

แบบจำลองการทำนายสีจากข้อมูลสเปกตรัมของการพิมพ์อิงค์เจ็ท

Colour Prediction Model from Spectral Data for Inkjet Printing

อารีรัตน์ ปฐมชัยวาลย์

อาจารย์ประจำ ดร. ภาควิชาวิศวกรรมกรรมการพิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสยาม

E-mail: areerat.pathom@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายค่าสีจากข้อมูลสเปกตรัมของระบบการพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยการสร้างแบบจำลองทำนายค่าสีจากชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างกระบวนการ (Training set) ด้วยค่าสีจากไฟล์ดิจิทัลของสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) กำหนดค่าความเข้มสี (0, 0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63, 0.75, 0.88 และ 1 ตามลำดับ) เพื่อสร้างการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB กับสเปกตรัมการสะท้อนแสงของภาพพิมพ์ โดยผ่านทางความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K) ของหมึกพิมพ์บนพื้นฐานของทฤษฎีคูเบลคา-มังก์กับค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB โดยการทดสอบความถูกต้องในการทำนายค่าสีด้วยชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของกระบวนการที่สร้างขึ้น (Test set) ผลการทดสอบ พบว่า ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) เท่ากับ 2.44, 2.61 และ 2.44 ตามลำดับ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A, D65 และ F11 และไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Illuminant metamerism)

คำสำคัญ: แบบจำลองการทำนายสี, ความแตกต่างสี

ABSTRACT

This research studied color prediction model from spectral data for inkjet printing system based on the estimation of spectral reflectance data. The training set was included of red, green and blue digital color values with ink densities (0, 0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63, 0.75, 0.88 and 1, respectively). Using the Kubelka-munk theory approach, the relationship between the spectral reflectance data and RGB digital color values was established. The relationship between the calculated absorption coefficients (K) and the RGB color by digital values. The accuracy of color prediction model was investigated using a test set. The results showed that the accuracy of spectral data prediction the ΔE^*_{ab} (mean color difference) were 2.44, 2.61 and 2.44, respectively under A, D65 and F11 illumination and no chance of illuminant metamerism.

KEYWORDS: Color Prediction Model, Color Difference

บทนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทได้รับการพัฒนาคุณภาพของสิ่งพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยการเพิ่มจำนวนสีของหมึกพิมพ์ในระบบการพิมพ์จาก 4 สี (cyan, magenta, yellow และ black) เพิ่มเป็น 6 สี (cyan, light cyan,

magenta, light magenta, yellow และ black) หรือ 8 สี (cyan, photo cyan, magenta, photo magenta, yellow, red, green และ black) เป็นต้น

ในกระบวนการผลิตสิ่งพิมพ์อิงค์เจ็ทให้มีสีใกล้เคียงกับต้นฉบับจำเป็นต้องมีระบบการจัดการสี

(Color management system) เพื่อให้อุปกรณ์ที่มีค่าสีที่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ (Device dependent colours) สามารถสื่อสารข้อมูลสีและแสดงผลออกมาได้ตรงกัน โดยใช้ค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ (Device independent colours) ซึ่งในปัจจุบันระบบการจัดการสีที่ใช้กันทั่วไปนั้นสามารถควบคุมการผลิตภาพสีและแสดงผลได้เฉพาะสภาวะที่กำหนดเท่านั้น ปัญหานี้เนื่องมาจากค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์และค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์นั้นไม่คำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการรับรู้สีของมนุษย์ที่มีการเปลี่ยนไปตามสภาพแสงต่างๆ หรือปรากฏการณ์เมแทเมอริซึม (Metamerism) คือ ปรากฏการณ์การสะท้อนแสงของวัตถุมีสีสองชนิดเข้าสู่ตาแล้วกระตุ้นเซลล์รูปกรวยในจอตา ทำให้เกิดการมองเห็นและรับรู้สีของวัตถุสองชนิดมีสีเหมือนกันภายใต้สภาวะเฉพาะหนึ่งๆ โดยเมื่อสภาวะนั้นมีการเปลี่ยนแปลงก็มีผลทำให้สีของวัตถุสองชนิดแตกต่างกัน แต่ถ้าสามารถผลิตสีของวัตถุให้มีค่าสเปกตรัมเหมือนกัน จะช่วยลดการเกิดเมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง (Illuminant metamerism) ได้

การทำนายค่าสีเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์และค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์เพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง (Model) ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการแปลงค่าสีระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์ไปเป็นค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์สำหรับใช้ในการสื่อสารสีกับอุปกรณ์อื่น และเพื่อควบคุมให้อุปกรณ์ผลิตสีได้ตามต้องการ ดังนั้นแบบจำลองการทำนายค่าสีจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตภาพสี จึงได้มีงานวิจัยศึกษาการสร้างแบบจำลองทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากข้อมูลสเปกตรัม เพื่อให้ภาพที่ผลิตได้มีสีเหมือนกับต้นฉบับภายใต้สภาพแสงต่างๆ (Francisco et al., 2001) โดยพบว่าแบบจำลอง Look-up table มีความถูกต้องในการแปลงค่าสีสำหรับเครื่องพิมพ์หกสีที่ค่าคลาดเคลื่อนรากล้างสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.02 (Rosen et al., 2004) ต่อมา มีการประยุกต์ใช้สมการนอยกาบาวที่ปรับเปลี่ยน โดยใช้ยูล-นีสัน (Yule-Nielson modified spectral Neugebauer equation) ในการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทหกสี (Tzeng & Berns, 1999; Tzeng & Berns, 2000) ซึ่งมีความถูกต้องในการแปลงค่าสี

ด้วยค่าคลาดเคลื่อนรากล้างสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.063 และค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{94}) เท่ากับ 1.16 (Tzeng & Berns, 2000) และมีการพัฒนางานวิจัยต่อมาได้ค่าความถูกต้องในการแปลงค่าสีด้วยค่าคลาดเคลื่อนรากล้างสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.028 และค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{94}) เท่ากับ 2.3 (Tzeng & Berns, 1999) และแบบจำลองที่ใช้สมการคูเบลคา-มังก์ (Kubelka-Munk equation) ทดสอบกับเครื่องพิมพ์หกสีค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{94}) เท่ากับ 0.22 (Di-yuan & Roy, 2009) ในงานวิจัยการสร้างแบบจำลองการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทห้าสี (CMYLcLm: cyan, magenta, yellow, light cyan and light magenta) แบ่งหมึกออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ CMLcLm, CYLc และ MYLm บนพื้นฐานของค่าไตรสตีมูลัส (CIEXYZ) ด้วยค่าความแตกต่างสีเฉลี่ย (ΔE^*_{94}) เท่ากับ 0.58, 0.95 และ 0.69 ตามลำดับ และบนพื้นฐานของสเปกตรัมในการสะท้อนแสงด้วยค่าคลาดเคลื่อนรากล้างสองเฉลี่ย (RMS error) เท่ากับ 0.0088, 0.0065 และ 0.0067 ตามลำดับ (Qu et al., 2014)

งานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทบนพื้นฐานของสมการคูเบลคา-มังก์ เพื่อการผลิตภาพผ่านการพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัม เนื่องจากเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับแหล่งกำเนิดแสง โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB ที่กำหนดเพื่อสั่งพิมพ์ และค่าสเปกตรัมของภาพพิมพ์ด้วยทฤษฎีคูเบลคา-มังก์ เนื่องจากเป็นสมการที่มีหลักการมาจากสมบัติเชิงแสงของหมึกพิมพ์และวัสดุรองรับการพิมพ์ จึงได้แบบจำลองทำนายค่าสี (Color prediction model) ที่ใช้ในการแปลงค่าสีเพื่อการผลิตภาพให้มีสีตรงตามต้นฉบับภายใต้สภาพแสงต่างๆ และจากการใช้ค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB ที่ใช้สั่งพิมพ์แทนการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์กับสเปกตรัมการสะท้อนแสงได้แบบจำลองการทำนายค่าสีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่มีจำนวนสีของหมึกพิมพ์ต่างๆ ได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงจำนวนสีของหมึกพิมพ์ เพราะเป็นการใช้ข้อมูลสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของไฟล์ภาพดิจิทัล โดยการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนายค่าสีดำเนินการโดยใช้ชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการ

ทดสอบความถูกต้องของกระบวนการที่สร้างขึ้น (Test set) มาผ่านการทำนายสเปกตรัมการสะท้อนแสง ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณพิจารณาจากค่าความแตกต่างระหว่างค่าสีที่ได้จากวัดกับค่าสีที่ทำนายได้ของชุด Test set และค่ารากที่สองกำลังเฉลี่ยของความแตกต่างของสเปกตรัมการสะท้อนแสง โดยผลที่ได้จากการวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์ในการแปลงค่าข้อมูลสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทในการสื่อสารข้อมูลสีกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อช่วยให้การผลิตภาพสีด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทมีสีใกล้เคียงกับตามต้นฉบับ ภายใต้สภาวะแสงที่แตกต่างกันได้ดียิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากข้อมูลสเปกตรัม สำหรับควบคุมการผลิตสีของงานพิมพ์ให้ตรงตามความต้องการ
2. เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทำนายค่าสี ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงต่างกัน

ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้วิธีการทำนายค่าสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทจากข้อมูลสเปกตรัม โดยภาพที่ผลิตได้ให้ใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุด และสามารถลดการเกิดปรากฏการณ์เมแทเมอริซึมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายสี

การสร้างแบบจำลองการทำนายสีของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท ต้องทราบถึงลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ขึ้นกับอุปกรณ์กับค่าสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ ทำให้สามารถกำหนดค่าสีที่ส่งข้อมูลสีไปยังเครื่องพิมพ์ให้ผลิตสีของภาพพิมพ์ได้ โดยมีขั้นตอน ดังรูปที่ 1 และมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1.1 สร้างชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างกระบวนการ (Training set) ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop เลือกโหมดสี RGB ตั้งค่าโปรแกรมให้ปิดระบบการจัดการสีของจอมอนิเตอร์ และเครื่องพิมพ์ โดยกำหนดค่าสีจากไฟล์ดิจิทัลของสีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ทั้งหมด 9 ระดับความเข้มสี ดังนี้ 0, 0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63,

0.75, 0.88 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งได้ฐานข้อมูลสีทั้งหมด 729 สี



รูปที่ 1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายสี

1.2 พิมพ์ชุด training set บนกระดาษขาว และบนกระดาษดำ ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท canon IP9950 โดยตั้งค่าปิดระบบการจัดการสีของเครื่องพิมพ์ก่อนการพิมพ์

1.3 วัดค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงของชุด training set ที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร ทุก 10 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ x-rite

1.4 สร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายค่าสีของการพิมพ์อิงค์เจ็ทด้วยทฤษฎีคูเบลลา-มังก์ (Nobbs, 1997; Džimbec-Malčić et al., 2011) มีขั้นตอนดังนี้

1.4.1 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (K) ดังสมการที่ (1) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (S) ดังสมการที่ (2) ของชั้นหมึกพิมพ์ที่โปร่งแสงที่มีความหนาของชั้นหมึกพิมพ์ (D) และค่า Z ดังสมการที่ (3) โดยที่ β เป็นฟังก์ชันของชั้นหมึกพิมพ์ที่ทึบแสง (R_{∞}) และการสะท้อนแสงของวัสดุพิมพ์ (R_g) ดังสมการที่ (4) ค่าการสะท้อนที่วัดได้ (R) ดังสมการที่ (5) และค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์บนกระดาษขาว และกระดาษดำ (R_{∞}) ดังสมการที่ (6) และ (7)

1.4.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสีแดง (K_R), สีเขียว (K_G) และสีน้ำเงิน (K_B) กับค่าความเข้มสีของค่าสีแดง (C_R), สีเขียว (C_G) และสีน้ำเงิน (C_B) โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least-square

method) ดังสมการที่ (8) ถึง (10) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความเข้มสีมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น เมื่อเพิ่มความเข้มสีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_R , K_G และ K_B กับค่าความเข้มสี C_R , C_G และ C_B ได้ดังสมการที่ (11) ถึง (13)

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

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

$$Z = 0.5 \ln(\beta + 1) \quad \dots(3)$$

$$\beta = \left[\frac{R_s - R}{R - R_\infty} \right] \left[\frac{1 - R_\infty^2}{1 - R_s R_\infty} \right] \quad \dots(4)$$

$$R = \frac{\rho - r_e}{t_e \cdot t_i + r_i \cdot (\rho - r_e)} \quad \dots(5)$$

$$R_\infty = B - \sqrt{B^2 - 1} \quad \dots(6)$$

$$B = \frac{(1+R_b R_w)(R_{g,w} - R_{g,b}) + (1+R_{g,b} R_{g,w})(R_w - R_b)}{2(R_b R_{g,w} - R_{g,b} R_w)} \quad \dots(7)$$

ρ : ค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้

r_e : ส่วนหนึ่งของฟลักซ์ I ที่สะท้อนออกไปจากชั้นหมึกพิมพ์ด้านนอก

t_e : ส่วนหนึ่งของฟลักซ์ I ที่ส่องผ่านเข้ามายังชั้นหมึกพิมพ์

r_i : ส่วนหนึ่งของฟลักซ์ J ที่สะท้อนกลับลงมาโดยขอบชั้นหมึกพิมพ์ด้านใน

t_i : ส่วนหนึ่งของฟลักซ์ J ที่ส่องผ่านขอบชั้นหมึกพิมพ์

R_w : ค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่พิมพ์บนกระดาษขาว

R_b : ค่าการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ที่พิมพ์บนกระดาษดำ

$R_{g,w}$: ค่าการสะท้อนแสงบริเวณสีขาวของวัสดุพิมพ์

$R_{g,b}$: ค่าการสะท้อนแสงบริเวณสีดำของวัสดุพิมพ์

$$K_R = a_1 C_R + a_2 C_G + a_3 C_B + a_4 C_R C_G C_B + a_5 C_R^3 + a_6 C_G^3 + a_7 C_B^3 \quad \dots(8)$$

$$K_G = b_1 C_R + b_2 C_G + b_3 C_B + b_4 C_R C_G C_B + b_5 C_R^3 + b_6 C_G^3 + b_7 C_B^3 \quad \dots(9)$$

$$K_B = c_1 C_R + c_2 C_G + c_3 C_B + c_4 C_R C_G C_B + c_5 C_R^3 + c_6 C_G^3 + c_7 C_B^3 \quad \dots(10)$$

$$K_R = a C_R \quad \dots(11)$$

$$K_G = b C_G \quad \dots(12)$$

$$K_B = c C_B \quad \dots(13)$$

a, b และ c : ค่าสัมประสิทธิ์ของความเข้มสีของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

C_R , C_G และ C_B : ความเข้มสีของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

ในการทำนายค่าสีผสม และหาค่าสเปกตรัมของสีที่ทำนาย โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของหมึกพิมพ์สีผสม (K_{MIX}) ดังสมการที่ (14) และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของหมึกพิมพ์สีผสม (S_{MIX}) ดังสมการที่ (15)

$$K_{MIX} = K_R + K_G + K_B \quad \dots(14)$$

$$S_{MIX} = S_R + S_G + S_B \quad \dots(15)$$

K_R , K_G , และ K_B : ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

S_R , S_G , และ S_B : ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ

2. ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายสีจากค่าสเปกตรัม

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายค่าสีจากค่าสีไฟล์ดิจิทัล RGB กับสเปกตรัมการสะท้อนแสง ดังรูปที่ 2 มีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

2.1 กำหนดค่าสีไฟล์ดิจิทัล RGB ของชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของกระบวนการที่สร้างขึ้น (Test set) ประกอบด้วย สีแดง (R) สีเขียว (G) และ สีน้ำเงิน (B), สีเทา (Gray scale) และสีผสมระหว่างสี RGB ทั้งหมด 100 สี

2.2 นำค่าสีของชุด Test set โดยการคำนวณย้อนกลับของแบบจำลองทำนายค่าสีจากข้อมูลสเปกตรัม (สเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ได้จากการทำนาย)

2.3 พิมพ์ชุด Test set บนกระดาษขาว ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท canon IP9950 โดยตั้งค่าปิดระบบการจัดการสีของเครื่องพิมพ์ก่อนการพิมพ์

2.4 วัดค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงของชุด test set (สเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร ทุก 10 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ x-rite

2.5 วิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองทำนายสีจากสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่วัด (Measured) กับสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ทำนาย (Estimated) ดังนี้

2.5.1 คำนวณหาค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) ดังสมการที่ (16)

$$RMS = \sqrt{\frac{(R_{200} - \bar{R}_{200})^2 + (R_{410} - \bar{R}_{410})^2 + \dots + (R_{700} - \bar{R}_{700})^2}{N}} \quad ..(16)$$

R : สเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ได้จากการทำนาย ณ ความยาวคลื่นใดๆ

\bar{R} : สเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด ณ ความยาวคลื่นใด ๆ

N : จำนวนข้อมูลทั้งหมด

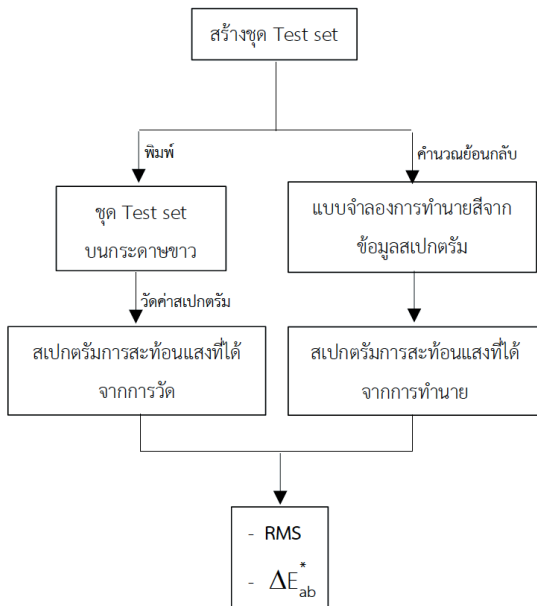
2.5.2 คำนวณหาค่าความแตกต่างสี (ΔE_{ab}^*) ในปริภูมิสี CIELAB ดังสมการที่ (17) (Rigg, 1997)

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad ..(17)$$

ΔL^* : ความแตกต่างของค่า L^* ระหว่างค่าสีที่ได้จากการทำนายกับค่าสีที่ได้จากการวัด

Δa^* : ความแตกต่างของค่า a^* ระหว่างค่าสีที่ได้จากการทำนายกับค่าสีที่ได้จากการวัด

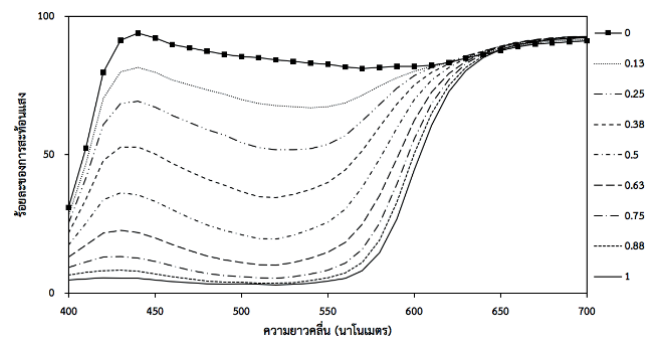
Δb^* : ความแตกต่างของค่า b^* ระหว่างค่าสีที่ได้จากการทำนายกับค่าสีที่ได้จากการวัด



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายสีจากค่าสเปกตรัม

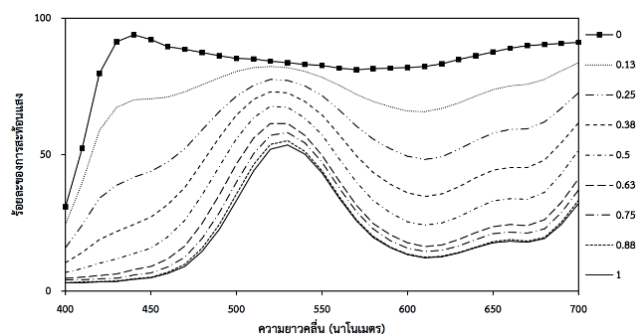
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการสร้างกระบวนการ (Training set) เพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายค่าสีของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ความเข้มสีต่างๆ บนกระดาษขาวมีค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสง ดังรูปที่ 3 ถึง 5 พบว่า การสะท้อนแสงของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินที่ความเข้มสีเท่ากับ 0 หรือไม่มีการพิมพ์หมึกพิมพ์มีค่าการสะท้อนแสงสูงสุดในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงของกระดาษขาว

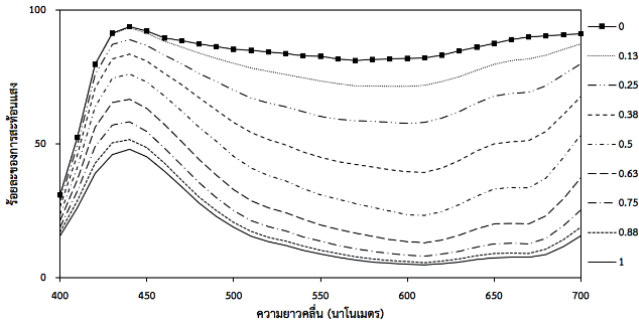


รูปที่ 3 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดงบนกระดาษขาว

ส่วนสเปกตรัมการสะท้อนแสงของความเข้มสีสูงสุดที่ระดับ 1 ของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน พบว่าการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีแดง 600 ถึง 700 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3 การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีเขียว 500 ถึง 600 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4 และการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นของสีน้ำเงิน 400 ถึง 500 นาโนเมตร ดังรูปที่ 5

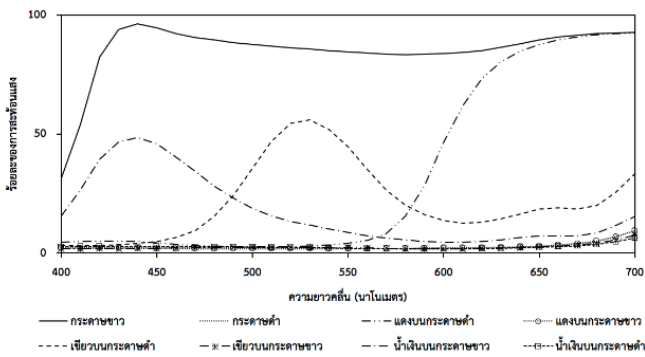


รูปที่ 4 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีเขียวบนกระดาษขาว



รูปที่ 5 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีน้ำเงินบนกระดาษขาว

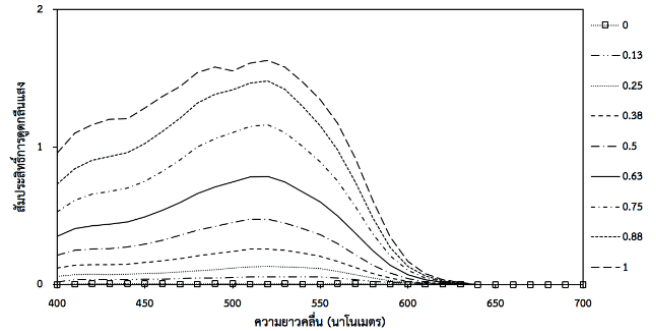
เมื่อระดับความเข้มข้นสีลดลง ความเข้มตัวสีจะลดลง และมีความสว่างสีเพิ่มขึ้น เพราะมีการสะท้อนแสงสีในช่วงความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าความเข้มสีของสีแปรผันตรงกับความเข้มตัวสี แต่แปรผกผันกับความสว่าง



รูปที่ 6 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของกระดาษสีขาว (R_{gw}) และสีดำของวัสดุพิมพ์ (R_{gb}) บริเวณพื้นที่บัพของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินบนกระดาษขาว (R_w) และบนกระดาษดำ (R_b)

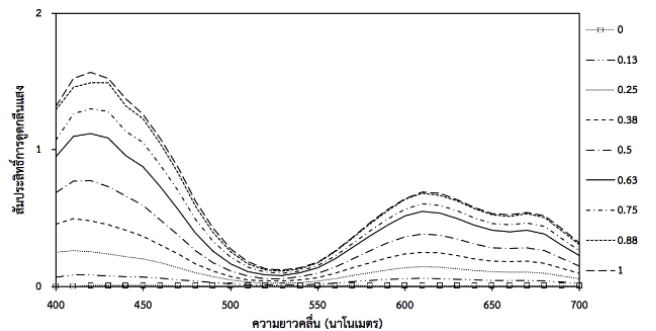
จากรูปที่ 6 สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 บนกระดาษขาว พบว่าการสะท้อนแสงของสีแดงมีค่าในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 ถึง 700 นาโนเมตร และสีเขียวอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500 ถึง 600 นาโนเมตร และสีน้ำเงินอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 500 นาโนเมตร แต่สเปกตรัมการสะท้อนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินบนกระดาษดำมีค่าเท่ากันในทุกช่วงความยาวคลื่น และมีค่าใกล้เคียงกับการสะท้อนแสงของกระดาษดำที่ไม่มีสารพิมพ์หมึก แสดงว่าหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ท

เป็นหมึกพิมพ์อิงค์เจ็ทโปร่งแสง จึงมีการหักเหการสะท้อนแสงของชั้นหมึกพิมพ์ทึบแสง เพื่อให้การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยสมการคูเบลคา-มังก์มีค่าความถูกต้องมากที่สุด



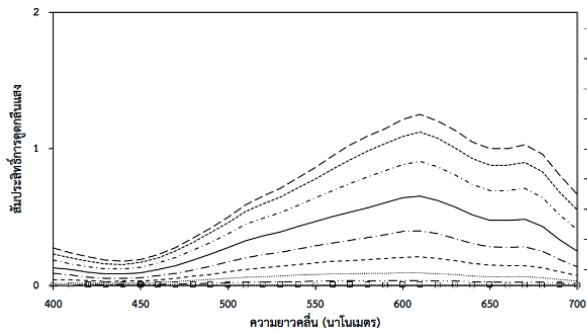
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความเข้มสีของสีแดง

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าสีแดงมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 600 นาโนเมตรเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความเข้มสีของสีเขียว

จากรูปที่ 8 พบว่าสีเขียวมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 500 นาโนเมตร และในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 ถึง 700 นาโนเมตรเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูกลืนแสงกับความเข้มสีของสีน้ำเงิน

จากรูปที่ 9 พบว่าสีน้ำเงินมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 500 ถึง 700 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มสีเพิ่มขึ้น

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูกลืนแสงแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสีกับค่าการดูดกลืนแสงได้

ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายค่าสี

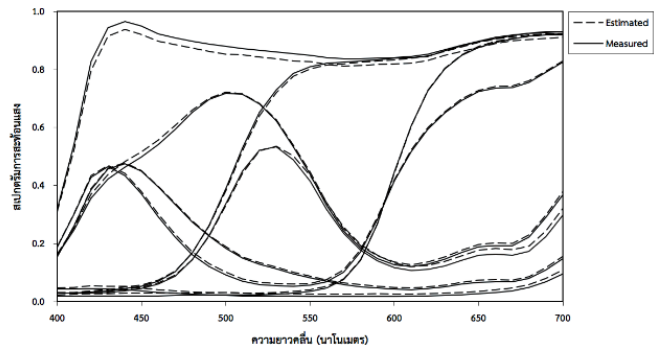
ในการวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณของชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของกระบวนการที่สร้างขึ้น (Test set) ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A, D65 และ F11 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า ΔE^*_{ab} และค่า RMS ของชุดสีทดสอบ

ชุดสีทดสอบ	ΔE^*_{ab}			RMS
	A	D65	F11	
Median	2.41	2.43	2.25	0.0090
Mean	2.44	2.61	2.44	0.0109
Minimum	0.95	1.02	1.00	0.0052
Maximum	4.83	4.57	4.78	0.0233
Std.	1.31	1.18	1.19	0.0060

จากตารางที่ 1 พบว่าค่า ΔE^*_{ab} ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A, D65 และ F11 มีค่า Median และค่า Mean ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่า Standard deviation (Std.) พบว่าภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A, D65 และ F11 มีค่าเท่ากับ 1.31, 1.18 และ 1.19 ตามลำดับ ในส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (RMS) มีค่า Mean และ Standard deviation (Std.) ใกล้เคียง

กัน แสดงว่าความผิดพลาดของการทำนายค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันนั้นจะไม่เกิดปรากฏการณ์เมแทเมอร์ซีมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัม การสะท้อนแสงที่วัด (Measured) กับสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ทำนาย (Estimated)

จากรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่วัด (Measured) กับสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ทำนาย (Estimated) พบว่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงของชุด Test set ที่ผ่านแบบจำลองการทำนายค่าสีมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัด ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร

สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยเพื่อหาแบบจำลองทำนายค่าสีของหมึกพิมพ์ที่โปร่งแสงพัฒนาจากสมการคูเบลคา-มังก์ โดยการสร้างฐานข้อมูลของแบบจำลองทำนายค่าสี (Training set) ค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB ที่ระดับความเข้มสีแตกต่างกัน 9 ระดับ จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีจากไฟล์ดิจิทัล RGB และสเปกตรัมการสะท้อนแสง ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทำนายค่าสีจากชุดตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของกระบวนการที่สร้างขึ้น (Test set) ในการทำนายสเปกตรัมการสะท้อนแสงจากค่าสีไฟล์ดิจิทัล RGB พบว่ามีค่าเฉลี่ยความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab}) จากชุด Test set ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง A, D65 และ F11 เท่ากับ 2.44, 2.61 และ 2.44 ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนรากกำลังสอง (RMS) มีความ

ใกล้เคียงกัน แสดงว่าแบบจำลองการทำนายค่าสีจากสเปกตรัมนี้สามารถช่วยลดแนวโน้มการเกิดเมแทเมอร์ซีมเนื่องด้วยแหล่งกำเนิดแสงได้

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้กำหนดความเข้มสี 9 ระดับ ควรเพิ่มระดับความเข้มสีให้มากขึ้น
2. งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายค่าสีของการพิมพ์อิงค์เจ็ท ควรศึกษาการทำนายค่าสีของการพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- Di-yuan, T. and Roy, S.B. 2009. Spectral-based ink selection for multiple-ink printing I. Colorant estimation of original objects. Color and Imaging Conference. **6th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings**. 106-111.
- Džimbeg-Malčić, V., Barbarić-Mikočević, Ž. and Itrić, K. 2011. Kubelka-Munk theory in describing optical properties of paper (I). **Technical Gazette**. 18(1): 117-124. Retrieved from <http://hrcak.srce.hr/65936>.
- Francisco, I., Mitchell, R., Dave, W., Roy, B. and Di-Yuan, T. 2001. Spectral reproduction from scene to hardcopy I: Input and Output. **Proceedings of the SPIE**. 4306: 346-357.
- Nobbs, J.H. 1997. Colour-match prediction for pigmented materials. In M.R. (Ed.), **Colour physics for industry** (2nd ed., pp. 292-372). West Yorkshire: Society of Dyes and Colourists.
- Qu, Y., Zitinski Elias, P. and Gooran, S. 2014. Color prediction modeling for five-channel CMYLcLm printing, SPIE 9015, **Color Imaging XIX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications**. 901508-1-901508-11.

- Rigg, B. 1997. Colorimetry and the CIE system. In M.R. (Ed.), **Colour physics for industry** (2nd ed., pp. 81-120). West Yorkshire: Society of Dyes and Colourists.
- Rosen, M., Hattenberger, E. and Ohta, N. 2004. Spectral redundancy in a six-ink ink jet printer. **Journal of Imaging Science and Technology**. 48(3): 194-202.
- Tzeng, D. and Berns, R.S. 1999. Spectral based ink selection for multiple-ink printing II. Optimal Ink Selection. **IS&T/SID Color Imaging Conference**. 182-187.
- Tzeng, D. and Berns, R.S. 2000. Spectral-based six-color separation minimizing metamerism. **IS&T/SID Color Imaging Conference**. 342-347.