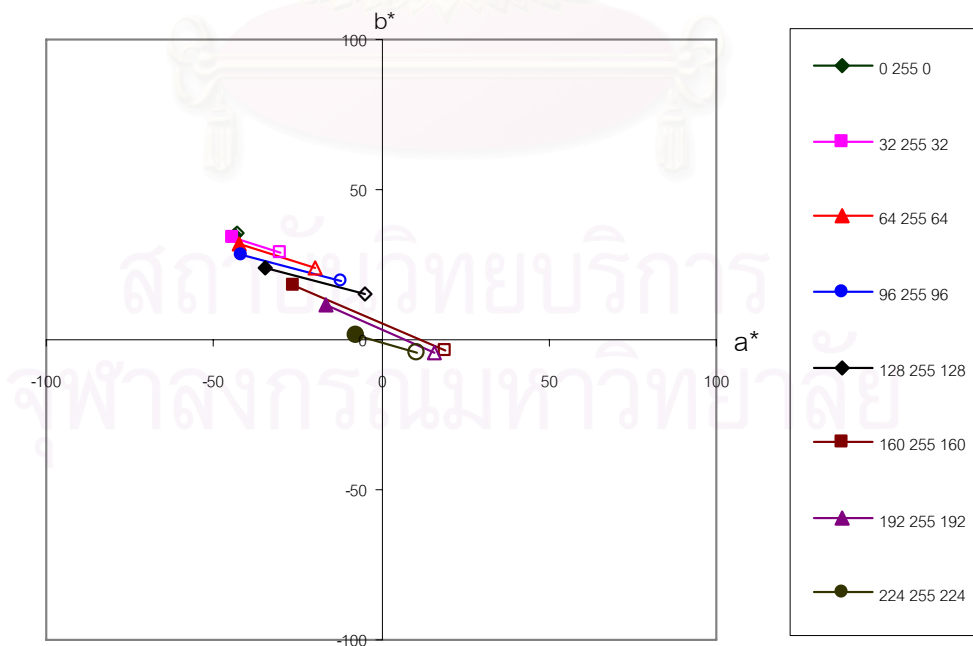
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียวจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.13 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย

จากรูปที่ 4.11 - 4.13 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีเขียวมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีเขียวที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ กัน โดยภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A ตัวอย่างสีจะปรากฏมีความอิ่มตัวสีต่ำกว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอื่น เมื่อพิจารณาทิศทางความผิดพลาดของค่าสีที่ทำนาย พบว่าค่าสีที่ทำนายมีแนวโน้มมีค่าความอิ่มตัวสีน้อยกว่าสี

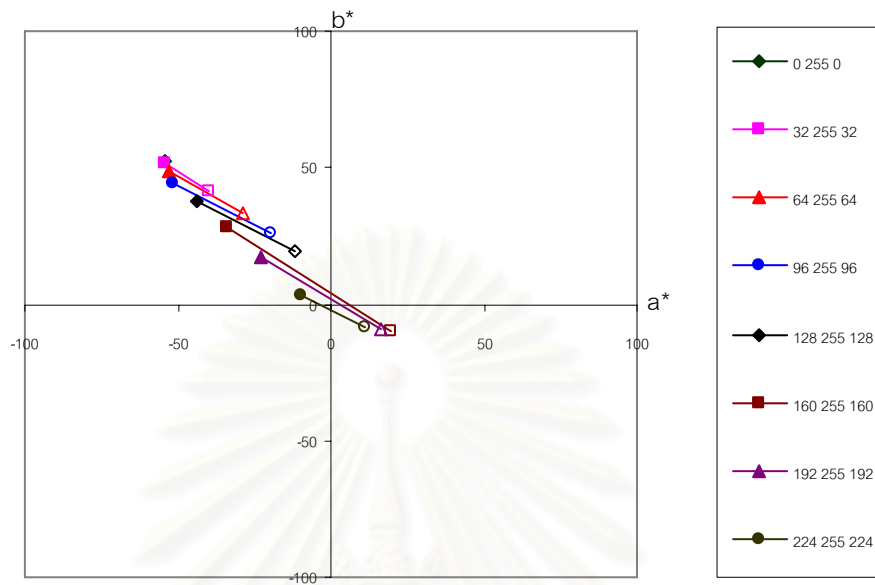
ตัวอย่าง โดยยังคงเป็นเฉดสีเดิมยกเว้นตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีต่ำ ยิ่งสีตัวอย่างมีความอิ่มตัวสีมาก อัตราความผิดพลาดของค่าความอิ่มตัวสีจะน้อยกว่าเมื่อตัวอย่างสีมีความอิ่มตัวสีน้อย



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีเขียว ในการทำนายค่าสเปกตรัม

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของ สีเขียว	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	42.27	34.66	40.84	19.67
Mean	38.97	31.47	38.01	18.02
Minimum	0.36	0.39	0.35	0.12
Maximum	71.25	53.70	69.97	31.62
Standard deviation	22.57	17.79	22.13	9.97

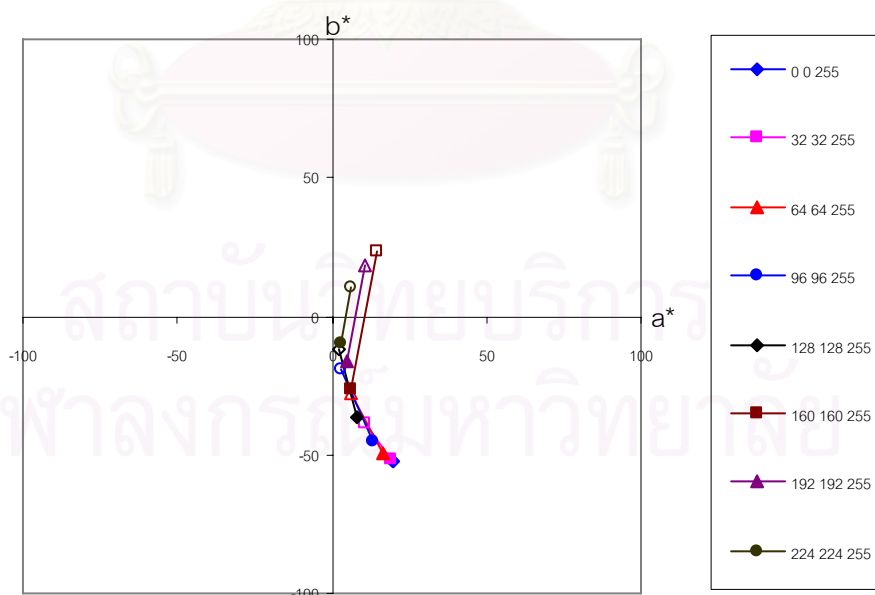
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 22.57, 17.79 และ 22.13 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median

และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน จากผลการทดลองแสดงว่าความผิดพลาดในการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียง ไม่มีผลให้เกิดเมแทเมอริซึม

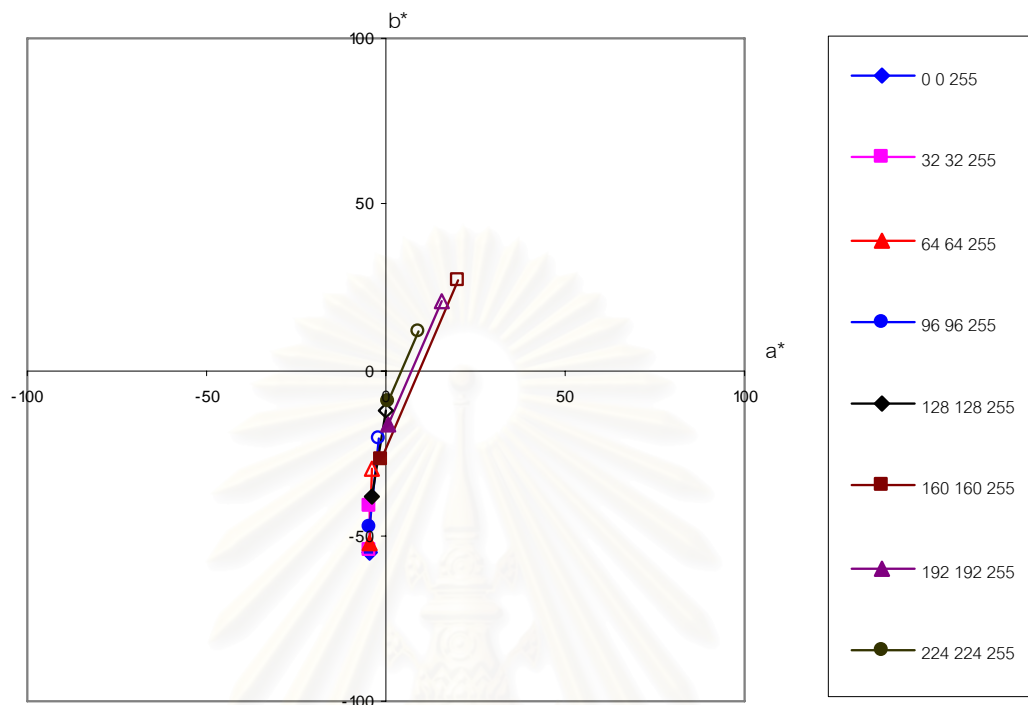
4.2.1.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงินจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.14 - 4.16 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บ่งแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย

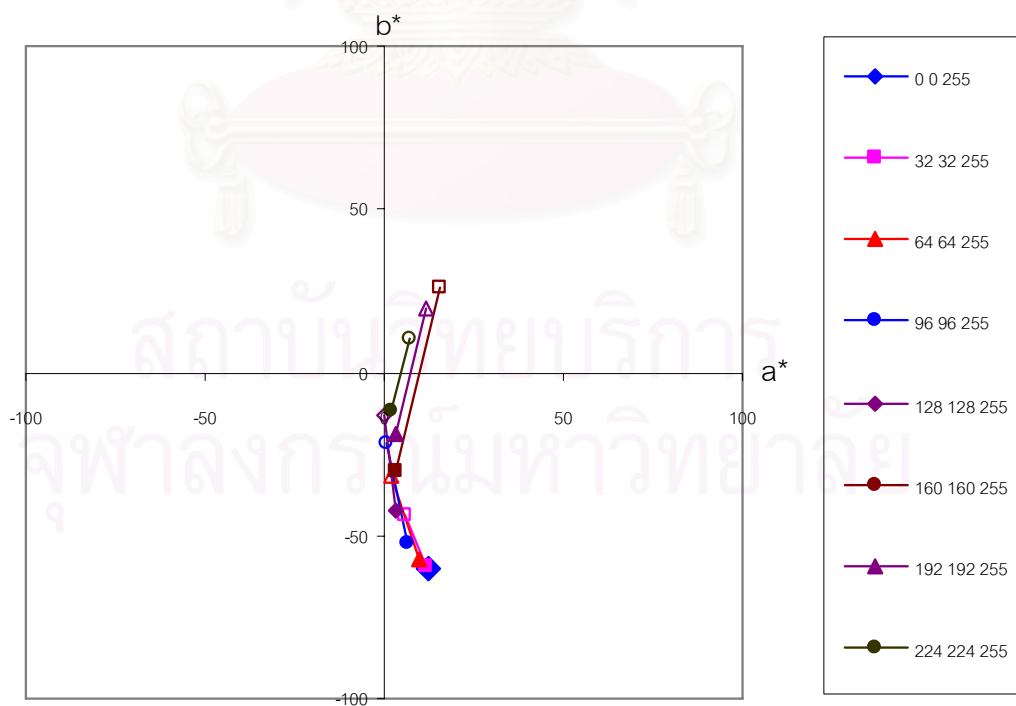
จากรูปที่ 4.14 - 4.16 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีน้ำเงินมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีน้ำเงินที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ กัน โดยภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 และ F11 ตัวอย่างสีจะปรากฏสีค่อนข้างไปทางเฉดสีม่วงน้ำเงิน ส่วนตัวอย่างสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A จะปรากฏสีค่อนข้างไปทางเฉดสีไซแอน เมื่อพิจารณาความผิดพลาดของการทำนายค่าสี พบว่าสีที่ทำนายได้มีความอิ่มตัวน้อยกว่าสีตัวอย่าง และที่ความอิ่มตัวสีต่ำ ๆ จะเบี่ยงเบนไปในทางของเฉดสีแดง ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีน้ำเงิน ในการทำนายค่าสเปกตรัม

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสี น้ำเงิน	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	32.45	30.95	34.27	24.44
Mean	29.82	30.62	32.09	22.16
Minimum	0.38	0.34	0.36	0.27
Maximum	51.55	58.29	58.31	38.71
Standard deviation	16.73	18.32	18.29	12.63

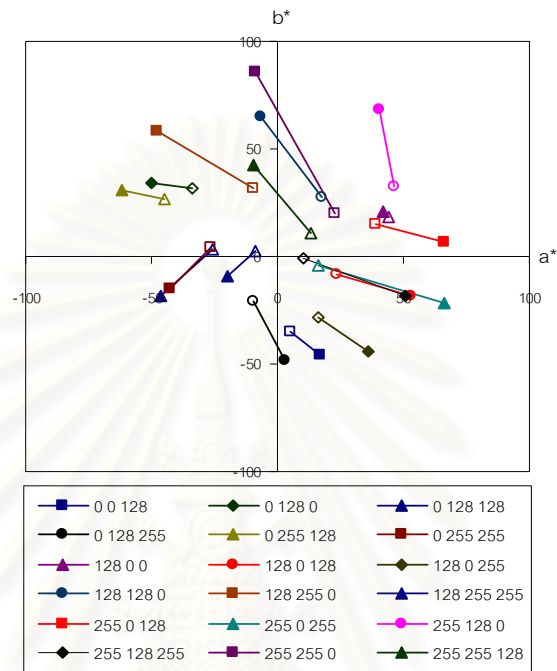
จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 16.73, 18.32 และ 18.29 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 24.44 และค่า Mean เท่ากับ 22.16 แสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

4.2.1.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม

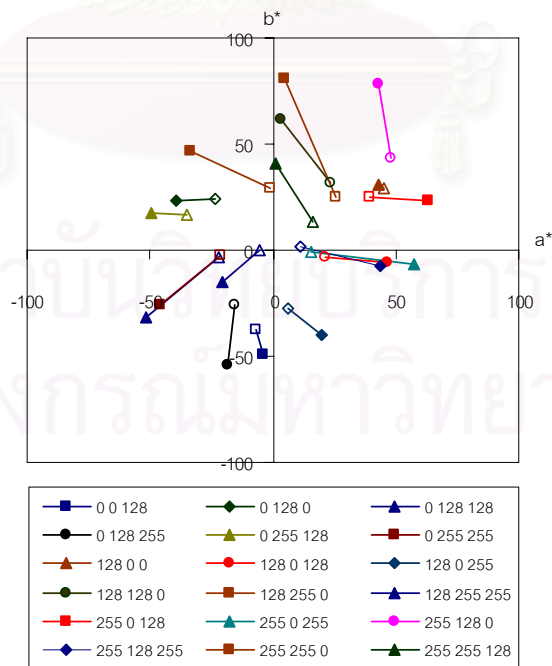
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 - 4.19 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย

จากรูปที่ 4.17 - 4.19 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีผสมมีการกระจายตัวครอบคลุมทุกเฉดสี โดยเฉดสีที่ปรากฏภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันของตัวอย่างสีมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีมีทิศทางไปในทางที่มีความอิ่มตัวสีต่ำลงในทุกเฉดสี ความผิดพลาดในการทำนายเฉดสีพบมากที่สุดใ

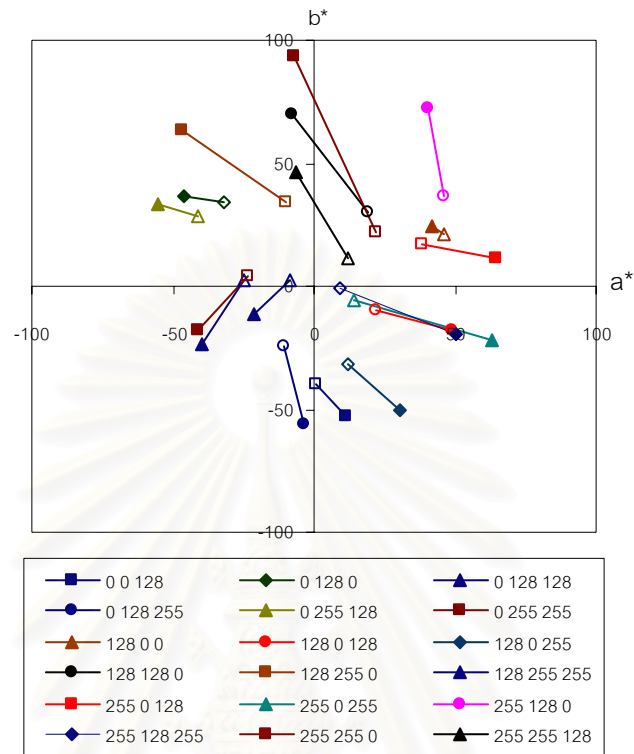
ตัวอย่างสีเหลือง ค่าสีที่ทำนายได้จะมีเฉดสีไปทางสีแดง ในขณะที่ตัวอย่างสีอื่น ๆ จะมีการเบี่ยงเบนของเฉดสีเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีผสม ในการทำนายค่าสเปกตรัม

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	42.20	39.86	43.35	31.24
Mean	46.92	44.36	47.53	32.09
Minimum	23.72	20.99	22.08	7.14
Maximum	94.45	84.07	98.39	65.49
Standard deviation	19.34	17.61	20.25	18.25

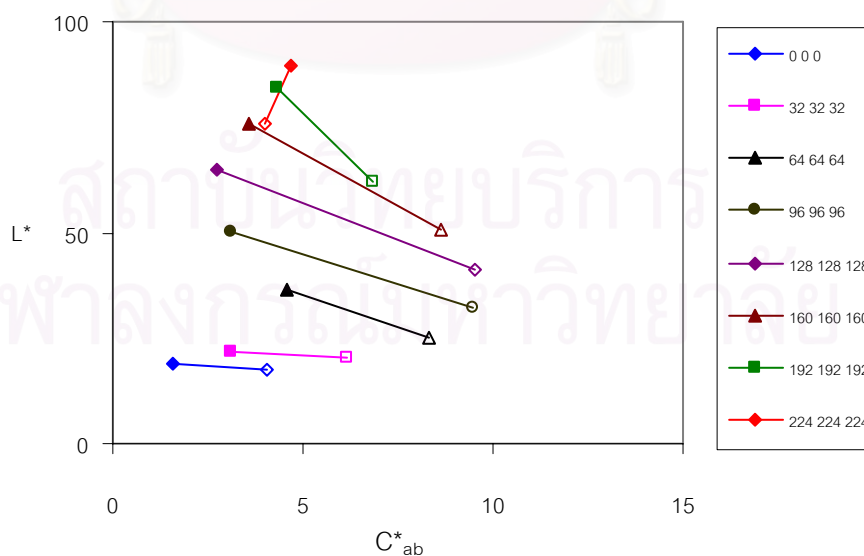
จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง

D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 19.34, 17.61 และ 20.25 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 31.24 และค่า Mean เท่ากับ 32.09 จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดของการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันในทุกแหล่งกำเนิดแสง จึงมีแนวโน้มในการเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสงต่ำ

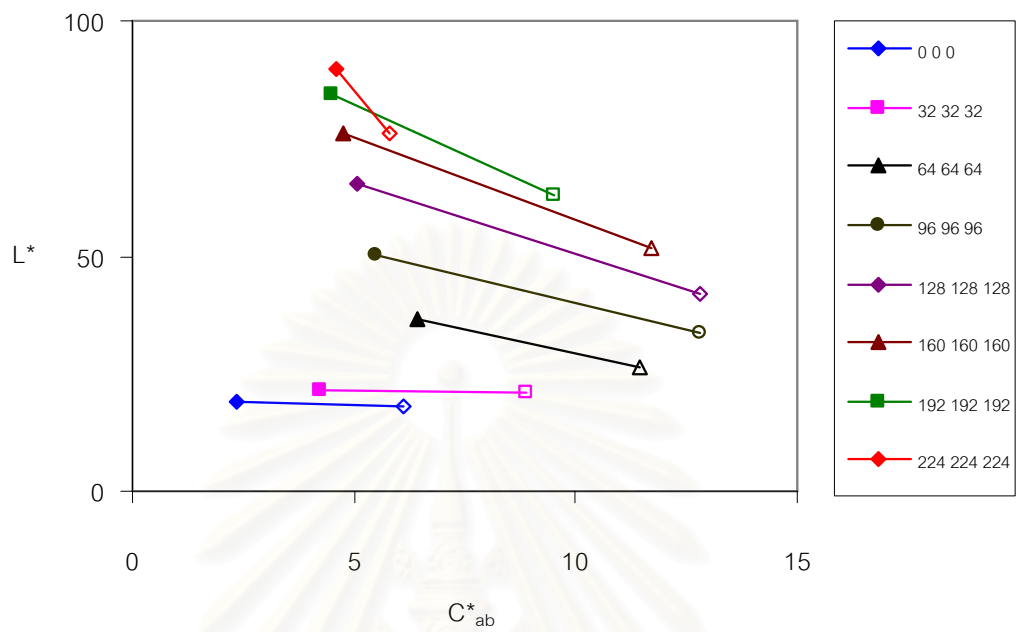
4.2.1.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale จำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่า L^* กับ C^*_{ab} ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 - 4.22 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บ่งชี้ค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีที่แสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย

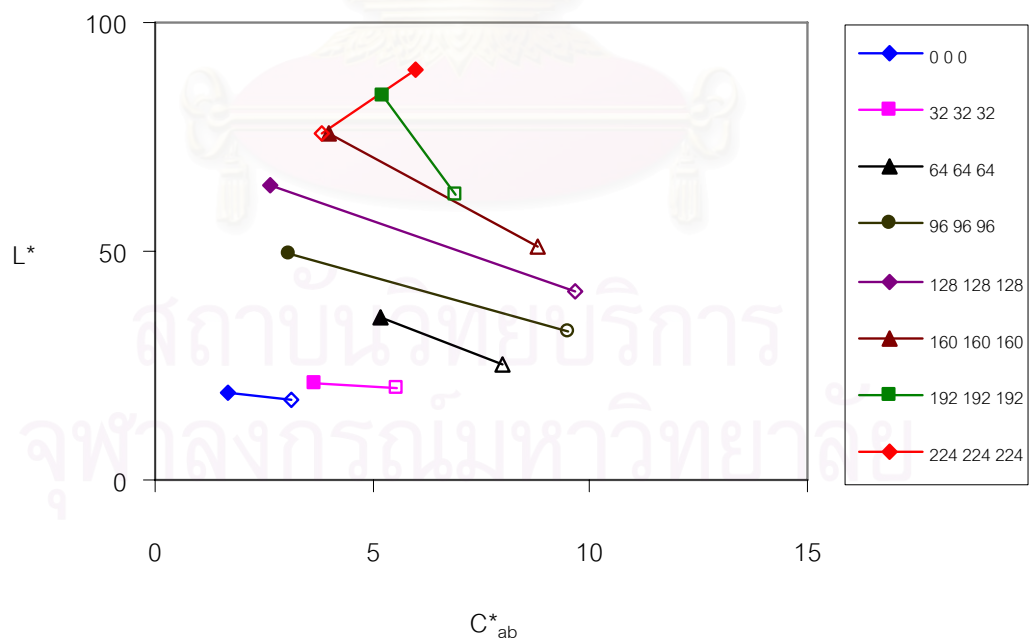
จากรูปที่ 4.20 - 4.22 พบว่า การกระจายตัวของสีเทาตัวอย่างครอบคลุมระดับความสว่าง (L^*) ต่าง ๆ โดยทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสงค่า C^*_{ab} ของสีเทาไม่ได้มีค่าอยู่ที่ศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของสีของแหล่งกำเนิดแสง ทำให้ตัวอย่างสีมีสีส้มเล็กน้อย อย่างไรก็ตามตัวอย่างสีมีค่า C^*_{ab} ที่ต่ำมาก จึงไม่มีผลต่อความผิดพลาดของสมมูลสีเทา จากการพิจารณาความผิดพลาดของการทำนายภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง พบว่าสีที่ทำนายได้ยังคงรักษาระดับความสว่างได้ใกล้เคียงกับสีต้นฉบับ แต่มีความเป็นสีมากขึ้น



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของ Gray scale ในการทำนายค่าสเปกตรัม

ชุดตัวอย่างสีทดสอบ	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Gray scale				
Median	17.33	17.40	17.26	17.88
Mean	16.97	17.39	16.90	17.00
Minimum	4.01	4.97	4.00	0.55
Maximum	26.21	26.09	26.20	34.83
Standard deviation	8.08	7.48	8.04	13.83

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 8.08, 7.48 และ 8.04 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 17.88 และค่า Mean เท่ากับ 17.00 จากผลการทดลองพบว่าความผิดพลาดจากการทำนายไม่แตกต่างกันมากภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

4.2.1.6 ผลการทดสอบรวมทุกชุดตัวอย่างสี

จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณข้างต้น เมื่อนำผลของทุกชุดตัวอย่างสีมาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายค่าสเปกตรัมของแบบจำลองลักษณะเฉพาะด้วยค่าเฉลี่ยความแตกต่างสีแยกตามชุดตัวอย่างสีที่แตกต่างกัน 3 ชุดตัวอย่างสี ผลของค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 ชุดตัวอย่างสี แสดงดังตารางที่ 4.6

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ของสีผสมมีค่ามากที่สุด ตามด้วยค่า ΔE_{ab}^* ของชุดตัวอย่างสี training set และ Gray scale ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองลักษณะเฉพาะนี้ให้ความผิดพลาดในการทำนายค่าสเปกตรัมของสีผสมสูงสุด และให้ความผิดพลาดในการแปลงค่าข้อมูลสีของสีเทาไปเป็นค่าสเปกตรัมได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า ΔE_{ab}^* เฉลี่ยของทุกตัวอย่างสี

พบว่ามีความผิดพลาดสูงมาก ทำให้เกิดการแปลงค่าสีผิดเพี้ยนไปเป็นคนละสีได้ความผิดพลาดนี้อาจเกิดเนื่องมาจากการใช้ฐานข้อมูลสี RGB ซึ่งเป็นระบบการผสมสีแบบบวก ในการทำนายค่าสเปกตรัมโดยผ่านทางความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการคูเบลคา-มังก์มีพื้นฐานมาจากการผสมสีแบบลบ ทำให้เมื่อทำนายค่าสีของสีผสม จึงมีความผิดพลาดสูง เพราะการผสมกันของสีที่มีความเข้มข้นของค่าสีมากในการผสมสีแบบบวก ทำให้ได้สีผสมที่มีความสว่างมาก ในขณะที่ในการผสมสีแบบลบจะได้สีที่มีค่าสว่างสีน้อย

ตารางที่ 4.6 ค่า ΔE_{ab}^* ของชุดตัวอย่างสีทดสอบ ในการทำนายค่าสเปกตรัม

แหล่งกำเนิดแสง	สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (24 ตัวอย่างสี)	สีผสม (18 ตัวอย่างสี)	สีเทา (8 ตัวอย่างสี)	ค่าเฉลี่ย (50 ตัวอย่างสี)
D65	32.41	46.92	16.97	35.17
A	30.25	44.36	17.39	33.27
F11	33.15	47.53	16.90	35.72

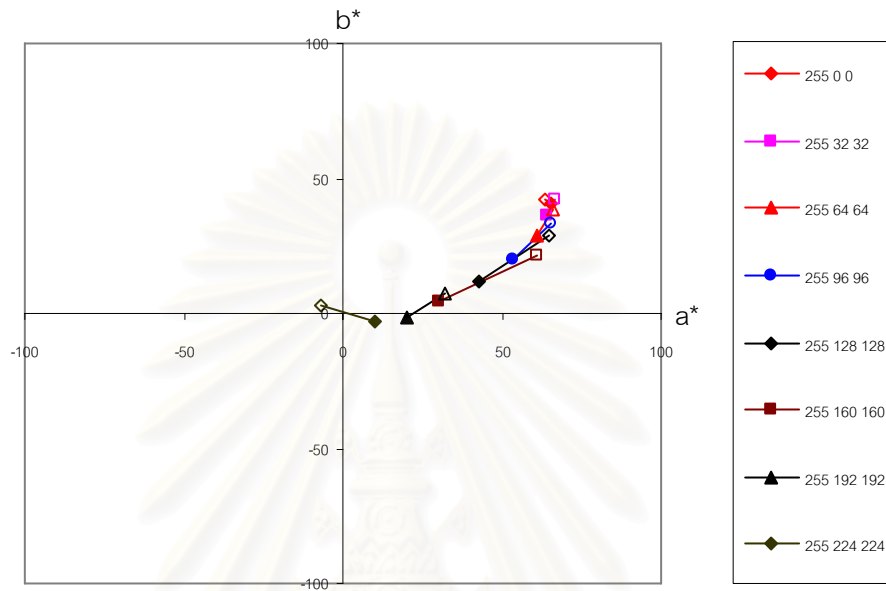
4.2.2 ผลการทดสอบการทำนายค่าสี RGB

เนื่องด้วยระหว่างทำการทดลองได้มีการเปลี่ยนชุดหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่ง (ชุดหมึกพิมพ์ที่สร้างฐานข้อมูลหาแบบจำลองลักษณะเฉพาะ) เป็นชุดหมึกพิมพ์ใหม่ทั้งหมดแปดสี เรียกว่า หมึกพิมพ์ชุดที่สอง เนื่องจากหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งมีไม่เพียงพอในการพิมพ์ชุดตัวอย่างสีทดสอบทั้งหมด จึงได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบถึงความต่างระหว่างหมึกพิมพ์ทั้งสองชุด ซึ่งจะแสดงผลการเปรียบเทียบในหัวข้อ 4.3 ต่อไป โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทำนายค่าสี RGB ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง จากสมมติฐานว่าหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเป็นหมึกพิมพ์ที่มาจากผู้ผลิตเดียวกัน มีเลขรหัสเหมือนกัน

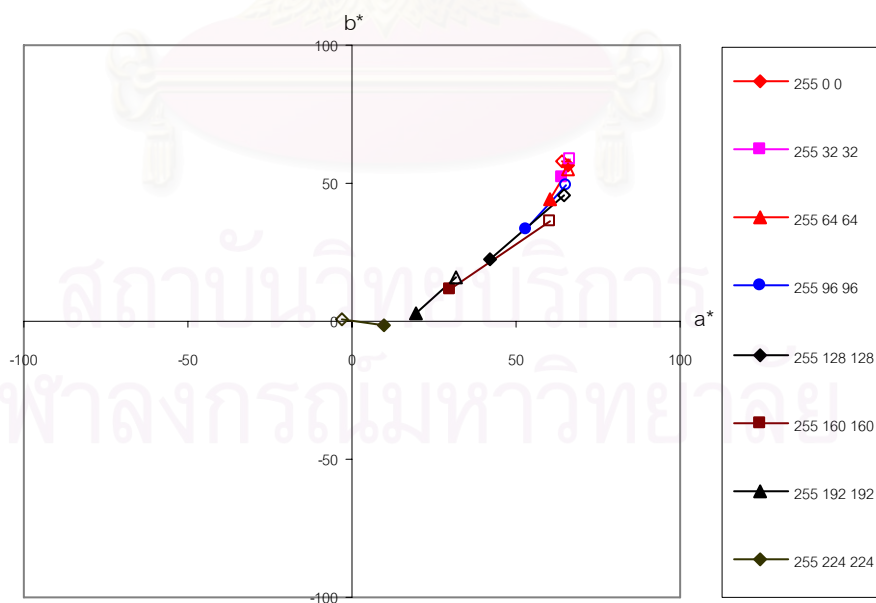
4.2.2.1 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 - 4.25 ตามลำดับ

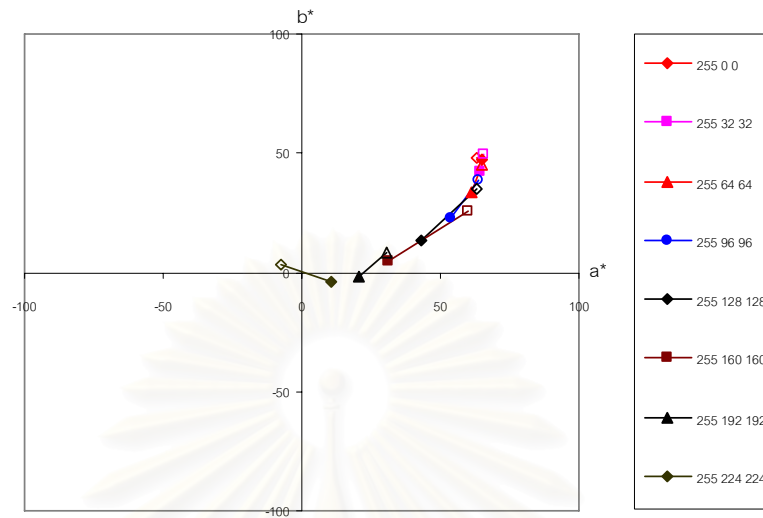
โดยรูปสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีเริ่มต้น และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนายเส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดในการทำนายค่าสี



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดงที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง
ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

จากรูปที่ 4.23 - 4.25 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีแดงมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีแดงที่ระดับความอิ่มตัวสีแตกต่างกัน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสง เมื่อพิจารณาทิศทางและขนาดความผิดพลาดของค่าที่ทำนาย พบว่าค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่งให้ผลที่มีแนวโน้มเดียวกัน คือ สีที่ได้จากการทำนายจะมีค่าความอิ่มตัวสีน้อยกว่าตัวอย่างสีต้นฉบับ โดยยังคงมีเฉดสีเหมือนเดิม

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.7

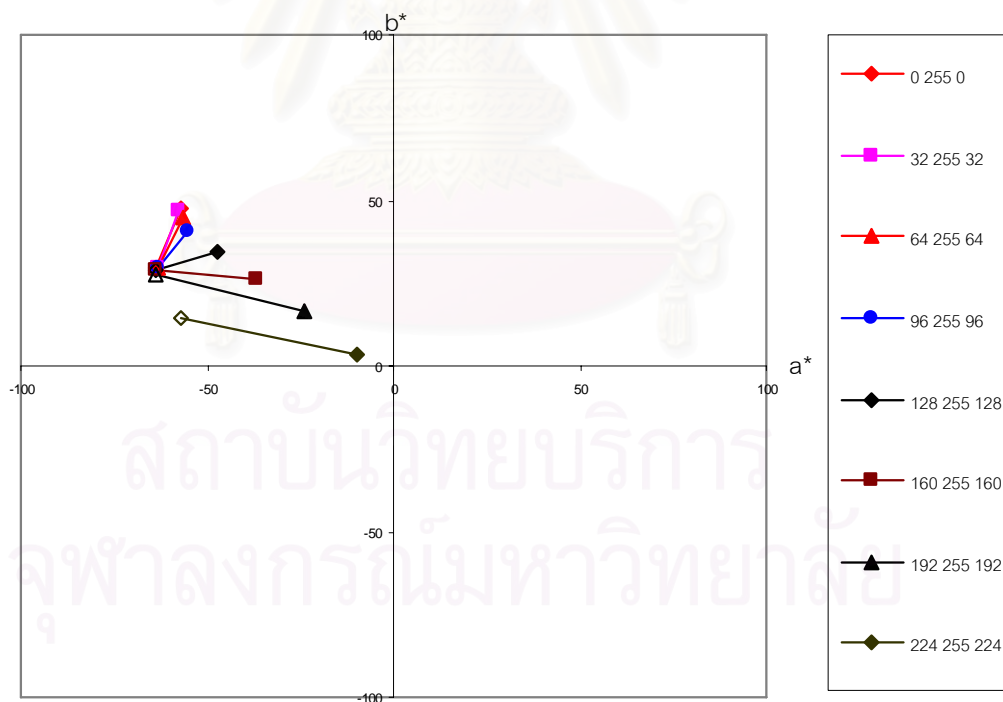
ตารางที่ 4.7 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีแดง ในการทำนายค่าสี RGB

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	30.15	31.17	29.80	17.61
Mean	26.64	26.94	26.50	23.29
Minimum	2.52	2.79	2.45	2.54
Maximum	47.58	48.13	46.33	57.78
Standard deviation	17.35	17.24	17.10	20.79

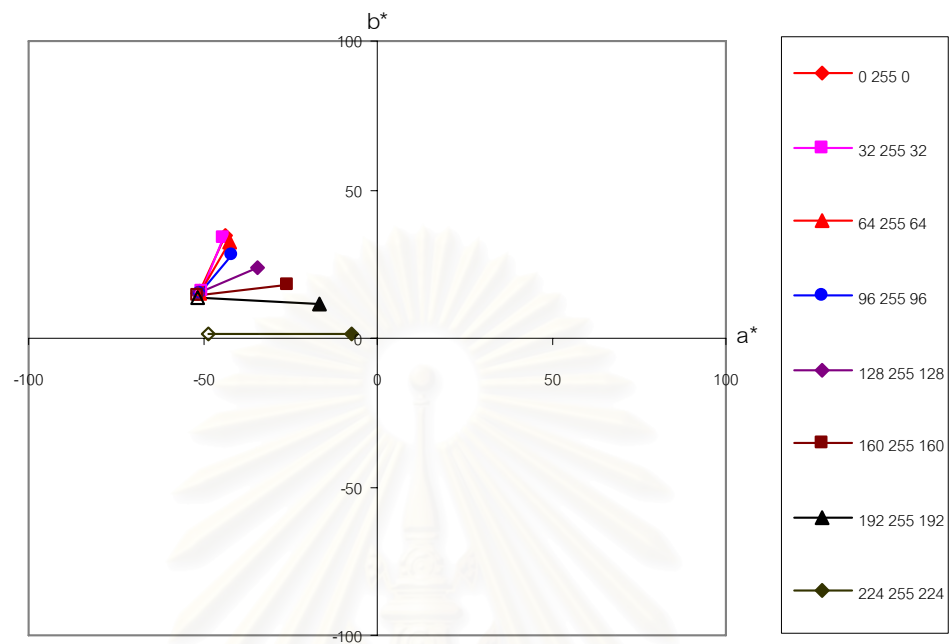
จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation เท่ากับ 17.35, 17.24 และ 17.10 ตามลำดับ พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 17.61 และค่า Mean เท่ากับ 23.29 แสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอร์ซีมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

4.2.2.2 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียวจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

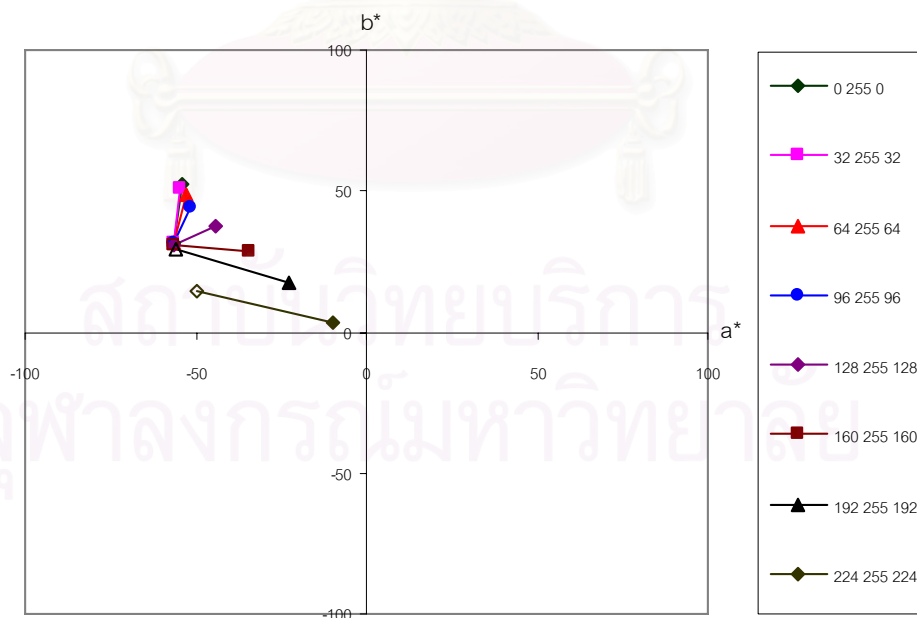
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียวจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 - 4.28 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย



รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียวที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว
ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว
ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

จากรูปที่ 4.26 - 4.28 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีเขียวมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีเขียวที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ กัน โดยภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A ตัวอย่างสีจะปรากฏมีความอิ่มตัวสีต่ำกว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอื่น เมื่อพิจารณาทิศทางความผิดพลาดของค่าสีที่ทำนาย พบว่าค่าสีที่ทำนายมีแนวโน้มได้ค่าสีใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเป็นสีเขียวที่ระดับความเข้มข้นของค่าสีเท่าใดก็ตาม

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณ ของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีเขียว ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีเขียว ในทำนายค่าสี RGB

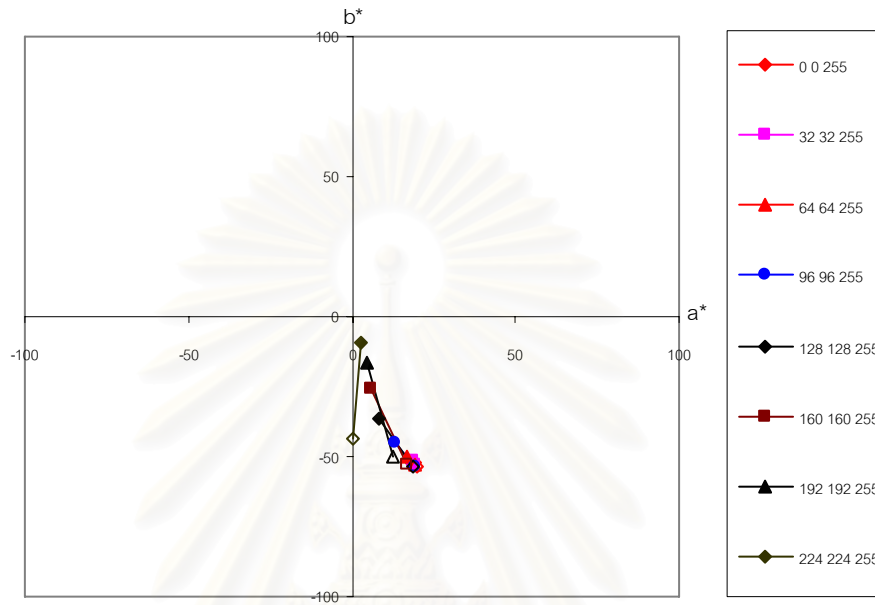
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสี เขียว	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	20.02	21.93	20.11	10.50
Mean	28.60	28.84	27.36	19.06
Minimum	14.88	17.04	15.27	5.22
Maximum	58.60	54.98	54.16	53.51
Standard deviation	16.33	13.93	14.06	18.10

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 16.33, 13.93 และ 14.06 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 10.50 และค่า Mean เท่ากับ 19.06 จากผลการทดลองแสดงว่าความผิดพลาดในการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันมีค่าใกล้เคียง ไม่มีผลให้เกิดเมแทเมอริซึม

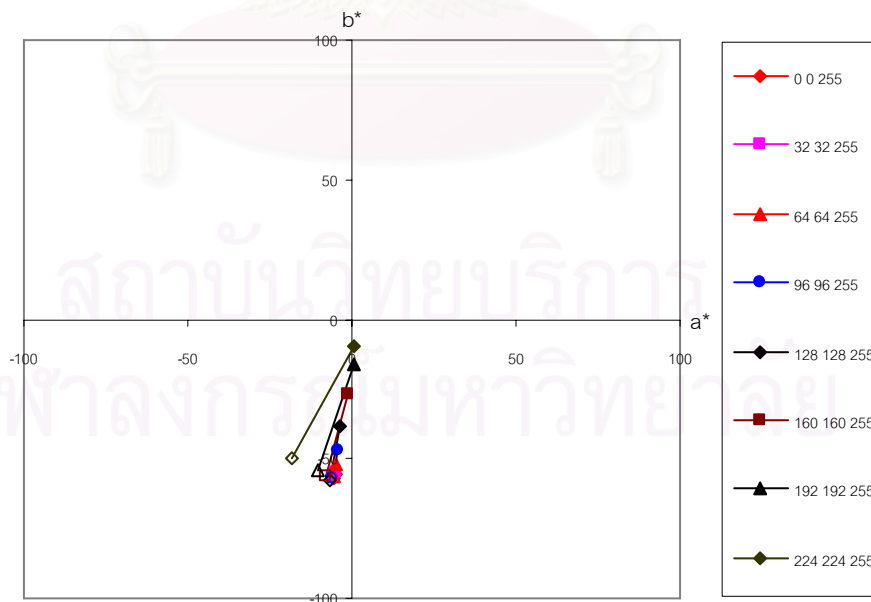
4.2.2.3 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงินจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงินจำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 - 4.31ตามลำดับ

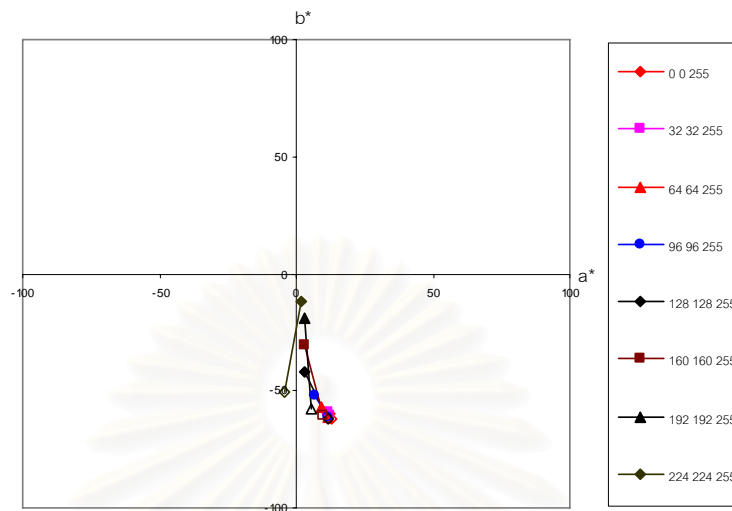
โดยสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่าง
คู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน
ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน
ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

จากรูปที่ 4.29 - 4.31 พบว่า a^* b^* ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีน้ำเงินมีการกระจายตัวอยู่ในบริเวณขอบเขตสีน้ำเงินที่ระดับความอิ่มตัวต่าง ๆ กัน โดยภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A ตัวอย่างสีจะปรากฏสีค่อนข้างไปทางเฉดสีเขียวอ่อน เมื่อพิจารณาความผิดพลาดของการทำนายค่าสี พบว่ามีความผิดพลาดน้อยมากทั้งความอิ่มตัวสีและเฉดสี

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 ตามลำดับ พิจารณาจากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.9

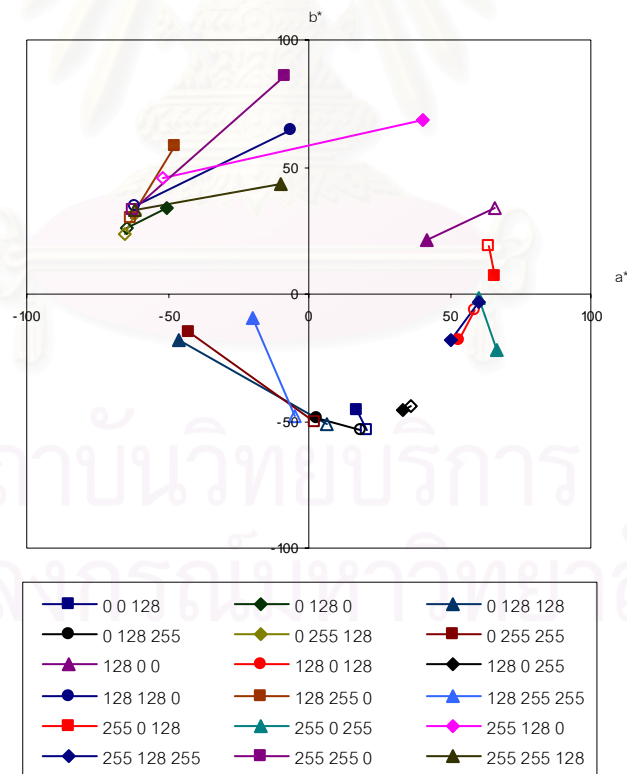
ตารางที่ 4.9 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของสีน้ำเงิน ในทำนายค่าสี RGB

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีน้ำเงิน	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	25.96	26.85	27.01	19.59
Mean	27.83	30.54	29.68	24.39
Minimum	2.09	2.73	2.35	0.75
Maximum	55.95	65.47	61.19	58.57
Standard deviation	22.38	25.17	24.19	22.13

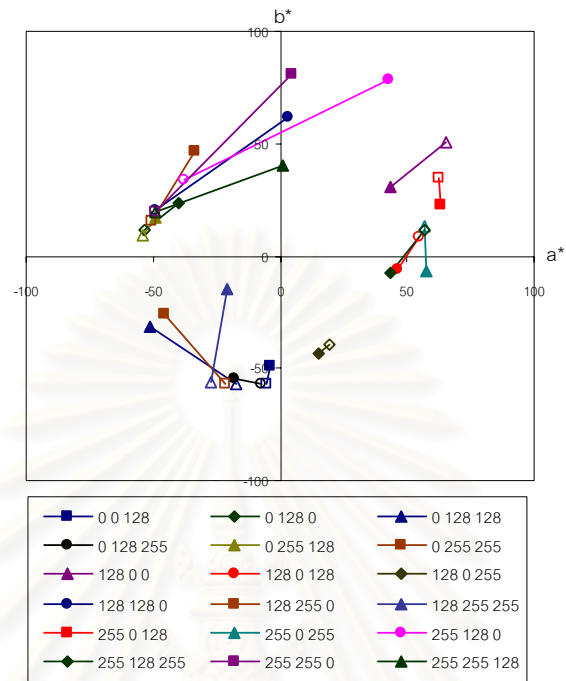
จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่า $\Delta E'_{ab}$ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 22.38, 25.17 และ 24.19 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 19.59 และค่า Mean เท่ากับ 24.39 แสดงให้เห็นว่า ความผิดพลาดของการทำนายค่าสี ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน มีค่าใกล้เคียงกันมากและไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอริซึม เนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

4.2.2.4 ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจากหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

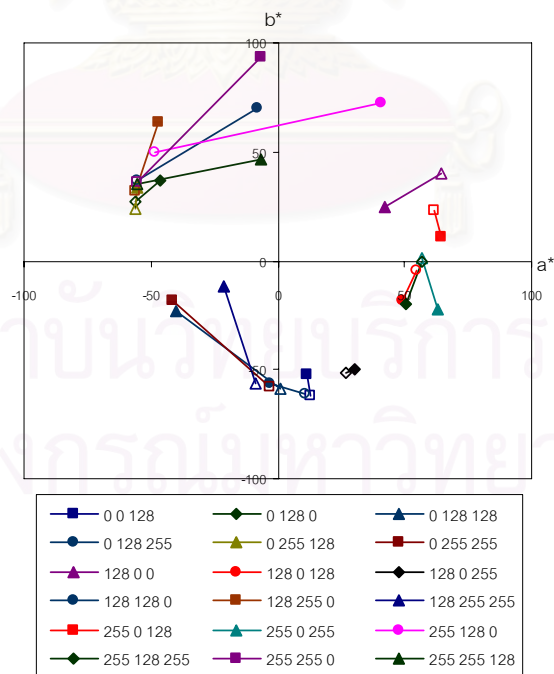
ชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่าสี a^* b^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.32 - 4.34 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บ่งแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรงเชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย



รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของชุดทดสอบตัวอย่างสีของสีผสม ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.33 การกระจายตัวของชุดทดสอบตัวอย่างสีของสีผสม
ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของชุดทดสอบตัวอย่างสีของสีผสม
ที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

จากรูปที่ 4.32 - 4.34 พบว่า $a^* b^*$ ของชุดตัวอย่างทดสอบของสีผสมมีการกระจายตัวครอบคลุมทุกเฉดสี โดยเฉดสีที่ปรากฏภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันของตัวอย่างสีมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีมีทิศทางการเบี่ยงเบนของเฉดสีไปต่าง ๆ กันขึ้นกับสีตัวอย่างตั้งต้น โดยตัวอย่างเฉดสีเหลืองจะทำนายเป็นเฉดสีเขียว ตัวอย่างสีเขียวจะทำนายเป็นเฉดสีน้ำเงิน ตัวอย่างเฉดสีน้ำเงินและสีแดงมีผลการทำนายเฉดสีได้ใกล้เคียงต้นฉบับ

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสม ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 จากค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่า ΔE_{ab}^* และค่า RMS ของชุดตัวอย่างสีผสม ในการทำนายค่าสี RGB

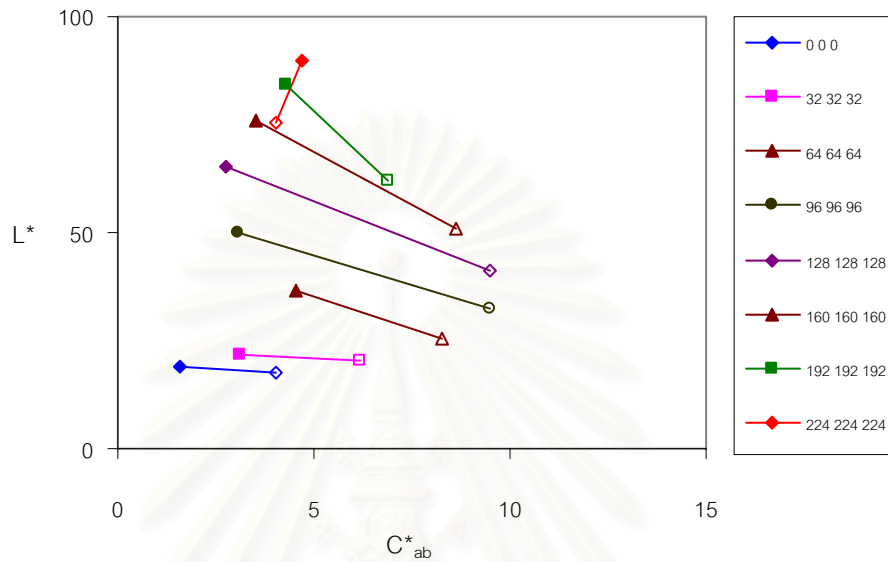
ชุดตัวอย่างทดสอบ สีผสม	ΔE_{ab}^*			RMS
	D65	A	F11	
Median	31.00	34.43	32.12	15.03
Mean	38.85	38.31	38.53	21.66
Minimum	8.63	10.26	9.13	5.73
Maximum	94.86	93.33	92.43	52.31
Standard deviation	26.57	26.42	25.67	15.90

จากตารางที่ 4.10 พบว่าค่า ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 26.57, 26.42 และ 25.67 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 15.03 และค่า Mean เท่ากับ 21.66 จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดของการทำนายมีค่าใกล้เคียงกันในทุกแหล่งกำเนิดแสง จึงมีแนวโน้มในการเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสงต่ำ

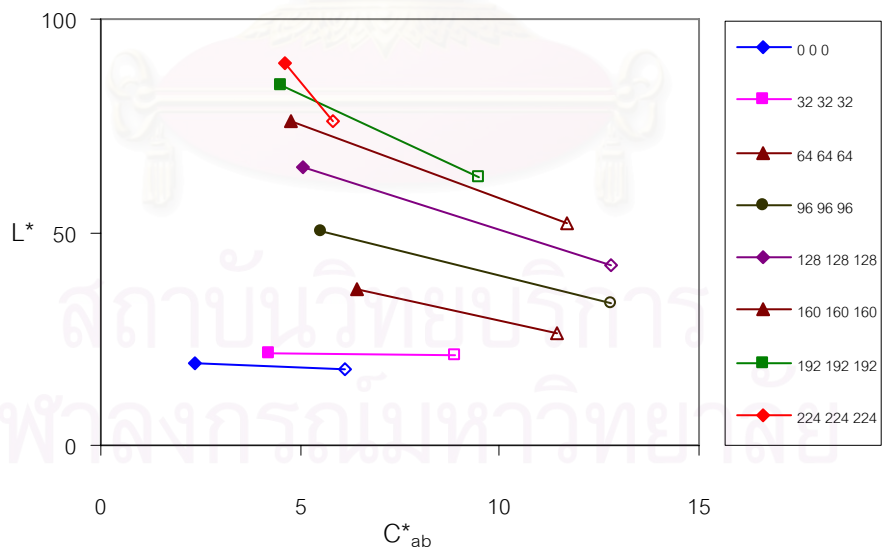
4.2.2.5 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale ของหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

ชุดตัวอย่างสีทดสอบของ Gray scale จำนวน 8 ตัวอย่างสี มีการกระจายตัวของค่า L^* กับ C_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65, A และ F11 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 - 4.37

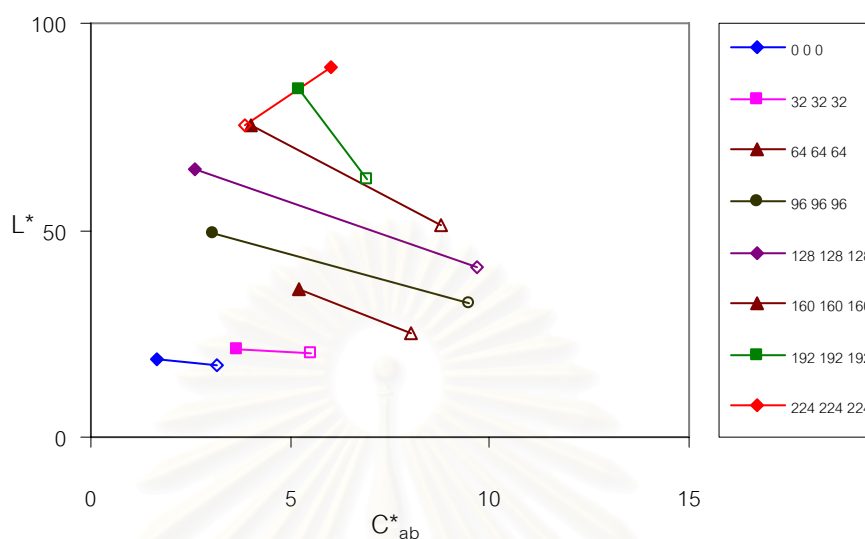
ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ที่บแสดงค่าสีตัวอย่าง และสัญลักษณ์โปร่งแสดงค่าสีทำนาย เส้นตรง
เชื่อมระหว่างคู่สีแสดงทิศทางและขนาดความผิดพลาดของการทำนาย



รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale
ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65



รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale
ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A



รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของชุดตัวอย่างสีทดสอบ Gray scale ที่พิมพ์ด้วยหมึกชุดที่สอง ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง F11

จากรูปที่ 4.35 - 4.37 พบว่า การกระจายตัวของสีเทาตัวอย่างครอบคลุมระดับความสว่าง (L^*) ต่าง ๆ โดยทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสงค่า C^*_{ab} ของสีเทาไม่ได้มีค่าอยู่ที่ศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของสีของแหล่งกำเนิดแสง ทำให้ตัวอย่างสีมีสีสันทึกลงน้อย อย่างไรก็ตามตัวอย่างสีมีค่า C^*_{ab} ที่ต่ำมาก จึงไม่มีผลต่อความผิดพลาดของสมมูลสีเทา จากการพิจารณาความผิดพลาดของการทำนายภายใต้แหล่งกำเนิดแสงทั้ง 3 แหล่ง พบว่าสีที่ทำนายได้ยังคงรักษาระดับความสว่างได้ใกล้เคียงกับสีต้นฉบับ แต่มีความเป็นสีมากขึ้น

ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสี Gray scale ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 ตามลำดับ พิจารณาจากค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) และค่า RMS ได้ผลดังตารางที่ 4.11

จากตารางที่ 4.11 พบว่าค่า ΔE^*_{ab} ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ค่า Standard deviation พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65, A และ F11 มีค่าเท่ากับ 9.03, 7.82 และ 8.84 ตามลำดับ ในส่วนของค่า RMS มีค่า Median เท่ากับ 18.06 และค่า Mean เท่ากับ 26.72 จากผลการทดลองพบว่าความผิดพลาดจาก

การทำนายไม่แตกต่างกันมากภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

ตารางที่ 4.11 ค่า ΔE^*_{ab} และค่า RMS ของ Gray scale ในทำนายค่าสี RGB

ชุดตัวอย่างสีทดสอบ	ΔE^*_{ab}		
	D65	A	F11
Gray scale			
Median	39.60	39.46	41.46
Mean	38.22	38.76	40.33
Minimum	24.01	29.31	26.36
Maximum	47.59	51.46	49.60
Standard deviation	9.03	7.82	8.84

4.2.2.6 ผลการทดสอบรวมทุกชุดตัวอย่างสี

จากผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณข้างต้น เมื่อนำผลการทดสอบของชุดตัวอย่างสี มาเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการทำนายค่าสเปกตรัมของแบบจำลองลักษณะ เฉพาะด้วยค่าเฉลี่ย ความแตกต่างสีแยกตามชุดตัวอย่างสีที่แตกต่างกัน 3 ชุดตัวอย่างสี ผลของค่า เฉลี่ยจากทั้ง 3 ชุดตัวอย่างสี ดังแสดงผลดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่า ΔE^*_{ab} ของชุดตัวอย่างสีทดสอบ ในทำนายค่าสี RGB

แหล่งกำเนิดแสง	สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (24 ตัวอย่างสี)	สีผสม (18 ตัวอย่างสี)	สีเทา (8 ตัวอย่างสี)	ค่าเฉลี่ย (50 ตัวอย่างสี)
D65	27.69	38.85	38.22	33.39
A	28.77	38.31	38.76	33.81
F11	27.85	38.53	40.33	33.69

จากตารางที่ 4.12 พบว่าค่า ΔE^*_{ab} ของสีผสมและสีเทามีใกล้เคียงกัน ในขณะที่ ค่า ΔE^*_{ab} ของชุดตัวอย่างสี training set มีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองลักษณะ เฉพาะนี้ ให้ความถูกต้องในการทำนายค่า RGB ของชุดตัวอย่างสี training set ดีที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่า

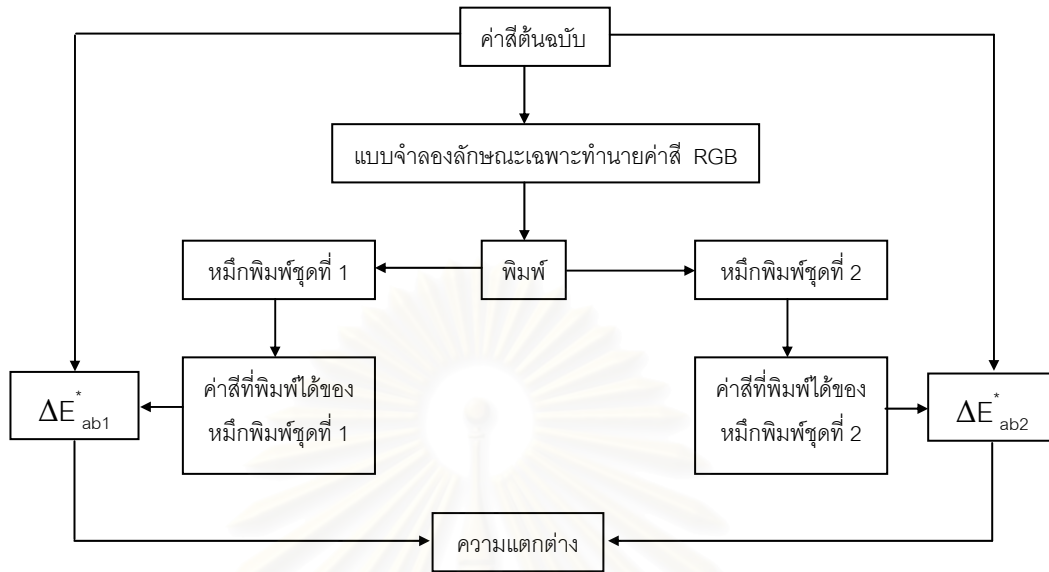
ΔE^*_{ab} เฉลี่ยของทุกตัวอย่างสี พบว่ามีความผิดพลาดสูงมาก ทำให้เกิดการแปลงค่าสีผิดเพี้ยนไปเป็นคนละสีได้ ความผิดพลาดนี้อาจเกิดเนื่องมาจากการใช้ฐานข้อมูลสี RGB ซึ่งเป็นระบบการผสมสีแบบบวก ทำนายค่าสเปกตรัมโดยผ่านทางความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการคูเบลคา-มังก์ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการผสมสีแบบลบ ทำให้มีความผิดพลาดสูง เพราะการผสมกันของสีที่มีความเข้มข้นของค่าสีมากในการผสมสีแบบบวก ทำให้ได้สีที่มีความสว่างสีมาก ในขณะที่การผสมสีแบบลบจะได้สีที่มีสว่างสีน้อย

จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทำนายค่าสเปกตรัม และผลการทำนายค่าสี RGB ของแบบจำลองลักษณะเฉพาะพบว่าการทำนายทั้งสองลักษณะมีความผิดพลาดเท่า ๆ กัน ดังนั้นไม่ว่าจะนำแบบจำลองลักษณะเฉพาะนี้ไปใช้งานในลักษณะใดก็ตามความถูกต้องก็ไม่แตกต่างกัน

4.3 ความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งกับหมึกพิมพ์ชุดที่สอง

เนื่องจากหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลเพื่อการทำนายค่าสีมีปริมาณเหลือไม่เพียงพอในการพิมพ์ชุดตัวอย่างสีทดสอบทั้งหมด 50 ตัวอย่างสี จึงได้มีการเปลี่ยนใช้หมึกพิมพ์ชุดที่สองดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาผลความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้หมึกพิมพ์สองชุดที่แตกต่างกัน จึงได้มีการทดสอบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง โดยการพิมพ์ผลการทำนายค่าสี RGB ของชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี ด้วยหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง และคำนวณหาค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) ระหว่างค่าสีต้นฉบับกับค่าสีที่พิมพ์ได้จากหมึกพิมพ์ทั้งสองชุด จากนั้นจึงทำการหาความแตกต่างของค่า ΔE^*_{ab} ที่คำนวณได้จากหมึกพิมพ์สองชุดที่แตกต่างกัน ดังแผนผังที่ 4.1

ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สองแสดงในตารางที่ 4.13 หากหมึกพิมพ์ทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกัน ผลความผิดพลาดของการทำนายค่าสีก็จะไม่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ผลความแตกต่างของค่า ΔE^*_{ab} มีค่าน้อย เนื่องจากการคำนวณเปรียบเทียบด้วยตัวอย่างสีต้นฉบับเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า ΔE^*_{ab} ของหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สองมีความแตกต่างกันไม่มากนัก จึงอาจกล่าวได้ว่าหมึกพิมพ์ทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



แผนผังที่ 4.1 ขั้นตอนการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งและชุดที่สอง

หมึกพิมพ์ชุดที่หนึ่งกับหมึกพิมพ์ชุดที่สอง	ความแตกต่างของค่า ΔE^*_{ab}		
	D65	A	F11
Median	3.80	3.25	4.39
Mean	4.64	5.08	4.55
Minimum	0.10	0.00	0.07
Maximum	13.24	14.42	15.22
Standard deviation	3.95	4.54	4.15

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัย เพื่อหาลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแปดสีบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันท์ โดยการสร้างฐานข้อมูลจากค่าสี RGB ที่ใช้สิ่งพิมพ์ตัวอย่างสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่มีระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 9 ระดับ จากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี RGB และค่าสเปกตรัมของสีตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบความถูกต้องของการทำนายค่าสีแบบจำลองลักษณะเฉพาะจากชุดตัวอย่างสีทดสอบจำนวน 3 ชุดตัวอย่างสีดังนี้

5.1.1 ความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะในการทำนายค่าสเปกตรัม

ความถูกต้องในการทำนายค่าสเปกตรัมจากค่าสี RGB เมื่อทดสอบภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ D65, A และ F11 พบว่ามีค่าความแตกต่าง (ΔE_{ab}^*) เฉลี่ยรวมจากตัวอย่างสีทดสอบ 50 สี เท่ากับ 35.17, 33.27 และ 35.72 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบด้วยชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินจำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่างสี ซึ่งเป็นชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ (training set) พบว่าค่าความแตกต่างสีระหว่างค่าสีที่ได้จากการวัดและค่าการทำนายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 30 - 34 ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ D65, A และ F11 ในการทดสอบชุดตัวอย่างสีของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี พบว่ามีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 44 - 48 ΔE_{ab}^* และผลการทดสอบด้วยชุดตัวอย่างสีเทาจำนวน 8 ตัวอย่างสี พบว่ามีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 16 - 18 ΔE_{ab}^*

แบบจำลองลักษณะเฉพาะมีแนวโน้มที่จะทำนายค่าความอิ่มตัวสีได้ต่ำกว่าตัวอย่างสีจริงสำหรับตัวอย่างสีที่มีสีล้วน แต่ผลการทำนายค่าสีสำหรับตัวอย่างสีเทา (ไม่มีสีล้วน) พบว่าแบบจำลองลักษณะเฉพาะทำนายเป็นตัวอย่างสีที่มีสีล้วน (มีความอิ่มตัวสีสูงกว่าค่าจริง) แต่ยังคงทำนายความสว่างสีได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองลักษณะเฉพาะทำนายค่าสีของตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีสูง ๆ ได้ถูกต้องกว่าตัวอย่างสีที่มีความอิ่มตัวสีต่ำ ๆ ซึ่งมักจะทำให้ค่าการทำนายเฉดสีผิดเพี้ยนไปจากเดิมมาก ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างสีเหลืองจะทำนายเบี่ยงเบนไปทางเฉดสีแดงและตัวอย่างสีแดงจะทำนายเบี่ยงเบนไปทางเฉดสีเหลือง

5.1.2 ความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะในการทำนายค่าสี RGB

ความถูกต้องในการทำนายค่าสี RGB จากค่าสเปกตรัม เมื่อทดสอบภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ D65, A และ F11 พบว่ามีค่าความแตกต่าง (ΔE_{ab}^*) เฉลี่ยรวมจากตัวอย่างสีทดสอบ 50 สีเท่ากับ 33.39, 33.81 และ 33.69 ตามลำดับ

จากผลการทดสอบด้วยชุดตัวอย่างสีทดสอบของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินจำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่างสี ซึ่งเป็นชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ (training set) พบว่าค่าความแตกต่างสีระหว่างค่าสีที่ได้จากการวัดและค่าการทำนายมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 27 - 29 ΔE_{ab}^* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่ง คือ D65, A และ F11 ในการทดสอบชุดตัวอย่างสีของสีผสมจำนวน 18 ตัวอย่างสี พบว่ามีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 38 - 39 ΔE_{ab}^* และผลการทดสอบด้วยชุดตัวอย่างสีเทาจำนวน 8 ตัวอย่างสี พบว่ามีค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 38 - 41 ΔE_{ab}^*

แบบจำลองลักษณะเฉพาะมีการทำนายเฉดสีที่ผิดเพี้ยนไปจากตัวอย่างสีจริง โดยตัวอย่างสีแดงจะทำนายเบี่ยงเบนไปในทางเฉดสีเหลือง ตัวอย่างสีเหลืองจะทำนายเบี่ยงเบนไปในทางเฉดสีเขียว ตัวอย่างสีเขียวจะทำนายเบี่ยงเบนไปในทางเฉดสีน้ำเงิน สำหรับตัวอย่างสีน้ำเงินมีความถูกต้องในการทำนายเฉดสีดีที่สุด ความผิดพลาดในการทำนายความอิ่มตัวของสีไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน บางตัวอย่างสีทำนายค่าความอิ่มตัวของสีสูงขึ้น บางตัวอย่างสีทำนายค่าความอิ่มตัวของสีต่ำลง ในส่วนของตัวอย่างสีเทา (ไม่มีสีสัน) พบว่าแบบจำลองลักษณะเฉพาะทำนายเป็นตัวอย่างสีที่มีสีสัน (มีความอิ่มตัวของสีสูงกว่าค่าจริง) แต่ยังคงทำนายความสว่างสีได้ดี

จากการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าสเปกตรัม และผลการทำนายค่าสี RGB ของแบบจำลองลักษณะเฉพาะบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มันท์ พบว่าการทำนายทั้งสองลักษณะมีความผิดพลาดเท่า ๆ กัน ดังนั้นไม่ว่าจะนำแบบจำลองลักษณะเฉพาะนี้ไปใช้งานในลักษณะใด ความถูกต้องก็ไม่แตกต่างกัน และจากการพิจารณาค่าความแตกต่างสีเฉลี่ยภายใต้ทั้ง 3 แหล่งกำเนิดแสง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาลักษณะเฉพาะโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมนี้สามารถช่วยลดแนวโน้มการเกิดเมแทเมอร์ซีมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสงได้ แต่ยังคงควรมีการปรับปรุง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายค่าสี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1 ชุดตัวอย่างสี (Training set) ควรมีการกำหนดค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยที่กำหนดค่าสีตั้งแต่ 255 ถึง 0 ให้มีค่าสีลดลงในระดับเท่า ๆ กัน โดยมีระยะห่างระหว่างค่าสีน้อยลง เพื่อสร้างแบบจำลองลักษณะเฉพาะให้มีความถูกต้องมากขึ้น

2 ชุดตัวอย่างสีทดสอบ (Test set) ควรมีจำนวนสีมากกว่า 50 สี และมีการกระจายครอบคลุมทุกเฉดสีอย่างเท่า ๆ กันในปริภูมิสี L*a*b*อย่างครอบคลุม เพื่อการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองลักษณะเฉพาะ

3 ศึกษาวิธีการนำฐานข้อมูลสี RGB มาใช้ในการทำนายค่าสีให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

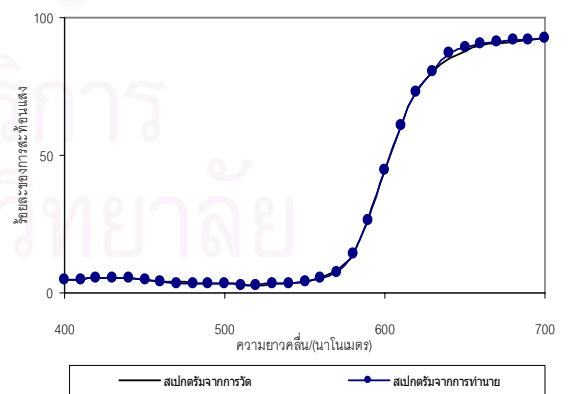
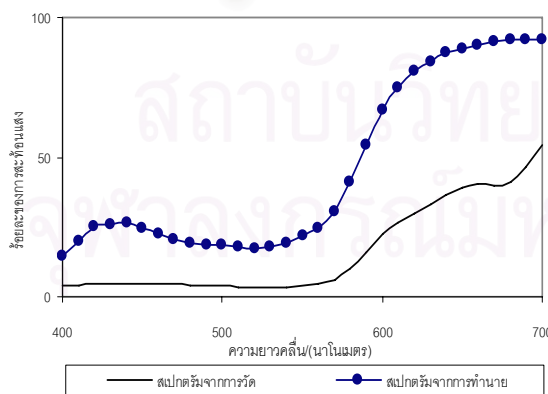
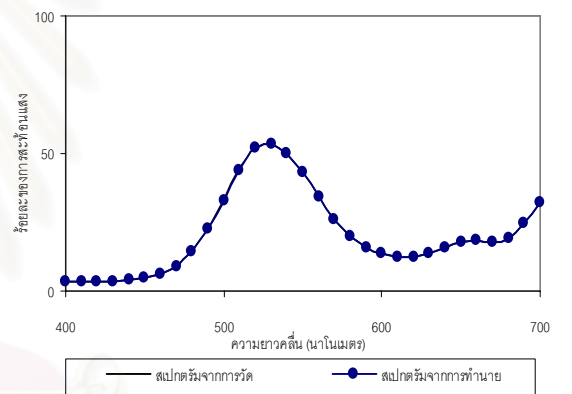
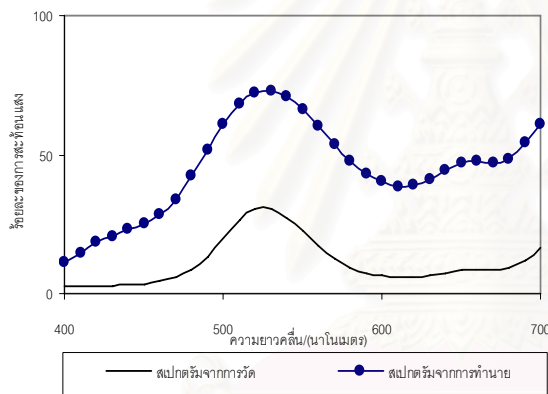
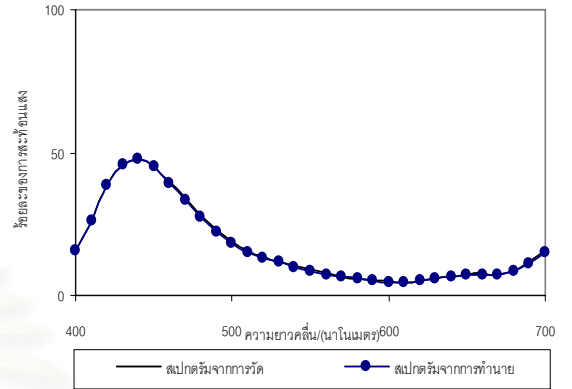
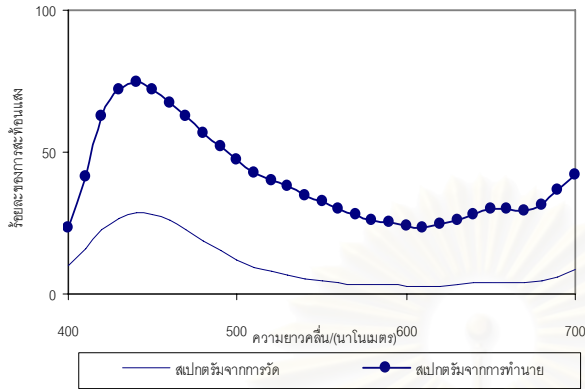
รายการอ้างอิง

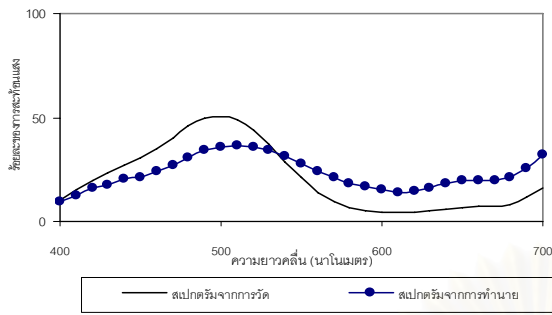
- [1] พิชญดา เกตุเมฆ, เอกสารประกอบคำบรรยายวิชาสมบัติทางทัศนศาสตร์เชิงแสงของวัตถุ มีสี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เอกสารสำเนาเย็บเล่ม, 2548.
- [2] Imai, F.; Rosen, M.; Wyble, D.; Berns, R.; and Tzeng, D. Spectral reproduction from scene to hardcopy I: Input and Output [Online]. Available from: <http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/PDFs/Report2.pdf> [2006, March 27].
- [3] Hardeberg, J. Y.; Schmitt, F.; Brettel, H.; Crettez, J.; and Maitre, H. Multispectral Imaging in Multimedia [Online]. Available from: <http://citeseer.ist.psu.edu/hardeberg99multispectral.html> [2006, March 27].
- [4] Rosen, M.; Hattenberger, E.; and Ohta, N. Spectral Redundancy in a Six-Ink Ink Jet Printer [Online]. Available from: http://www.art-si.org/PDFs/Printing/JIST04_Rosen.pdf [2006, November 2].
- [5] Tzeng, D. Spectral-Based Six-Color Separation Minimizing Metamerism [Online]. Available from: http://www.art-si.org/PDFs/Printing/CIC00_Tzeng.pdf [2006, November 2].
- [6] Tzeng, D., and Berns, R. Spectral-Based Ink Selection for Multiple-Ink Printing II. Optimal Ink Selection [Online]. Available from: http://www.art-si.org/PDFs/Printing/CIC99_Tzeng.pdf [2006, November 2].
- [7] Tzeng, D., and Berns, R. Spectral-Based Ink Selection for Multiple-Ink Printing I. Colorant Estimation of Original Objects [Online]. Available from: http://www.art-si.org/PDFs/Printing/CIC98_Tzeng.pdf [2006, November 2].
- [8] ดุสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์: ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [9] พรทวี พึ่งรัมย์. เอกสารการสอนชุดวิชาเทคโนโลยีก่อนพิมพ์. หน่วยที่ 7. พิมพ์ครั้งที่ 2.นนทบุรี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, 2549.
- [10] เซาว์น ชิโนรักษ์ และพรณิ ชิโนรักษ์. ชีววิทยา 1. กรุงเทพมหานคร : ไสภณการพิมพ์, 2540
- [11] Eye anatomy [Online]. Available from : http://eyecare.freeyellow.com/anatomy_eye.gif [2006, November 2].

- [12] Berns, R., Principles of Color Technology, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [13] Malacara, D. Color vision and colorimetry : theory and applications, SPIN, 2002.
- [14] Inkjet and Bubble-jet Printers Technology [Online]. Available from :
<http://mimech.com/printers> [2006, November 4].
- [15] Predictable color [Online]. Available from :
<http://www.newsandtech.com> [2006, November 4].
- [16] Inkjet technology [Online]. Available from :
<http://www.huntsman.com> [2006, November 4].
- [17] Hue, P.Le. Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology. Journal of Imaging Science and Technology [Online]. Available from :
http://www.imaging.org/resources/web_tutorials/inkjet.cfm [2006, November 4].
- [18] Types of Ink Jet Printing [Online]. Available from :
<http://www.colourgen.com> [2006, November 4].
- [19] Demystifying Ink Jet Printing [Online]. Available from :
<http://www.scoug.com> [2006, November 4].
- [20] Kang H.R., Color Technology for Electronic Imaging Devices, SPIE Press, 1997.
- [21] Green, P., and MacDonald L.W.; Colour Engineering, John Wiley & Sons, England, 2002.
- [22] Nobbs J.H., Colour-Match Prediction for pigmented materials, Colour Physics for Industry, 2nd ed, ed. R. McDonald, Society of Dryers and colourist, 1997.
- [23] American Society for Testing and Materials, ASTM Standards on Color and Appearance Measurement, 3rd Ed., Amer. Soc. For Testing and Materials, New York, 1991.
- [24] ปรีชา เนาว์เย็นผล. เอกสารการสอนชุดวิชาวิทยาศาสตร์กับสังคม. หน่วยที่ 11. พิมพ์ครั้งที่ 9. นนทบุรี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, 2543.

ภาคผนวก ก

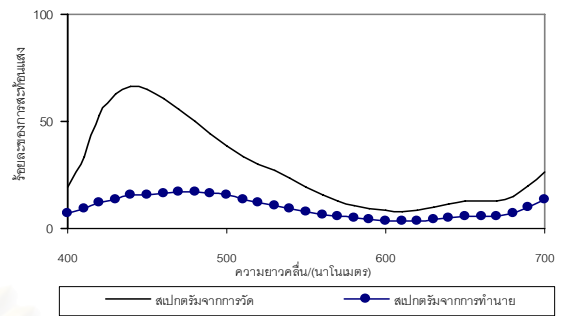
การทำนายค่าสเปกตรัมของชุดตัวอย่างสีทดสอบ





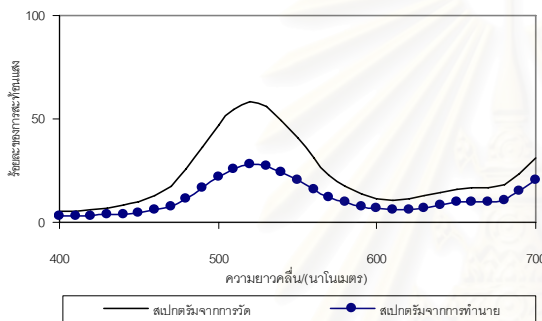
รูปที่ ก-7 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 0 \quad G = 128 \quad B = 128$$



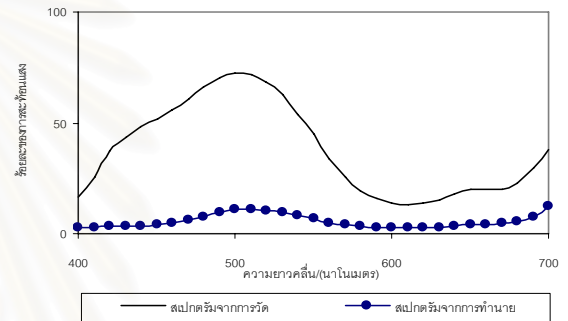
รูปที่ ก-8 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 0 \quad G = 128 \quad B = 255$$



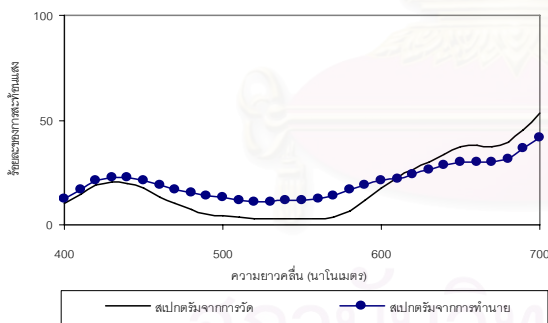
รูปที่ ก-9 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 0 \quad G = 255 \quad B = 128$$



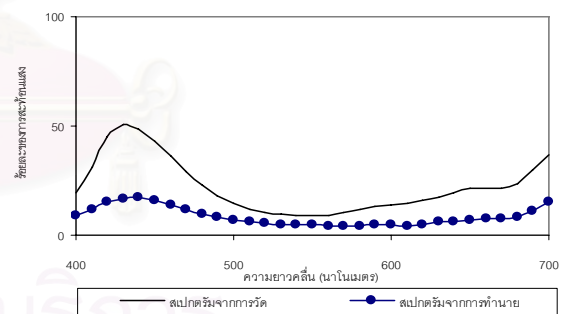
รูปที่ ก-10 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 0 \quad G = 255 \quad B = 255$$



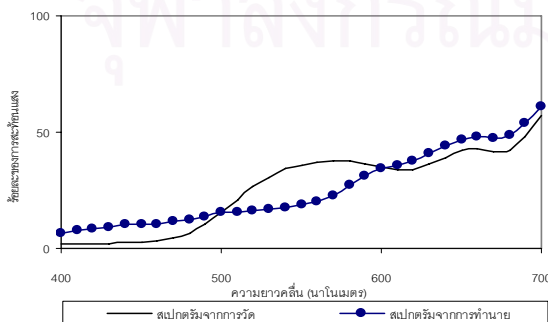
รูปที่ ก-11 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 128 \quad G = 0 \quad B = 128$$



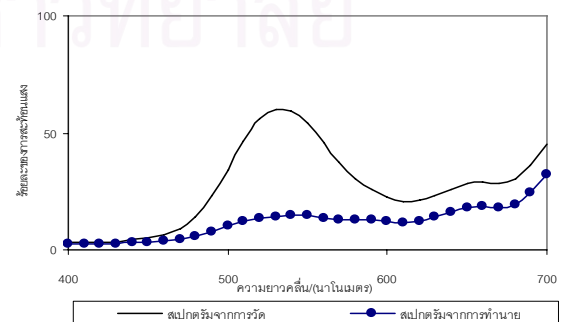
รูปที่ ก-12 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 128 \quad G = 0 \quad B = 255$$



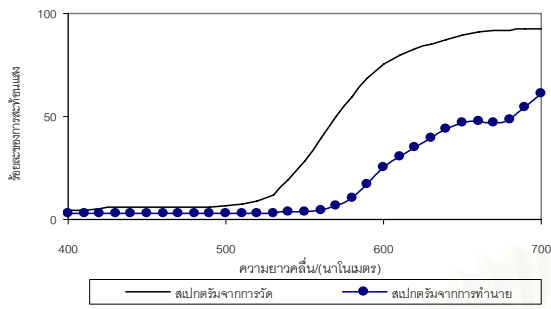
รูปที่ ก-13 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

$$R = 128 \quad G = 128 \quad B = 0$$

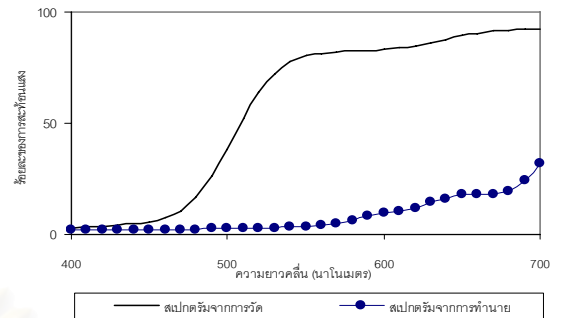


รูปที่ ก-14 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

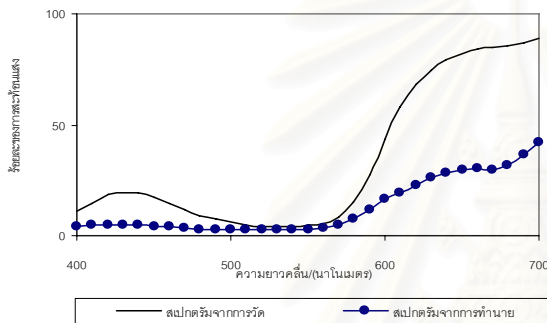
$$R = 128 \quad G = 255 \quad B = 0$$



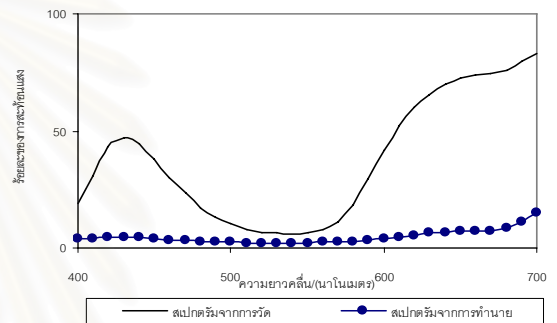
รูปที่ ก-15 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 255 \quad G = 128 \quad B = 0$



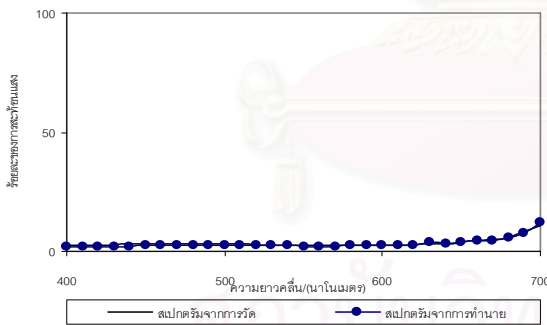
รูปที่ ก-16 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 255 \quad G = 255 \quad B = 0$



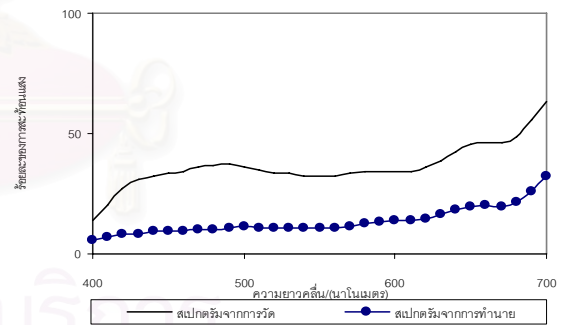
รูปที่ ก-17 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 255 \quad G = 0 \quad B = 128$



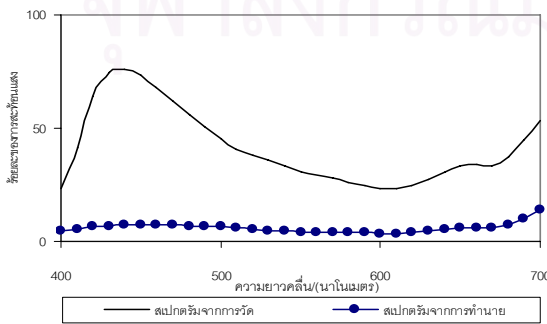
รูปที่ ก-18 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 255 \quad G = 0 \quad B = 255$



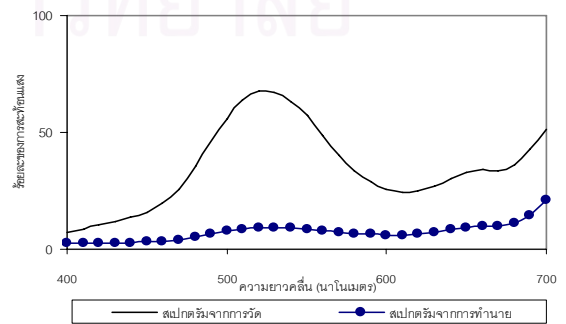
รูปที่ ก-19 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 0 \quad G = 0 \quad B = 0$



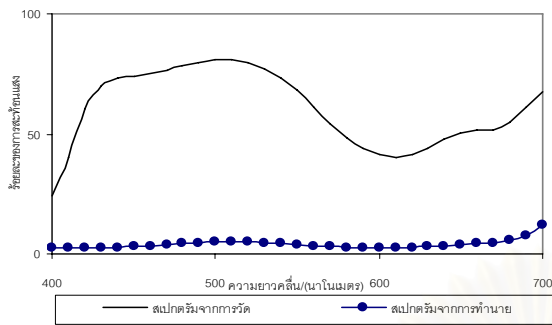
รูปที่ ก-20 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 128 \quad G = 128 \quad B = 128$



รูปที่ ก-21 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 128 \quad G = 128 \quad B = 255$

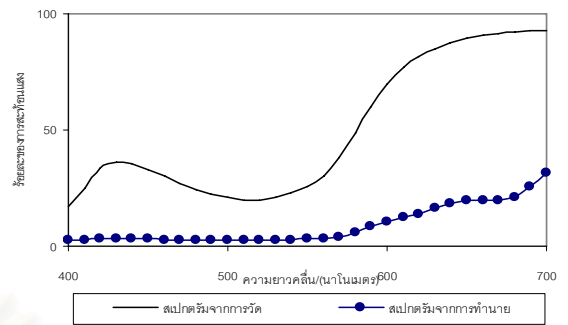


รูปที่ ก-22 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่
 $R = 128 \quad G = 255 \quad B = 128$



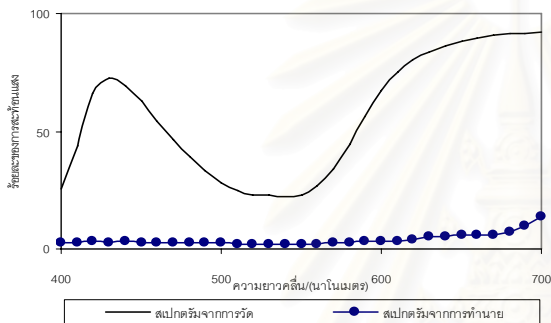
รูปที่ ก-23 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 128 \quad G = 255 \quad B = 255$



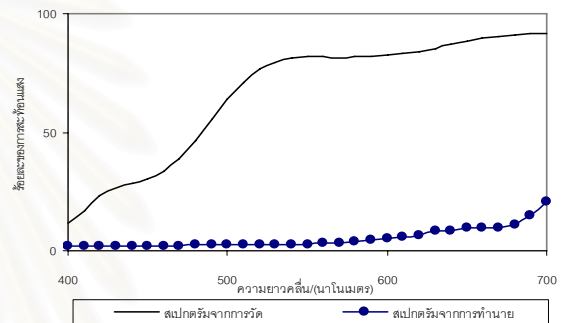
รูปที่ ก-24 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 255 \quad G = 128 \quad B = 128$



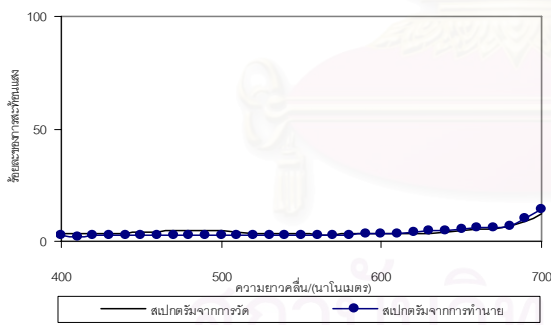
รูปที่ ก-25 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 255 \quad G = 128 \quad B = 255$



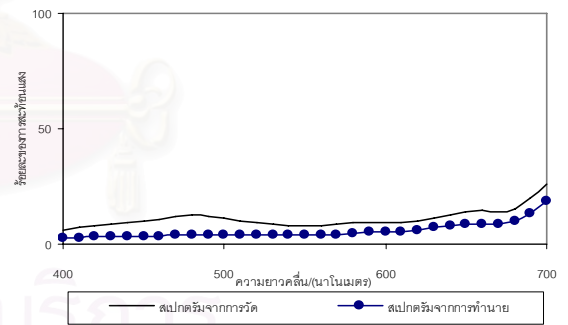
รูปที่ ก-26 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 255 \quad G = 255 \quad B = 128$



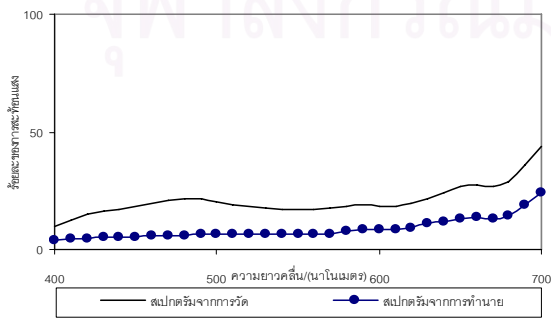
รูปที่ ก-27 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 32 \quad G = 32 \quad B = 32$



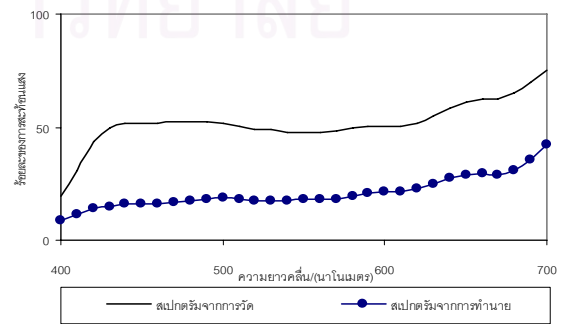
รูปที่ ก-28 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 64 \quad G = 64 \quad B = 64$



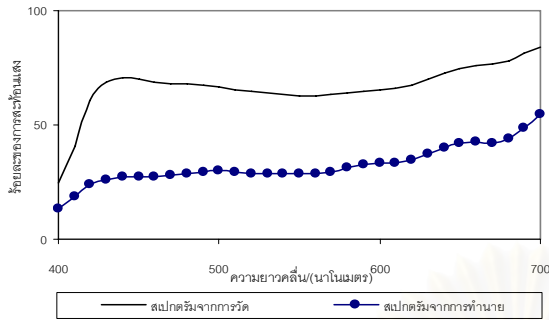
รูปที่ ก-29 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 96 \quad G = 96 \quad B = 96$



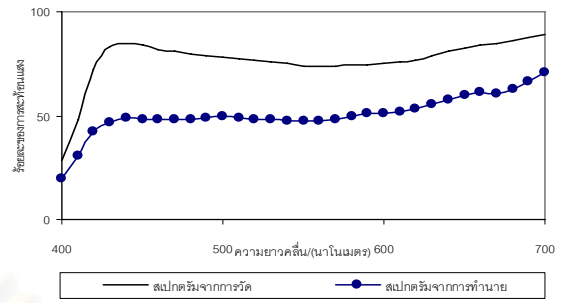
รูปที่ ก-30 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

$R = 160 \quad G = 160 \quad B = 160$



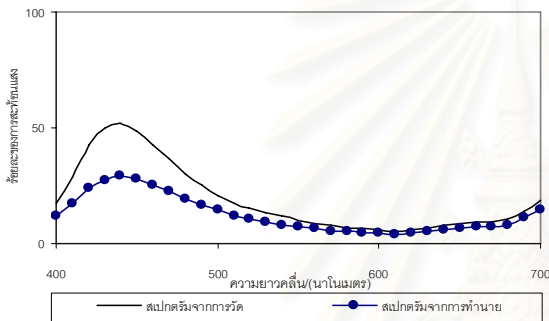
รูปที่ ก-31 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 192 G = 192 B = 192



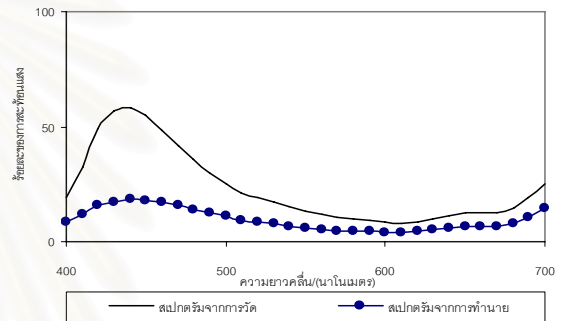
รูปที่ ก-32 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 224 G = 224 B = 224



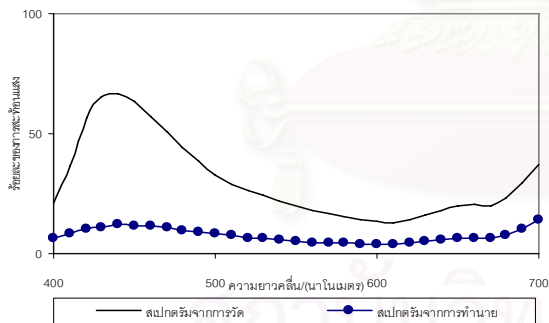
รูปที่ ก-33 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 32 G = 32 B = 255



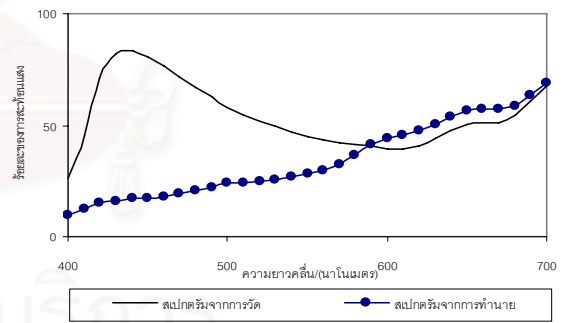
รูปที่ ก-34 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 64 G = 64 B = 255



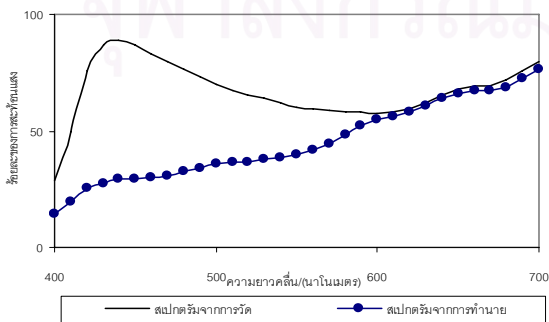
รูปที่ ก-35 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 96 G = 96 B = 255



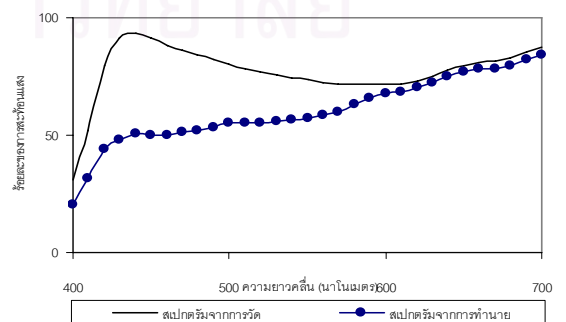
รูปที่ ก-36 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 160 G = 160 B = 255



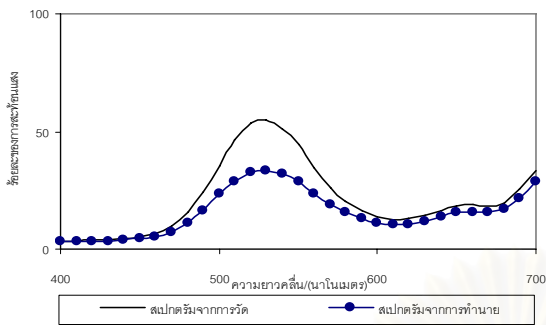
รูปที่ ก-37 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 192 G = 192 B = 255



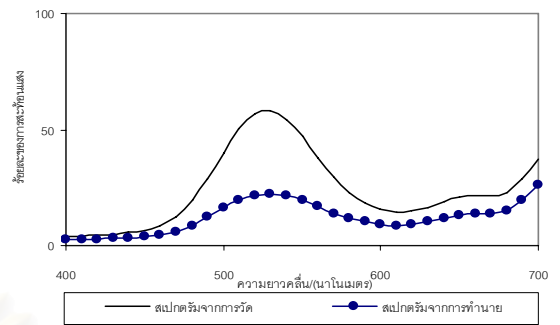
รูปที่ ก-38 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี่

R = 224 G = 224 B = 255



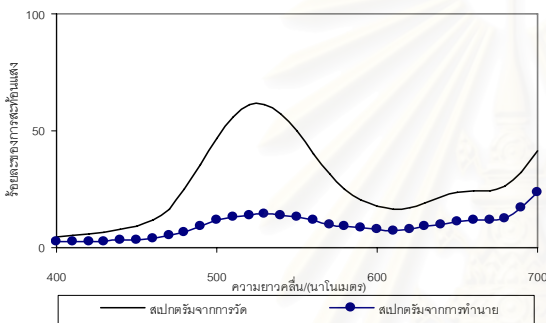
รูปที่ ก-39 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 32 G = 255 B = 32



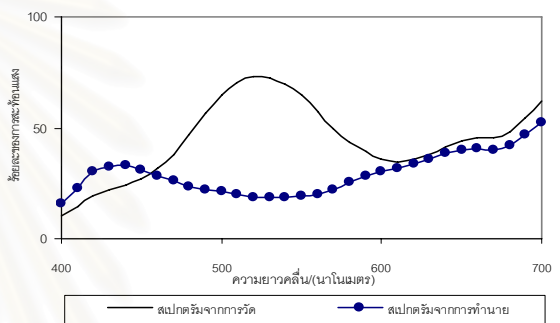
รูปที่ ก-40 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 64 G = 255 B = 64



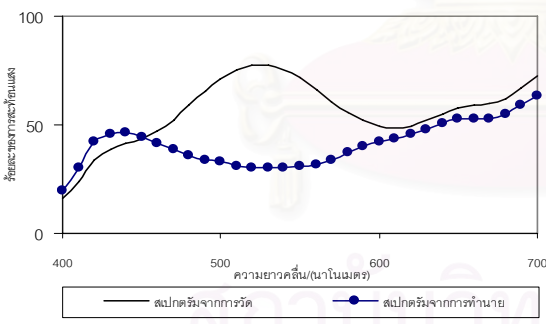
รูปที่ ก-41 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 96 G = 255 B = 96



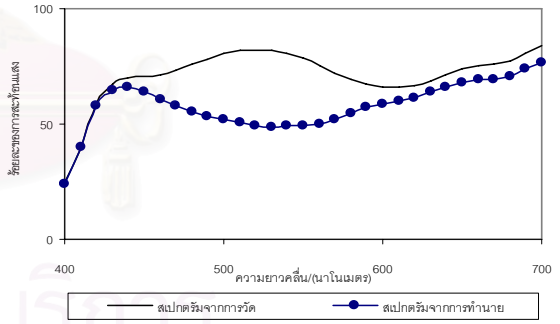
รูปที่ ก-42 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 160 G = 255 B = 160



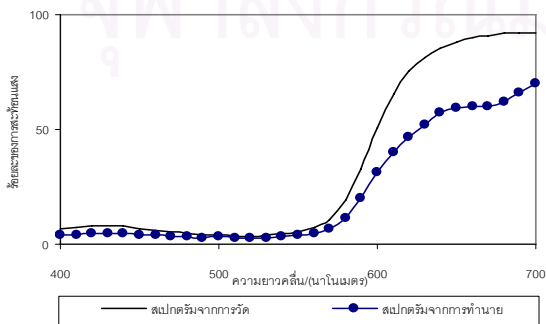
รูปที่ ก-43 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 192 G = 255 B = 192



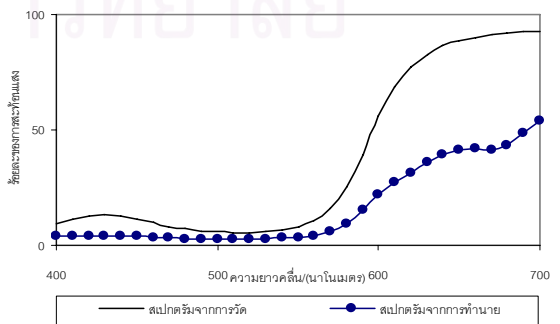
รูปที่ ก-44 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 224 G = 255 B = 224



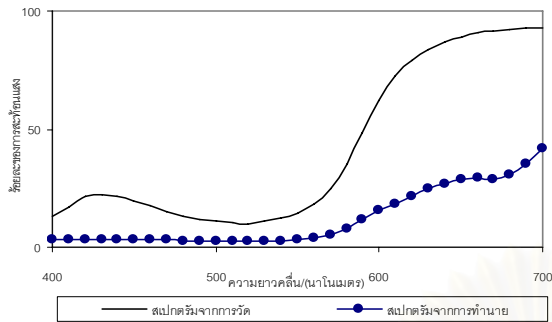
รูปที่ ก-45 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 255 G = 32 B = 32



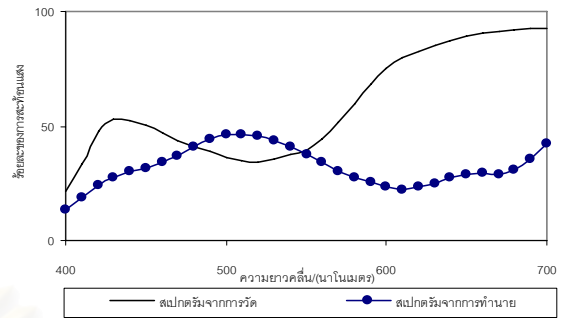
รูปที่ ก-46 สเปกตรัมจากกรวัดและท่านายของค่าสี่

R = 255 G = 64 B = 64



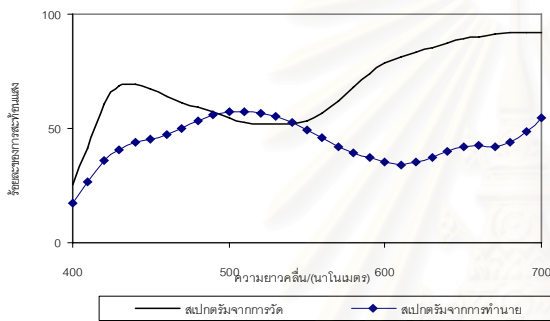
รูปที่ ก-47 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

R = 255 G = 96 B = 96



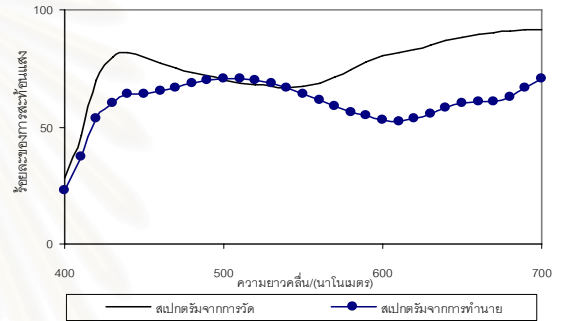
รูปที่ ก-48 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

R = 255 G = 160 B = 160



รูปที่ ก-49 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

R = 255 G = 192 B = 192



รูปที่ ก-50 สเปกตรัมจากการวัดและทำนายของค่าสี

R = 255 G = 224 B = 224

ภาคผนวก ข
การทำนายค่าสี RGB ของชุดตัวอย่างสีทดสอบ

	ค่าสี RGB ของชุด Test set			ค่าสี RGB ทำนาย				ค่าสี RGB ของชุด Test set			ค่าสี RGB ทำนาย		
	R	G	B	R	G	B		R	G	B	R	G	B
1	0	0	0	69	58	128	2	0	0	128	11	0	244
3	0	0	255	0	1	254	4	0	128	0	0	214	41
5	0	128	128	0	82	173	6	0	128	255	0	28	227
7	0	255	0	2	253	0	8	0	255	128	0	203	52
9	0	255	255	0	90	165	10	128	0	0	207	20	28
11	128	0	128	157	0	98	12	128	0	255	82	0	173
13	128	128	0	55	200	0	14	128	128	128	68	100	87
15	128	128	255	0	27	228	16	128	255	0	20	235	0
17	128	255	128	4	245	6	18	128	255	255	0	99	156
19	255	0	0	227	28	0	20	255	0	128	197	0	58
21	255	0	255	166	0	89	22	255	128	0	91	164	0
23	255	128	128	216	0	39	24	255	128	255	164	0	91
25	255	255	0	51	204	0	26	255	255	128	52	203	0
27	32	32	32	65	56	134	28	64	64	64	73	58	123
29	96	96	96	71	79	105	30	160	160	160	66	103	86
31	192	192	192	62	108	85	32	224	224	224	54	110	91
33	255	32	32	251	4	0	34	255	64	64	241	0	14
35	255	96	96	226	0	29	36	255	160	160	178	33	44
37	255	192	192	129	70	55	38	255	224	224	87	100	68
39	32	255	32	0	255	0	40	64	255	64	1	254	0
41	96	255	96	0	253	2	42	160	255	160	12	229	14
43	192	255	192	23	205	27	44	224	255	224	33	155	67
45	32	32	255	0	3	252	46	64	64	255	0	7	248
47	96	96	255	0	15	240	48	160	160	255	1	40	214
49	192	192	255	25	59	171	50	224	224	255	37	85	133

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอารีรัตน์ ปฐมชัยวาลย์ เกิดวันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2526 จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาปริญญาเศรษฐศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ธุรกิจ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ปีการศึกษา 2548 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย