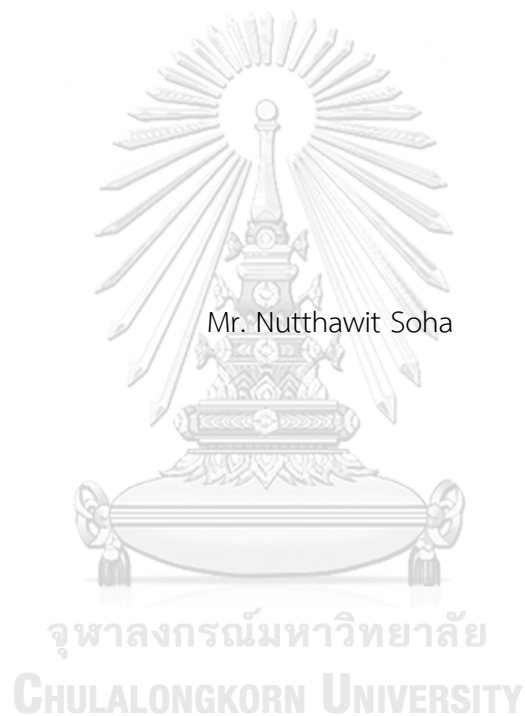


การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้
โครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENCY OF UV FLEXOGRAPHIC INK COLOR MATCH PREDICTION ON
POLYPROPYLENE LABEL USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND COLOR MATCH
PREDICTION SOFTWARE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Imaging Technology
Department of Imaging and Printing Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสี
โดย	นายณัฐวิทย์ โสหา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุพิพัฒน์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ หาญสืบสาย)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์พรทวี พึ่งรัมย์)	

ณัฐวิทย์ โสหา : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสี. (EFFICIENCY OF UV FLEXOGRAPHIC INK COLOR MATCH PREDICTION ON POLYPROPYLENE LABEL USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND COLOR MATCH PREDICTION SOFTWARE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พิชญุดา เกตุเมฆ

การพิมพ์ฉลากสินค้ามีจุดประสงค์หลักเพื่อโฆษณาสินค้าให้ดึงดูดความสนใจจากผู้บริโภค ดังนั้นการพิมพ์สีพิเศษนอกจากการพิมพ์สอดสี CMYK จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยสีพิเศษนี้จะต้องได้รับการผสมและเทียบสีกับสีตั้งต้นมาตรฐานที่ได้จากเจ้าของผลิตภัณฑ์หรือผู้ออกแบบ ขั้นตอนวิธีของกระบวนการผสมและเทียบสีใช้วิธีลองและวนทำซ้ำ เป้าหมายของกระบวนการคือ ความรวดเร็ว ความเที่ยงตรงและแม่นยำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Multilayer perceptron (MLP) และโดยใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีเชิงพาณิชย์ ฐานข้อมูลหมึกพิมพ์สำหรับการทำนายสูตรสีของทั้ง 2 วิธีมีความแตกต่างกัน แต่เกิดจากสีปฐมภูมิ 8 สีเหมือนกัน สำหรับซอฟต์แวร์ทำนายสีเชิงพาณิชย์นั้น ใช้ฐานข้อมูลหมึกพิมพ์ที่เตรียมจากสีปฐมภูมิ 7 สีนำมาเจือจางด้วยเม็ดสีให้มีความเข้มข้น 8 ระดับ (รวมความเข้มข้นที่ 100 เปอร์เซ็นต์) แล้วนำมาพิมพ์บนฉลากพอลิโพรพิลีน จากนั้นวัดค่าการสะท้อนแสงเพื่อนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและสัมประสิทธิ์กระจายแสง สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP ใช้ฐานข้อมูลหมึกพิมพ์ที่เตรียมจากการผสมสีปฐมภูมิ 2 สีเข้าด้วยกัน (จากทั้งหมด 7 สี) ให้เป็นสีทุติยภูมิที่สัดส่วนต่าง ๆ กันเป็นจำนวน 159 สี และสีตติยภูมิที่เกิดจากการผสมสีปฐมภูมิ 3 สีที่สัดส่วนต่าง ๆ กันเป็นจำนวน 105 สี จากนั้นพิมพ์ลงฉลากพอลิโพรพิลีน และวัดค่าการสะท้อนแสงเช่นเดียวกัน จากนั้นสุ่มฐานข้อมูลสี 80 เปอร์เซ็นต์มาฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม (training set) โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน (hidden unit) เพื่อความเหมาะสม จากนั้นทดสอบการทำนายและเทียบสีโดยใช้ทั้งซอฟต์แวร์ทำนายสีเชิงพาณิชย์และโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยชุดสีทดสอบจำนวน 15 สี เปรียบเทียบค่าความต่างสี (ΔE^*_{94}) ระหว่างชุดสีทดสอบและสีที่เกิดจากการทำนาย เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเตรียมฐานข้อมูลและต้นทุน พบว่าการทำนายสีด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีดีกว่าเนื่องจากค่าความต่างสีน้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการเตรียมฐานข้อมูลมากกว่าจึงส่งผลให้ต้นทุนที่สูงกว่า ในขณะที่ความรวดเร็วในการทำนายสีใกล้เคียงกัน

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางภาพ

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5872119023 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORD: artificial neural network; UV flexographic ink; color match prediction

Nutthawit Soha : EFFICIENCY OF UV FLEXOGRAPHIC INK COLOR MATCH PREDICTION ON POLYPROPYLENE LABEL USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND COLOR MATCH PREDICTION SOFTWARE. Advisor: Assoc. Prof. Dr. PICHAYADA KATEMAKE

Most printed labels required customer attention. Consequently, they employ extra or special colors apart from 4-color process, CMYK. These special colors need being matched with the standard colors which are given by brand owner or designer beforehand. The algorithm of color matching process usually includes iterative method. The goals of the process are accuracy, precision and high speed. This research is aimed to compare the efficiency of UV flexographic ink color match prediction on polypropylene label using artificial neural network (ANN) and color match prediction (CMP) software. The Multilayer perceptron ANN ; MLPANN and X-Rite ink formulation software were employed. Preparation of ink database for both methods were different. However, the number of primary colors or inks used for comparison were the same. For the CMP method, 8 levels of ink concentration including 100% ink were made by diluting ink with medium into 7 levels and printed on polypropylene label. Their spectral reflectances were measured and the absorption and scattering coefficients were subsequently calculated for all concentrations. For the MLPANN method, 2 of primary inks were mixed to obtain 159 secondary mixtures and 3 of primary inks were mixed to obtain 105 tertiary mixtures. They were printed on to the same substrate. Again their spectral reflectances were recorded. Eighty percentage of database then were randomly selected for training set. The number of hidden units in hidden layer were optimized. In the CMP process using software and single-output ANN method, 15 color test samples were used and CIE color differences (ΔE^*_{94}), between samples and predicted formulae were used as one of evaluation criteria in terms of accuracy apart from speed of calculation, time of making database and cost. We found that the vantage of the MLPANN is accuracy with less average ΔE^*_{94} , whereas the disadvantages are time consuming in making database which consequently the labour cost is high. Speed of calculation is approximately the same.

Field of Study: Imaging Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยชี้แนะ ดูแลและให้คำปรึกษาแนะนำสิ่งต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงาน อีกทั้งยังช่วยตรวจสอบและแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุพิพัฒน์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ ชาญสืบสาย และรองศาสตราจารย์พรทิวี พิงรัศมี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำปรึกษาในด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท แอนวิล(ไทย) จำกัด ที่เอื้อให้ความอนุเคราะห์หมึกพิมพ์ยูวีเฟสโซกราฟี และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอเวอร์รี่ เดนนิสสัน (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเพื่อวัสดุที่ใช้พิมพ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวที่คอยช่วยเหลือ ส่งเสริมและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณัฐวิทย์ โสหา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์.....	3
2.1 แบบจำลองเซลล์ประสาท.....	3
2.2 โครงข่ายประสาทเทียม.....	4
2.3 ทฤษฎีมีลติฟลักซ์.....	8
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	12
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	15
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	20
4.1 ซอฟต์แวร์การทำงานายสี.....	20

4.2 โครงข่ายประสาทเทียม	24
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพซอฟต์แวร์การทํานายสีกับโครงข่ายประสาทเทียม	31
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	34
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	35
บรรณานุกรม.....	36
ภาคผนวก.....	39
ตารางแสดงชุดหมึกพิมพ์ทุติยภูมิ	39
ตารางแสดงหมึกพิมพ์ตติยภูมิ.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	49



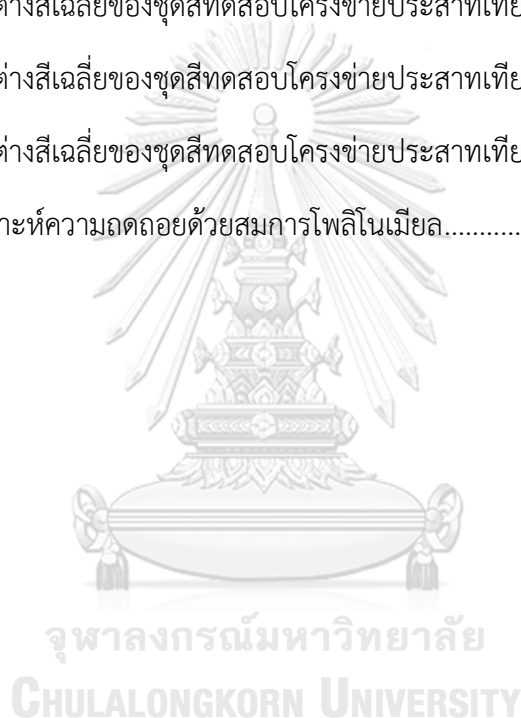
สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94}) ของหมึกพิมพ์ชุดทดสอบ 15 สี ที่ซอฟต์แวร์คำนวณได้เมื่อเทียบกับงานพิมพ์.....	23
ตาราง 4.2 ค่าความต่างสีเฉลี่ย ค่าความต่างสีน้อยที่สุด ($\min \Delta E^*_{94}$) และค่าความต่างสีมากที่สุด ($\max \Delta E^*_{94}$) ของโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีในการฝึกสอน	29
ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติต่างๆสำหรับขั้นตอนวิธี Trainbr.....	29
ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างสี ΔE^*_{94} ของหมึกชุดทดสอบระหว่างการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสีกับโครงข่ายประสาท-เทียม	31
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบด้านต่าง ๆ ระหว่างการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสีกับโครงข่ายประสาทเทียมในการทำฐานข้อมูล	32

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ภาพจำลองเซลล์ประสาทของมนุษย์.....	3
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม.....	4
ภาพที่ 2.3 การทำงานของนิวรอน.....	5
ภาพที่ 2.4 ฟังก์ชัน transfer แบบต่างๆ.....	6
ภาพที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบ feedforward และแบบ recurrent.....	6
ภาพที่ 2.6 ไดอะแกรมการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม.....	7
ภาพที่ 2.7 โมเดลทางกายภาพของของทฤษฎีมีลติพลิกซ์.....	8
ภาพที่ 3.1 เครื่องชั่งน้ำหนักรุ่น MS3002SE ยี่ห้อ Mettler Toledo.....	13
ภาพที่ 3.2 เครื่องพิมพ์จำลองรุ่น K Lok Proofers.....	13
ภาพที่ 3.3 เครื่องอบรังสียูวี American Ultraviolet.....	14
ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดสี X-Rite รุ่น eXact.....	15
ภาพที่ 3.5 ซอฟต์แวร์การทำนายสี Ink formulation 6.....	16
ภาพที่ 3.6 ซอฟต์แวร์ Matlab รุ่น R2016b.....	17
ภาพที่ 3.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	19
ภาพที่ 4.1 ซอฟต์แวร์การทำนายสี.....	20
ภาพที่ 4.2 การสะท้อนแสงของชุดสีปฐมภูมิที่ใช้ในการทดลอง.....	20
ภาพที่ 4.3 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีไฮแอนท์ความเข้มข้นต่างๆ.....	21
ภาพที่ 4.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีมาเจนดาท์ความเข้มข้นต่างๆ.....	21
ภาพที่ 4.5 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีเหลืองท์ความเข้มข้นต่างๆ.....	21
ภาพที่ 4.6 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีดำท์ความเข้มข้นต่างๆ.....	22
ภาพที่ 4.7 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีขาวท์ความเข้มข้นต่างๆ.....	22

ภาพที่ 4.8 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ	22
ภาพที่ 4.9 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ	23
ภาพที่ 4.10 ค่าสี L^* a^* และ b^* ของชุดสีฝึกสอนและชุดสีทดสอบทั้งหมด 272 สี	25
ภาพที่ 4.11 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	26
ภาพที่ 4.12 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	26
ภาพที่ 4.13 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	27
ภาพที่ 4.14 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	27
ภาพที่ 4.15 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	28
ภาพที่ 4.16 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม	28
ภาพที่ 4.17 การวิเคราะห์ความถดถอยด้วยสมการโพลิโนเมียล.....	30



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันอุตสาหกรรมกราฟิกพิมพ์มีบทบาทในการขับเคลื่อนการดำเนินชีวิตของมนุษย์เพื่อใช้เป็นสื่อกลางในการสื่อสารระหว่างผู้ส่งสารและผู้รับสาร เช่น การเผยแพร่ข้อมูลข่าวสารทางหนังสือพิมพ์ หรือใช้ในการเรียนการสอนในหนังสือแบบเรียน หรือใช้เพื่อความบันเทิง เช่น นิตยสาร หนังสือการ์ตูน นอกจากนี้ยังใช้ในการโฆษณาหรือให้ข้อมูลทางด้านสินค้าอีกด้วย โดยเฉพาะการพิมพ์บนฉลากสินค้า ซึ่งในปัจจุบันมีการแข่งขันกันสูงเพื่อสินค้ามีความโดดเด่นและเป็นจุดสนใจจากผู้บริโภค ดังนั้นการพิมพ์สื่อดิจิทัล CMYK จึงไม่เพียงพอเพราะไม่สามารถให้เฉดสีบางเฉดสีที่ผู้ผลิตสินค้าต้องการได้และหากผลิตเฉดสีที่ต้องการได้ เฉดสีดังกล่าวมักมีความไม่คงที่ เพื่อเป็นการตอบโจทย์ผู้ผลิตสินค้าที่มีความต้องการให้ฉลากสินค้ามีสีสันสดใส สวยงามดึงดูดผู้บริโภค และมีสีที่แน่นอนเอกลักษณ์เฉพาะของตนเอง การใช้สีพิเศษจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งในอดีตการผลิตสีพิเศษขึ้นมาต้องใช้ช่างผสมสีที่มีความรู้ ความชำนาญในการผสมเพื่อให้ได้เฉดสีที่ต้องการและเพื่อประหยัดเวลาในการค้นหาสูตรสี

ต่อมาได้มีการพัฒนานำซอฟต์แวร์การทำนายสีเข้ามาใช้เพื่อทำให้การผลิตสีพิเศษนั้นง่ายขึ้นทำให้ผู้ไม่มีประสบการณ์หรือมีประสบการณ์น้อยก็สามารถทำได้[1] และเพิ่มความรวดเร็วในการผลิตสีพิมพ์เพื่อให้ได้ทันเวลาตามที่ถูกคำสั่งการ การใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการทำนายสูตรสีพิเศษจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเพราะมีความสะดวก รวดเร็ว แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพในการทำนายสูตรสีพิเศษ กอปรกับปัจจุบันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาใช้ในการทำนายสูตรสีผสมอย่างแพร่หลาย ทั้งการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสีของเส้นใยฝ้าย การใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการย้อมสีหนัง และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสีของหมึกพิมพ์ออฟเซต ซึ่งทั้ง 3 แบบให้ค่าความต่างสีในการทำนายสีต่ำ แต่ยังไม่มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบ multilayer perceptron, MLP ที่มีความแม่นยำในการทำนายสีมาใช้ในการทำนายค่าการสะท้อนแสงหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP ในการทำนายสีผสมหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนวัสดุพอลิโพรพิลีน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP และโดยใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีเชิงพาณิชย์

1.2.2 เปรียบเทียบความคุ้มค่า ระยะเวลา ต้นทุนที่ใช้ในการทำนายสีของทั้ง 2 วิธีการ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพในการทำนายสีระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสีของหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีที่พิมพ์ลงบนฉลากพอลิโพรพิลีน ทั้งด้านความแม่นยำ (ΔE^*_{94}) ต้นทุน และเวลาที่ใช้ โดยใช้ตัวอย่างชุดสีทดสอบ 15 สีที่ได้จากการสุ่มจากชุดสีทั้งหมด 272 สี ที่ได้จากชุดสีปฐมภูมิ 8 สี ที่ประกอบด้วย สี CMYK สีส้ม สีเขียว สีขาวและมีเดียม และชุดสีทุดิยภูมิจำนวน 159 สี ที่เกิดจากการผสมสีปฐมภูมิ 2 สีที่ความเข้มข้นต่างกัน และชุดสีตติยภูมิจำนวน 105 สีที่เกิดจากการผสมสีปฐมภูมิจำนวน 3 สีที่ความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งสร้างฐานข้อมูลจากการพิมพ์หมึกพิมพ์ปฐมภูมิ 8 สีและทุดิยภูมิที่เจือจางด้วยมีเดียมที่ระดับความเข้มข้น 1% 2% 4% 8% 16% 32% และ 64% จำนวน 57 สีจากนั้นวัดค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ที่ความยาวช่วงคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องวัดสี (spectrophotometer) เพื่อเก็บค่าสำหรับซอฟต์แวร์การทำนายสีในการสร้างฐานข้อมูล ส่วนโครงข่ายประสาทเทียมสร้างฐานข้อมูลจากชุดสีฝึกสอนจำนวน 257 สีที่เกิดจากชุดสีปฐมภูมิ ทุดิยภูมิและตติยภูมิรวมกัน จากนั้นวัดค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ที่ความยาวช่วงคลื่น 400 – 700 นาโนเมตรโดยใช้เครื่องวัดสี เพื่อเก็บค่า แล้วนำไปฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการฝึกสอนทั้งหมด 6 แบบได้แก่ Bayesian regularization backpropagation, Trainbr, Levenberg – Marquardt backpropagation, Trainlm, BFGS quasi-Newton backpropagation, Trainbfg, Resilient backpropagation, Trainrp, One-step secant backpropagation, Trainoss และ Scaled conjugate gradient backpropagation พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อนของแต่ละวิธีตั้งแต่ 1 – 30 ยูนิต เพื่อเลือกขั้นตอนวิธีและจำนวนยูนิตซ่อนที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดนำไปเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์การทำนายสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

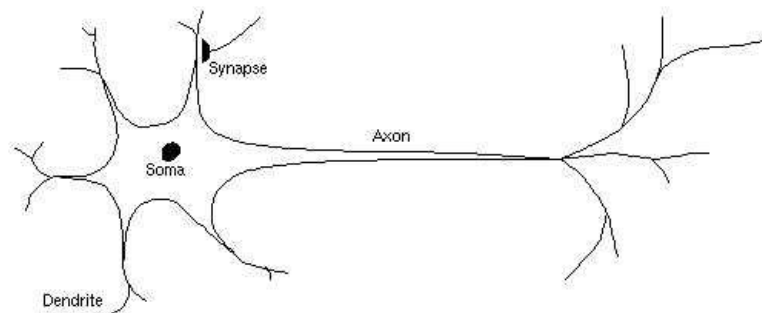
1.4.1 ข้อมูลได้ประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับซอฟต์แวร์การทำนายสี

1.4.2 ได้รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ทำนายสูตรสีของหมึกยูวีเฟล็กโซกราฟี

บทที่ 2

ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์

2.1 แบบจำลองเซลล์ประสาท



ภาพที่ 2.1 ภาพจำลองเซลล์ประสาทของมนุษย์ [1]

โครงข่ายประสาทเทียมนี้มีพื้นฐานมาจากการทำงานของเซลล์ประสาทหรือนิวรอนในสมองของมนุษย์ นิวรอนประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ ที่มีชื่อเรียกทางชีววิทยาว่า ไบประสาทนำเข้าหรือเดนไดรต์ (dendrites) โซมา (soma หรือ cell body) แกนประสาทนำออกหรือแอกซอน (axon) และไซแนปส์ (synapses) หรือจุดประสานประสาท โดยปกติเดนไดรต์จะมีสาขายื่นออกไปจากตัวเซลล์มากมาย โดยแต่ละสาขาค่อย ๆ และสามารถยื่นออกไปได้ไกลสุด 200 – 300 นาโนเมตร ส่วนแอกซอนจะยื่นออกจากตัวเซลล์ที่ axon hillock และสามารถไปได้ไกลโดยมีสาขาร้อย แต่ไม่เหมือนกับเดนไดรต์ตรงที่แอกซอนจะดำรงขนาดไปจนสุด โซมาอาจจะมีเดนไดรต์มากมายแต่จะมีแอกซอนเพียงแค่อันเดียวเท่านั้น ดังภาพที่ 2.1

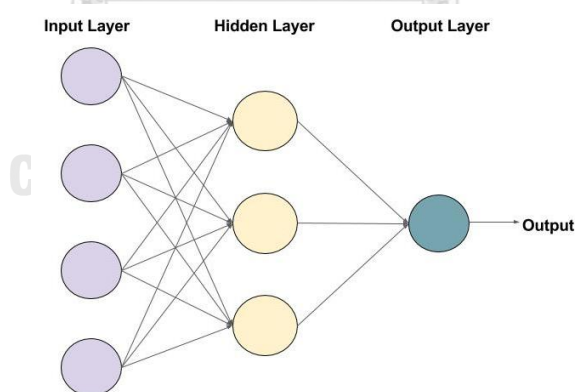
นิวรอนมีหน้าที่หลักอยู่สองประการ คือการคำนวณประมวลผล และการส่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณออกไปยังเซลล์ประสาทอื่นอย่างรวดเร็ว ผ่านปลายประสาทอีกด้านหนึ่งด้วยการทางไฟฟ้า โดยหลักการทำงานของนิวรอนก็คือเมื่อได้รับข้อมูลอินพุต (input) จากเซลล์ประสาทอื่น ๆ ที่ส่งผ่านมาทางแอกซอนผ่านจุดประสานประสาท รวมเข้ามาผ่านทางเดนไดรต์ ก็จะนำมาประมวลผลที่โซมา โดยสัญญาณที่ส่งอาจจะเป็นแบบเร้า (excitatory) หรือแบบห้าม (inhibitory) ถ้าการเร้าสุทธิที่นิวรอนได้รับในระยะเวลาสั้น ๆ มีระดับเพียงพอ นิวรอนก็จะสร้างพัลส์ที่เรียกว่า ศักยะงาน (action potential) เริ่มที่ตัวเซลล์แล้วส่งไปอย่างรวดเร็วทางแอกซอน เมื่อถึงที่สุด ปลายนิวรอน (axon

terminal) ก็จะส่งสัญญาณต่อที่จุดประสานประสาทไปยังนิวรอนอื่น ๆ ที่เชื่อมต่อแล้วส่งข้อมูลที่ได้รับการประมวลผลแล้วกลับไปผ่านทางแอกซอนไปยังไซแนปส์เพื่อสื่อสารกับเซลล์ภายนอก

จากหลักการทำงานของนิวรอน ทำให้มนุษย์เกิดการเรียนรู้และความทรงจำขึ้นได้ โดยการเรียนรู้ของมนุษย์จะไม่ได้เกิดกับนิวรอนหรือไซแนปส์เพียงจุดเดียวหรือเซลล์เดียวแต่จะเกิดกับหลายนิวรอนพร้อมกัน ก่อให้เกิดรูปแบบความทรงจำในส่วนตัวส่วนหนึ่งของสมองขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของการเรียนรู้

2.2 โครงข่ายประสาทเทียม

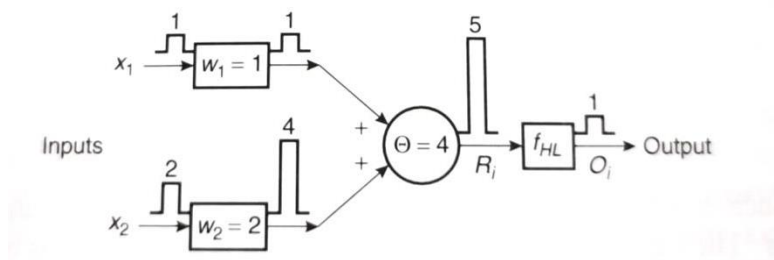
โครงข่ายประสาทเทียมมีส่วนประกอบคล้ายกับนิวรอนของมนุษย์กล่าวคือประกอบด้วย 4 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนรับข้อมูลหรืออินพุตยูนิต (input unit) ส่วนประมวลผลยูนิตหรือยูนิตซ่อน (hidden unit) ส่วนส่งออกข้อมูลหรือเอาต์พุตยูนิต (output unit) และค่าน้ำหนัก (weight) โดยข้อมูลที่ต้องการศึกษาหรือตัวแปรต้นจะถูกใส่เข้าไปในอินพุตยูนิตที่อยู่ในชั้นอินพุต (input layer) ดังวงกลมสีม่วงอ่อนในภาพที่ 2.2 จากนั้นข้อมูลจะเดินทางไปข้างหน้าเข้าสู่ยูนิตซ่อนทุกยูนิตที่อยู่ในชั้นซ่อน (Hidden layer) ดังวงกลมสีครีมในภาพที่ 2.2 โดยแต่ละเส้นทางของการเชื่อมต่อจะมีค่าเท่าใดขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักและข้อมูลจะได้รับการประมวลผลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาและเดินทางออกจากทุกยูนิตซ่อนสู่เอาต์พุตยูนิตที่อยู่ในชั้นเอาต์พุต (output layer)



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม [2]

การทำงานของนิวรอนแต่ละยูนิตโดยแต่ละยูนิตของโครงข่ายประสาทเทียมมีลักษณะการทำงานดังนี้ ข้อมูลที่นำเข้าแต่ละค่า (X_1 และ X_2) จะได้รับการคูณด้วยค่าน้ำหนัก (w_1 หรือ w_2) ในเส้นทางนั้น ๆ จากนั้นข้อมูลที่ได้รับการคูณแล้วจะนำมาหาผลรวมของข้อมูลทั้งหมด ในกรณีที่ข้อมูลมีค่ามากกว่าขีดจำกัดเริ่มเปลี่ยน (Threshold; \sim) นิวรอนก็จะส่งสัญญาณ (R) ไปยังฟังก์ชัน

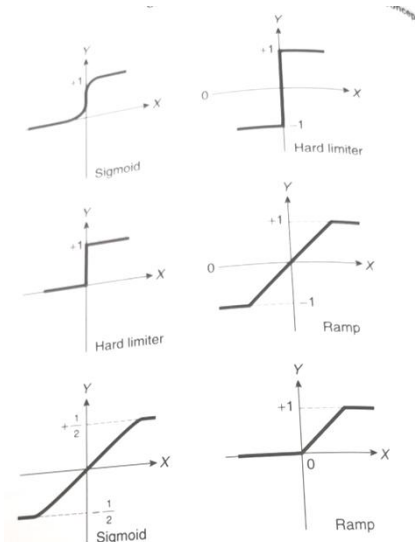
transfer (transfer function) เพื่อแปลงสัญญาณ R_i ให้เป็นข้อมูลเอาต์พุต (O_i) ออกมาเพื่อส่งออกไปยังยูนิตถัดไป เรียกยูนิตที่เป็นส่วนหนึ่งของเครือข่ายที่ประกอบไปด้วยหลายๆ นิวรอนว่า node [3]



ภาพที่ 2.3 การทำงานของนิวรอน

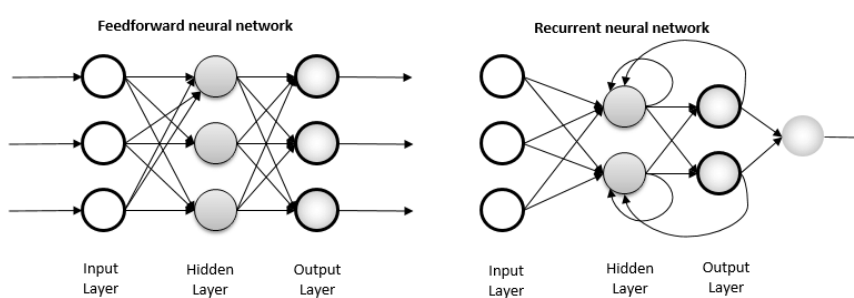
ฟังก์ชัน transfer ที่ใช้ในนิวรอนมีจุดประสงค์เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในนิวรอนที่จะถูกส่งออกมามีความต่อเนื่องและไม่ขาดหายจากการถูกกระตุ้นด้วยข้อมูลปริมาณต่าง ๆ กันไม่ว่าปริมาณน้อย หรือปริมาณมาก ส่งผลให้การทำงานของนิวรอนเป็นไปได้อย่างราบรื่นและส่งสัญญาณออกอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้มีจุดประสงค์เพื่อแปลงสัญญาณ R_i ที่เกิดขึ้นว่าส่งข้อมูลเอาต์พุต (O_i) ออกมาในรูปแบบใด

ฟังก์ชัน transfer ที่นิยมใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมมี 2 แบบได้แก่ แบบ hard limiter และแบบ sigmoid โดยแต่ละแบบจะมีขีดจำกัดล่าง (lower limit) และขีดจำกัดบน (upper limit) แตกต่างกันไป เช่น ± 1 หรือ $\pm \frac{1}{2}$ เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการตั้งค่าของแต่ละโครงข่าย โดยแบบ sigmoid เป็นที่นิยมมากเพราะมีความสัมพันธ์แบบ monotonic ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและเป็นแบบ nonlinear [4] ซึ่งสามารถจำแนกเอาต์พุตออกมาได้หลายระดับ ในขณะที่แบบ hard limiter เป็นแบบ non - monotonic ส่งผลให้เอาต์พุตออกมาเพียง 2 ระดับ ไขกับไม่ใช่เท่านั้น



ภาพที่ 2.4 ฟังก์ชัน transfer แบบต่างๆ

โครงข่ายประสาทเทียมแบ่งตามลักษณะการเดินทางของข้อมูลได้ 2 แบบได้แก่ข้อมูลมีการเดินทางไปข้างหน้าอย่างเดียวเรียกว่าแบบ feedforward และหากข้อมูลมีการเดินทางย้อนกลับมาก็จะเรียกว่าแบบ recurrent ดังภาพที่ 2.5



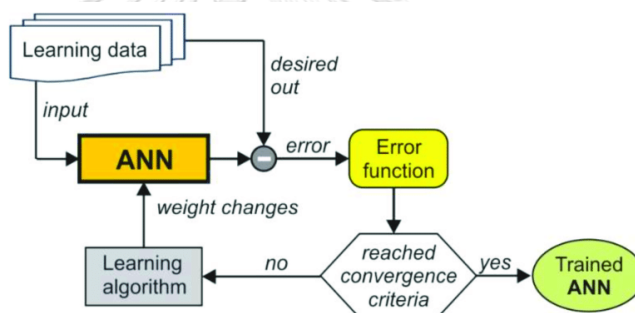
ภาพที่ 2.5 โครงข่ายประสาทเทียมรูปแบบ feedforward และแบบ recurrent [5]

โครงข่ายประสาทเทียมแบบ feedforward ยังสามารถแยกย่อยออกไปได้อีกหลากหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้งาน ได้แก่ แบบ perceptron และแบบ multilayer perceptron (MLP) โดยแบบ perceptron เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบพื้นฐานที่สุด ประกอบไปด้วยชั้นเอ้าท์พุท 1 ชั้นที่มีเอ้าท์พุทยูนิตอยู่ด้านใน ส่วนอินพุทจะถูกป้อนข้อมูลเข้าสู่เอ้าท์พุทยูนิตโดยตรงผ่านค่าน้ำหนักผลรวมของค่าน้ำหนักและข้อมูลอินพุทได้รับการคำนวณในแต่ละยูนิต หากค่าเอ้าท์พุทมีมากกว่าขีดจำกัดเริ่มเปลี่ยน (threshold ปกติมีค่า 0) ค่าเอ้าท์พุทที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 (deactivated) ส่วนแบบ MLP นั้นมีการเพิ่มจำนวน layer ขึ้นมาอีกอย่างน้อย 1 layer โดยแต่ละยูนิตที่อยู่ในแต่ละชั้นจะมีการเชื่อมต่อไปข้างหน้ากับยูนิตที่อยู่ในชั้นถัดไป โดยโครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP สามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ดีขึ้นมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบ perceptron

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมีหลากหลายแบบ [6] โดยเป็นกระบวนการที่โครงข่ายประสาทเทียมค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมกับข้อมูลอินพุทอย่างครอบคลุม ซึ่งเมื่อค้นหาความสัมพันธ์ได้แล้วโครงข่ายประสาทเทียมจะทำนายผลเอ้าท์พุทออกมา การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมมีลักษณะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อมีการนำข้อมูลเข้ามาในระบบโครงข่ายประสาทเทียมจะเลือกทำการจดจำความสัมพันธ์นั้นๆหรือพัฒนาความสัมพันธ์ใหม่โดยการ

ปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้ข้อมูลเอาต์พุตที่ทำนายออกมามาตรงกับข้อมูลที่ต้องการ เมื่อกระบวนการเรียนรู้เสร็จสิ้นโครงข่ายประสาทเทียมจึงสามารถนำไปใช้งานได้

โครงข่ายประสาทเทียมแบบ feedforward ชนิด MLP มีการเรียนรู้เป็นแบบ supervised learning [7] โดยมีหลักการเรียนรู้ด้วยการหาความสัมพันธ์ (mapping) ระหว่างข้อมูลอินพุตกับข้อมูลเอาต์พุตผ่านชุดข้อมูลฝึกสอน ในการเรียนรู้แบบ supervised learning ข้อมูลอินพุต (แบบเวกเตอร์) ได้รับการจับคู่กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ (target output) จากนั้นอัลกอริทึมจะวิเคราะห์ข้อมูลชุดฝึกสอนและอนุมานฟังก์ชันออกมาเพื่อใช้ในการทำนาย ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ทำนายได้จะถูกนำกลับมาหาความแตกต่าง (error) กับค่าจริง โดยมีเป้าหมายเพื่อลดค่าความแตกต่างให้น้อยที่สุด การลดค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากนั้นส่งค่า error กลับไป (backpropagation) เพื่อปรับค่าน้ำหนักในโครงข่ายประสาทเทียม ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย จนค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้มีความแม่นยำตามเกณฑ์ที่ตั้งค่าไว้ โครงข่ายประสาทเทียมจึงจะหยุดการฝึกสอน ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ไดอะแกรมการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ backpropagation supervised learning [8]

การเรียนรู้แบบ supervised learning เป็นการเรียนรู้ที่ลอกเลียนแบบมาจากการสังเกตทางชีวภาพของมนุษย์ เช่น เมื่อนักเรียนเข้าเรียนรู้อาษาในชั้นเรียน คุณครูจะพูดคำศัพท์ต่าง ๆ ให้นักเรียนฟัง เมื่อนักเรียนรับฟัง นักเรียนจะจดจำคำศัพท์ต่างๆไว้ในหน่วยความจำในสมอง จากนั้นจะทดลองพูดออกเสียงคำศัพท์ (เอาต์พุต) นั้นๆออกมา ในขณะที่เดียวกันนักเรียนจะทำการเปรียบเทียบคำศัพท์ที่พูดออกมากับสิ่งที่คุณครูพูด (เอาต์พุตที่ต้องการ) แล้วทำการเปรียบเทียบและเรียนรู้ความแตกต่าง (error) ที่เกิดขึ้น จากนั้นนักเรียนจะทดลองพูดซ้ำไปเรื่อย ๆ โดยปรับเปลี่ยนน้ำเสียง การสะกดคำ ฯลฯ ให้เหมือนกับสิ่งที่คุณครูพูดมากที่สุด เมื่อพูดออกเสียงคำศัพท์ที่ได้เหมือนคุณครูแล้วจึงหยุดและจดจำลักษณะการพูดไว้

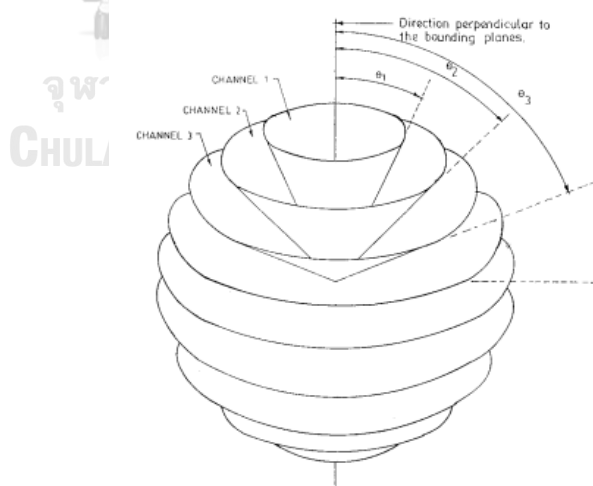
ขั้นตอนวิธีแบบ backpropagation ที่เป็นส่วนหนึ่งในการเรียนรู้แบบ supervised learning เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในโครงข่ายประสาทเทียมแบบ feedforward ชนิด MLP เพราะสามารถ

คำนวณค่าน้ำหนักของนิวรอนระหว่างเฟสของการเรียนรู้ได้ กล่าวคือโครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP ที่มีจำนวนชั้นซ่อนมากขึ้นเท่าไร การคำนวณค่าน้ำหนักในชั้นซ่อนเพื่อให้ได้ error ที่น้อยที่สุดในชั้นเอาต์พุตยังมีความยากมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากชั้นเอาต์พุตที่สามารถหาค่า error ได้ง่ายจากความต่างของค่าเอาต์พุตที่ต้องการกับค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้ ต่างจากการปรับค่าน้ำหนักของยูนิทซ่อนในชั้นซ่อนที่ต้องใช้เทคนิคบางประการเพื่อคำนวณหา error เพื่อปรับค่าน้ำหนักให้มีเอาต์พุต error ให้ออกมามีค่าน้อยที่สุด สำหรับจำนวนครั้งในการคำนวณในชั้นซ่อนเพื่อลดค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับอัลกอริธึมหรือขั้นตอนวิธีที่เลือกใช้ โดยแต่ละขั้นตอนวิธีก็จะมีเทคนิคที่ใช้แตกต่างกันออกไป

โครงข่ายประสาทเทียมนั้นเลียนแบบการทำงานของเซลล์ประสาทของมนุษย์ในด้านของความทรงจำและการเรียนรู้ เช่น สมองของมนุษย์เมื่อได้รับการเรียนรู้บางสิ่งบางอย่าง ซ้ำ ๆ หลายครั้ง จะเกิดการจดจำ และเมื่อพบเห็นสิ่งที่ยังไม่เคยพบเห็นก็จะอนุมานว่าสิ่งนั้นคืออะไรจากประสบการณ์และความรู้ที่ได้เรียนรู้มา

2.3 ทฤษฎีมัลติฟลักซ์

ทฤษฎีมัลติฟลักซ์เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายลักษณะการตกกระทบของเรเดียชันของแสงบนชั้นพื้นผิวเมื่อพิจารณาจากการดูดกลืนและการกระเจิงแสง [9]



ภาพที่ 2.7 โมเดลทางกายภาพของของทฤษฎีมัลติฟลักซ์ [10]

จากภาพที่ 2.7 แสงที่เดินทางผ่านชั้นฟิล์มของหมึกพิมพ์ได้รับการแบ่งออกเป็นรูปกรวยซ้อนกันหลายชั้น (channel) แต่ละชั้นจะมีมุมที่กระทำกับเส้นสมมุติในแนวตั้งฉากที่ต่างกันไปจนถึงเส้นใน

แนวระนาบ จำนวนชั้นที่นำมาคิดหาจำนวน ฟลักซ์สุทธิ (ในแต่ละชั้น) จะมีจำนวนเป็นเลขคู่ โดยจำนวนครึ่งหนึ่งคิดฟลักซ์สุทธิในทิศทางพุ่งขึ้น และอีกครึ่งหนึ่งคิดฟลักซ์สุทธิในทิศทางพุ่งลง ขนาดของแต่ละกรวย (รัศมีของกรวยจากเส้นสมมุติในแนวตั้งฉากถึงขอบกรวย) จะกำหนดได้อย่างอิสระเว้นแต่ว่ากรวยมีขนาดเล็กมาก เข้าใกล้มุมวิกฤต

ข้อดีของการแบ่งเรเดียของแสงออกเป็นชั้นคือ แสงทั้งหมดในแต่ละกรวย จะมีทิศทางการเดินทางไปสู่ boundary ของตัวกลาง ใกล้เคียงกับทิศทางของแสงตกกระทบ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของเรเดียของแสงจึงมีค่าใกล้เคียงค่าการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าที่ได้รับการแก้ไขแล้วด้วยสมการของเฟรสเนล (Fresnel)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาใช้ในงานวิจัยทางด้านสีในหลายรูปแบบ เพราะสามารถแก้ไขปัญหาที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นแบบความสัมพันธ์เชิงเส้น (non-linear correlation) [11] ได้ดี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ multilayer perceptron (MLP) ที่มีการเดินทางของข้อมูลแบบไปข้างหน้าอย่างเดียว (feed-forward) โดยรายละเอียดสามารถสืบค้นได้จาก Shamey และ Hussain [12] โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP มีตัวแปรอิสระเป็น ยูนิตซ่อน (hidden unit) ที่อยู่ในชั้นซ่อน (hidden layer) เป็นตัวแปลงข้อมูลที่รับเข้ามาให้ออกมาเป็นข้อมูลที่ต้องการ ซึ่งความแม่นยำในการแปลงข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักของยูนิตซ่อนที่ได้รับการเรียนรู้จากชุดข้อมูลฝึกสอน (training set)

Jawahar และคณะ [13] ได้ศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสีย้อมของผืนหนังเปรียบเทียบกับโมเดลการทำนายสีของคูเบลคาและมังค์ โดยใช้แม่สีของสีย้อม 3 สี นำมาผสมเป็นสีย้อม 300 สีเพื่อใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นทดสอบด้วยชุดสีทดสอบจำนวน 35 สี พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีดีกว่าโมเดลการทำนายสีของคูเบลคาและมังค์ โดยมีค่าความต่างสี (ΔE_{ab}) เท่ากับ 0.78 และ 2.65 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์อื่น นอกจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงและความเข้มข้นของสีย้อม เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างสีย้อมด้วยกันเองหรือความสัมพันธ์ระหว่างสีย้อมกับผืนหนัง ส่งผลให้โครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีมากกว่าโมเดลของคูเบลคาและมังค์

Hemingray และ Westland [14] ได้ศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียม ทำนายสีย้อมของเส้นใยฝ้ายเปรียบเทียบกับโมเดลในการทำนายสีแบบดั้งเดิม 2 แบบ (โมเดลของ Stearns-Noechel และโมเดลของ Friele) โดยใช้สีย้อมทั้งหมด 333 สีในการทดลอง แบ่งเป็นชุดสีเรียนรู้สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 273 สี และชุดสีทดสอบจำนวน 60 สี ซึ่งสีทั้งหมดมีส่วนประกอบตั้งแต่ 1 – 4 สีจากแม่สีจำนวน 8 สี พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีดีกว่าโมเดลการทำนายสีแบบดั้งเดิม โดยมีค่าความต่างสีเฉลี่ย (ΔE_{ab}) ประมาณ 1 เมื่อใช้ชุดสีทดสอบจำนวน 60 สีในการทดสอบ จากนั้น Westland ได้ทดลองเพิ่มเติมโดยเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมแบบ standard ANN และแบบ single-output เรียกว่า single-wavelength ANN พบว่าความต่างสีเฉลี่ยมีความใกล้เคียงกันเมื่อใช้จำนวนสีฝึกสอน 273 สี แต่เมื่อทดลองลดจำนวนสีฝึกสอนที่ใช้ในการเรียนรู้ลงเหลือ 100 สี พบว่าโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบ single-output มีค่าความต่างสีเฉลี่ยน้อยกว่าโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบ standard ANN อยู่ที่ 1.39 และ 1.86 ตามลำดับ

Westland [15] ได้ทดลองใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าการสะท้อนแสงของสีผสมจากหมึกพิมพ์ระบบออฟเซตปฐมภูมิ 6 สีบนกระดาษการ์ดขาว โดยใช้สีผสมจำนวน 123 สีในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นทดสอบด้วยชุดสีทดสอบจำนวน 40 สี พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพในการทำนายสีของหมึกพิมพ์ได้แม่นยำมากกว่าโมเดลการทำนายสีของคูเบลคาและมังก์แบบ 2 ตัวแปร (แยกคิด K กับ S) เมื่อมีการใช้จำนวนยูนิตซ่อนในชั้นซ่อน 7 ยูนิต และใช้ชุดสีฝึกสอนทั้งหมดแต่หากลดจำนวนชุดสีฝึกสอนลง ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมก็จะลดลงตามไปด้วย

Sarle [16] ได้แนะนำเกี่ยวกับจำนวนชุดฝึกสอนต่อจำนวนค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมเอาไว้อย่างมากที่สุดที่ 30:1 เพราะเมื่อจำนวนชุดฝึกสอนมากเกินไปจะทำให้เกิดการ overfitting หรืออย่างน้อยที่สุด 5:1 หรือน้อยกว่า โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียมแก้ปัญหา หากพิจารณาจากตัวอย่างการทำนายค่าการสะท้อนแสงของสีผสมตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตรจากแม่สีทั้งหมด 8 สี โดยใช้จำนวนยูนิตซ่อนในชั้นซ่อน 7 ยูนิต พบว่าจำนวน weight ในโครงข่ายประสาทเทียมจะเท่ากับ $(8 \times 7) + (7 \times 31) = 273$ (ยูนิตซ่อน 7 ยูนิตรับข้อมูลจาก 8 อินพุตยูนิต และเอาท์พุต 31 ยูนิตรับข้อมูลจากยูนิตซ่อนจำนวน 7 ยูนิต) ซึ่งหากทำตามคำแนะนำของ Sarle จำนวนข้อมูลชุดฝึกสอนจะต้องมีอย่างน้อยมากกว่า 1300 ตัวอย่างในการฝึกสอนเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพ

จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างมาข้างต้นได้มีการนำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) มาใช้ในการทำนายสูตรสีผสมอย่างแพร่หลาย ทั้งการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการย้อมสีผืนหนัง การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสีย้อมของเส้นใยฝ้าย และการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายสีของหมึกพิมพ์ออฟเซต ซึ่งทั้ง 3 แบบให้ค่าความต่างสีในการทำนายสีต่ำ แต่ยังไม่มีการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP ที่มีความแม่นยำในการทำนายสี มาใช้ในการทำนายค่าการสะท้อนแสงหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ MLP ในการทำนายสีผสมหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีบนวัสดุพอลิโพรพิลีน



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 หมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีปริมาณจำนวน 8 สี จากบริษัท แอนวิล (ไทย) จำกัด

- หมึกพิมพ์รุ่น AFT
- หมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีสำหรับพิมพ์ลงบนฉลากสินค้าประเภทพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน
- หมึกพิมพ์มีคุณสมบัติเกาะติดดี ทนการขูดขีด
- ทั้งหมด 8 เฉดสีได้แก่ สีแดง สีฟ้า สีเหลือง สีดำ สีส้ม สีเขียว สีขาว และมีเดียม
- ต้องการรังสียูวีในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยสมบูรณ์ 100 – 200 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร

3.1.2 ฉลากพอลิโพรพิลีนรุ่น EXP-PPTL-W จากบริษัท เอเวอร์รี่ เดนนิสสัน (ประเทศไทย) จำกัด

- ฉลากแบบเงา พื้นหลังขาว เคลือบผิว
- มีค่าพลังงานผิวไม่ต่ำกว่า 40 dyne/cm^2

3.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักรุ่น MS3002SE ยี่ห้อ Mettler Toledo จากประเทศสวิตเซอร์แลนด์

- พิกัด 3,200 กรัม
- ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- ขนาด $19.4 \times 34.7 \times 9.9$ ซม.
- Repeatability (at nominal load) 0.01 กรัม
- Linearity deviation 0.02 กรัม
- Sensitivity temperature drift $3 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$
- น้ำหนัก 4.7 กิโลกรัม



ภาพที่ 3.1 เครื่องชั่งน้ำหนักรุ่น MS3002SE ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.1.4 เครื่องพิมพ์จำลองรุ่น K Lok Proofers จากประเทศอังกฤษ

- ลูกยางสำหรับพิมพ์ชนิด EPDM ที่ทนทานหมึกพิมพ์ยูวี
- ความแข็งของลูกยาง 65 shore A
- ลูกอนิลอค 400/12 lpi
- ขนาด 8 × 30 × 10 ซม.
- น้ำหนัก 500 กรัม



ภาพที่ 3.2 เครื่องพิมพ์จำลองรุ่น K Lok Proofers

3.1.5 เครื่องอบรังสียูวีรุ่น C8/300 ยี่ห้อ American Ultraviolet จากประเทศสหรัฐอเมริกา

- เครื่องอบรังสียูวีมีหน่วยทำแห้ง 2 หน่วย
- หลอดไฟแหล่งกำเนิดรังสียูวีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ให้กำลังไฟฟ้า 2 กิโลวัตต์
- อาศัยระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
- ให้ปริมาณรังสียูวี 150 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรที่ความเร็ว 60 ฟุตต่อนาที

- ขนาดความกว้างสายพาน 9 นิ้ว



ภาพที่ 3.3 เครื่องอบรังสียูวี American Ultraviolet

3.1.5 เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ของ X-Rite รุ่น eXact จากประเทศสหรัฐอเมริกา

- Spectral analyzer: DRS spectral engine
- Spectral range: 400 nm - 700 nm with 10 nm interval
- OPTICS Measurement geometry: 45°:0° ring illumination optics, ISO 5-4:2009(E)
- Measurement aperture: 1.5 mm, 2 mm, 4 mm or 6 mm
- Light source: Gas filled tungsten (illuminant type A) and UV LED
- Measurement Conditions: According to ISO 13655:2009):
 - M0: Unpolarized, No filter, UV included
 - M1: D50
 - M2: UV excluded Filter
 - M3: Polarization Filter (eXact Xp excludes M3)
- Calibration: Automatic on integrated white reference

Inter instrument agreement:

- Average: 0.25 ΔE^*ab , Max: 0.45 ΔE^*ab (M3 0.55 ΔE^*ab) (Measurements using X-Rite manufacturing standards at a temperature of 23°C +/- 1°C, 40-60% RH for all measurement modes on 12 BCRA color tiles and a white ceramic reference (D50, 2°))

- Short term repeatability White:

- 0.05 ΔE^*_{ab} , (standard deviation) White BCRA (Error compared to mean value of 10 measurements every 5 seconds)
- Operating Temperature Range:
 - 50° to 95°F (10° to 35°C) 30-85% relative humidity maximum (non-condensing)
- ขนาด 3.0”H (7.6 cm) 3.1”W (7.8 cm) 7.1”L (18 cm)
- น้ำหนัก 1.6 lbs. (0.7 kg)



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดสี X-Rite รุ่น eXact

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมหมึกชุดหมึกพิมพ์สำหรับสร้างฐานข้อมูล การสร้างฐานข้อมูล การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การเตรียมชุดหมึกพิมพ์สำหรับสร้างฐานข้อมูล

3.2.1.1 ชุดหมึกพิมพ์ปฐมภูมิ

หมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีจำนวน 8 สี ได้แก่ ชุดสี CMYK สีส้ม สีเขียว สีขาว และมีเดียม

3.2.1.2 ชุดหมึกพิมพ์ทุติยภูมิ

หมึกพิมพ์ทุติยภูมิเกิดจากการการนำหมึกพิมพ์ปฐมภูมิ 2 สีจากจำนวนทั้งหมด 8 สีนำมาผสมกันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ให้ได้จำนวน 159 สี เพื่อใช้ในขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูล

3.2.1.3 ชุดหมึกพิมพ์ตัดติดยุติ

หมึกพิมพ์ตัดติดยุติเกิดจากการการนำหมึกพิมพ์ปฐมภูมิจำนวน 3 สีจากจำนวนทั้งหมด 8 สีนำมาผสมกันที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ให้ได้จำนวน 105 สี เพื่อใช้ในขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูล

3.2.1.4 เก็บข้อมูลต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการเตรียมฐานข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันระหว่าง 2 วิธี

3.2.2 การสร้างฐานข้อมูล

3.2.2.1 การสร้างฐานข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์การทำงานายสี

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นซอฟต์แวร์การทำงานายสี Ink Formulation 6 ที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท แอนวิล (ไทย) จำกัด โดยนำชุดหมึกพิมพ์ปฐมภูมิ 8 สี และชุดสีทุติยภูมิจำนวน 57 สีที่เกิดจากการเจือจางแม่สีปฐมภูมิ 7 สีแต่ละสีด้วยมีเดียโดยให้แม่สีมีความเข้มข้นดังนี้ 1% 2% 4% 8% 16% 32% และ 64% (ดังตารางที่ 3.2) ที่พิมพ์ลงบนฉลากพอลิโพรพิลีนนำมาวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่องวัดสีที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร (เฉพาะบนพื้นขาว) เพื่อเป็นฐานข้อมูลให้กับซอฟต์แวร์การทำงานายสี



ภาพที่ 3.5 ซอฟต์แวร์การทำงานายสี Ink formulation 6

3.2.2.2 การสร้างฐานข้อมูลสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลองได้รับการเขียนรหัสขึ้นมาด้วยซอฟต์แวร์ Matlab รุ่น R2016b โดยใช้คำสั่ง APP > Neural Net Fitting สร้างโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นมาโดยมีรายละเอียดดังนี้

- กำหนดอินพุตยูนิต 7 ยูนิต คือ ความเข้มข้นของสีปฐมภูมิแต่ละสีไม่รวมมีเดียที่ได้จากการวัดค่าการสะท้อนแสงชุดสีฝึกสอนจำนวน 257 สีด้วยเครื่องวัดสีที่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร (เฉพาะบนพื้นขาว) จากการพิมพ์หมึกพิมพ์ลงบนฉลากพอลิโพรพิลีน

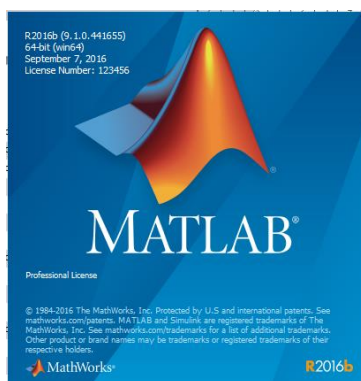
- กำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 6 แบบ ได้แก่ Bayesian regularization

- ขั้นตอนวิธี Bayesian regularization backpropagation; Trainbr [17, 18]
- ขั้นตอนวิธี Levenberg – Marquardt backpropagation; Trainlm [5]
- ขั้นตอนวิธี BFGS quasi-Newton backpropagation; Trainbfg [19]
- ขั้นตอนวิธี Resilient backpropagation; Trainrp [20]
- ขั้นตอนวิธี One-step secant backpropagation; Trainoss [21] และวิธีสุดท้าย
- ขั้นตอนวิธี Scaled conjugate gradient backpropagation; Trainscg [17]

- แต่ละขั้นตอนวิธีกำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน ตั้งแต่ 1 – 30 ยูนิต
- กำหนดให้มีเอาท์พุทยูนิตเท่ากับ 31 ยูนิต คือ ค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ที่ความถี่ 10 นาโนเมตร
- ตัวแปรควบคุมอื่นๆใช้ค่ามาตรฐานของฟังก์ชัน

จากนั้นทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อค้นหาขั้นตอนวิธีและจำนวนยูนิตซ่อนที่ดีที่สุด (พิจารณาจากค่าเฉลี่ยความต่างสี่ Mean CIE*94) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ทำนายสี

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 3.6 ซอฟต์แวร์ Matlab รุ่น R2016b

3.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

3.2.3.1 ซอฟต์แวร์ทำนายสี

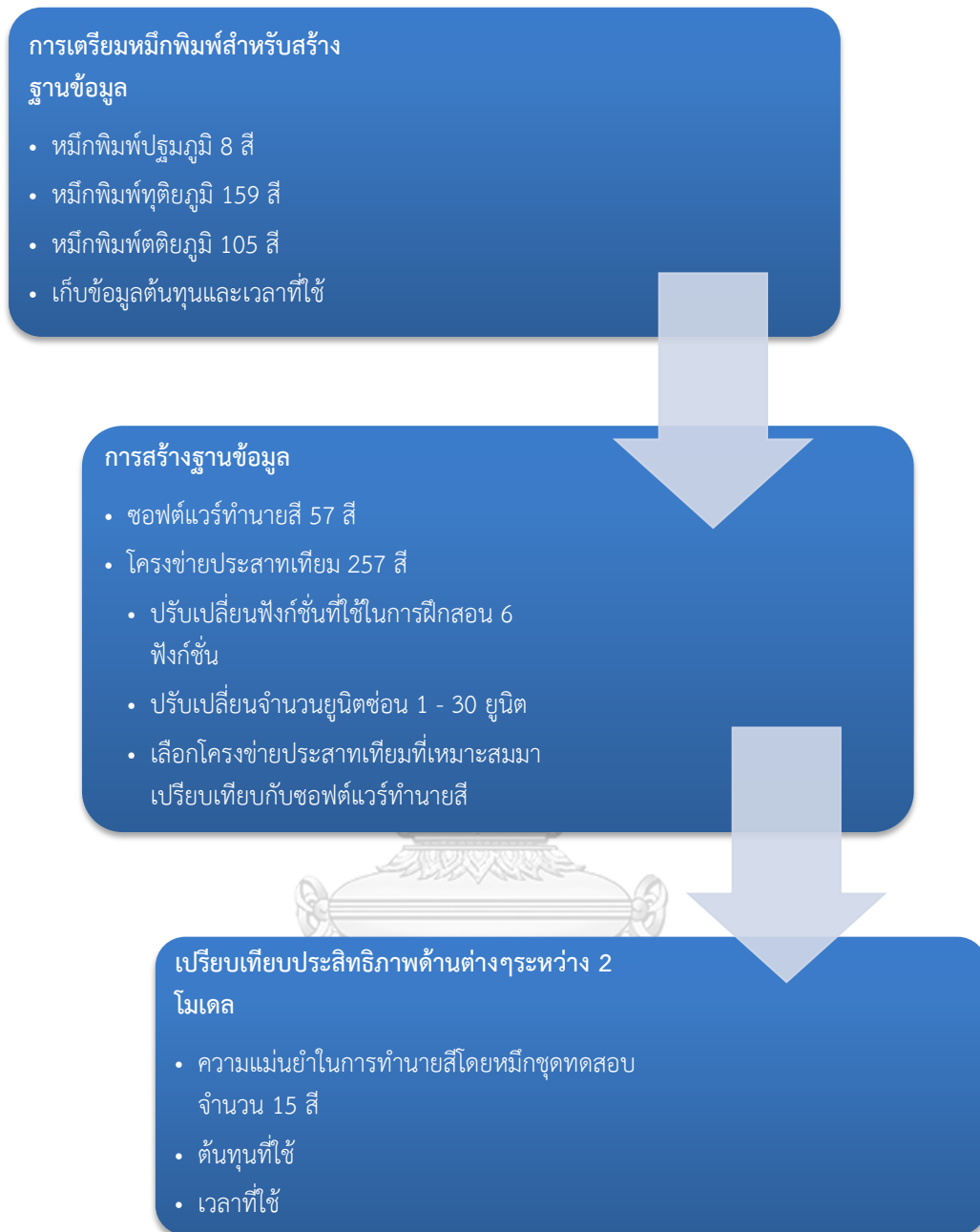
นำชุดสีทดสอบชุดเดียวกับที่ใช้ทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 15 สี นำมาทำนายสีเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างสีที่ซอฟต์แวร์ทำนายสีทำนายได้กับค่าสีจริงของงานพิมพ์ในเทอมของ ΔE^*_{94}

3.2.3.2 โครงข่ายประสาทเทียม

นำชุดสีทดสอบจำนวน 15 สี ชุดเดียวกันกับที่ใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีมาทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมโดยให้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ออกมา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสี CIELAB ที่สภาวะ D65/2° จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าสี CIELAB ด้วย ΔE^*_{94}

3.2.3.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสี

นำข้อมูลค่า ΔE^*_{94} ที่เกิดขึ้นจากชุดสีทดสอบ 15 สีจากทั้ง 2 วิธีนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำกัน และเปรียบเทียบต้นทุนกับเวลาที่ใช้ในการเตรียมฐานข้อมูลจากทั้ง 2 วิธี



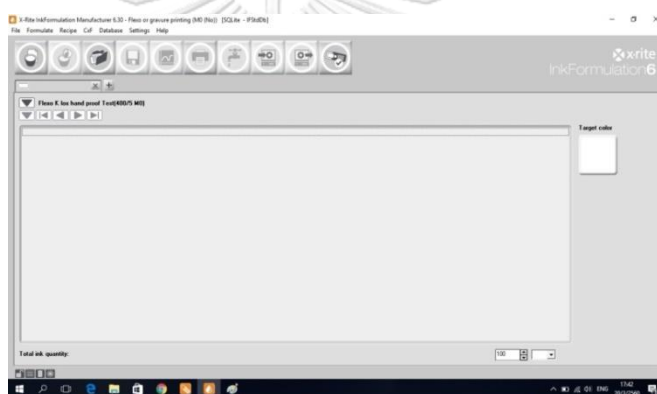
ภาพที่ 3.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานวิจัย

บทที่ 4

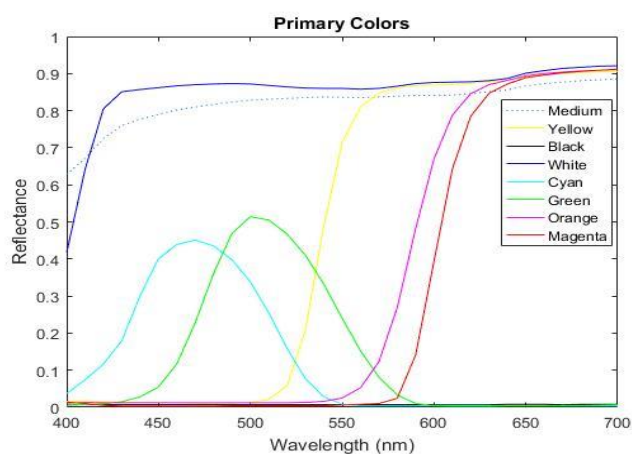
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ซอฟต์แวร์การทำนายสี

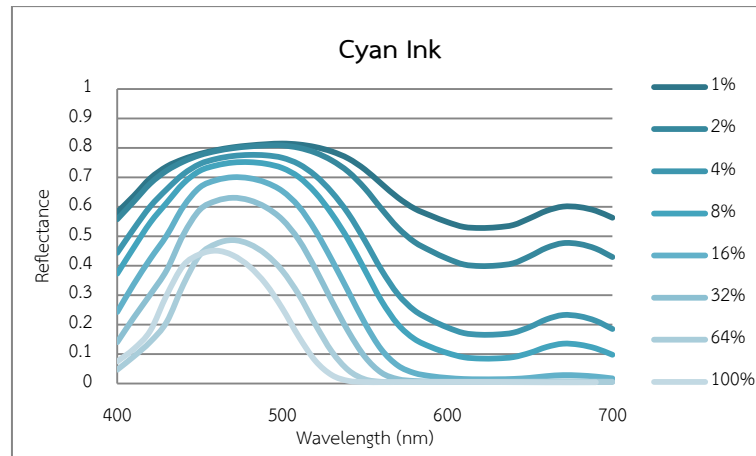
จากการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสี Ink formulation6 ดังภาพที่ 4.1 เพื่อสร้างฐานข้อมูลหมึกพิมพ์ยูวีเฟล็กโซกราฟีเพื่อใช้ในการทำนายสีจากชุดสีปฐมภูมิจำนวน 8 สี ได้แก่ สีแอน มาเจนตา เหลือง ดำ ขาว ส้ม สีเขียวและมีเดียมดังภาพที่ 4.2 และจากชุดสีทุติยภูมิด้วยการเจือจางชุดสีปฐมภูมิแต่ละสีด้วยมีเดียมที่มีความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 1% 2% 4% 8% 16% 32% และ 64% ดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.9



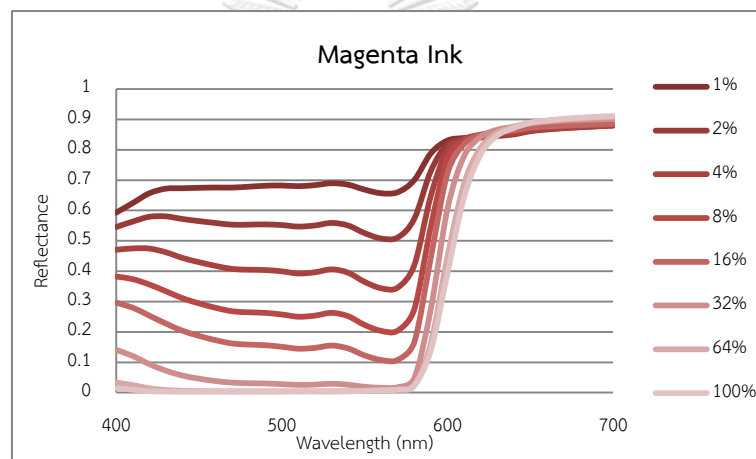
ภาพที่ 4.1 ซอฟต์แวร์การทำนายสี



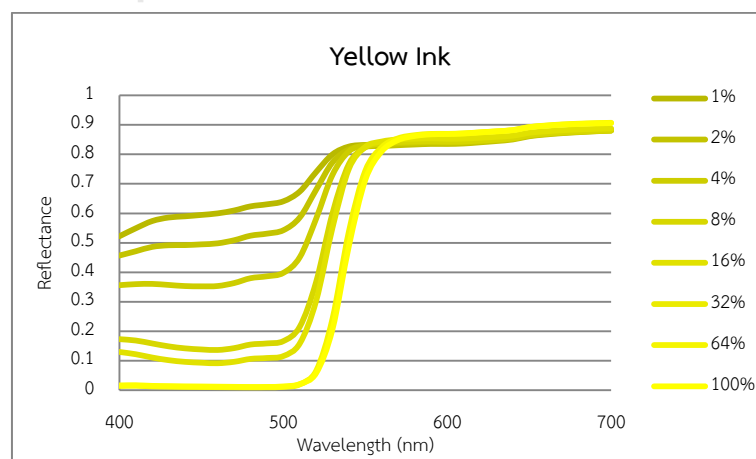
ภาพที่ 4.2 การสะท้อนแสงของชุดสีปฐมภูมิที่ใช้ในการทดลอง



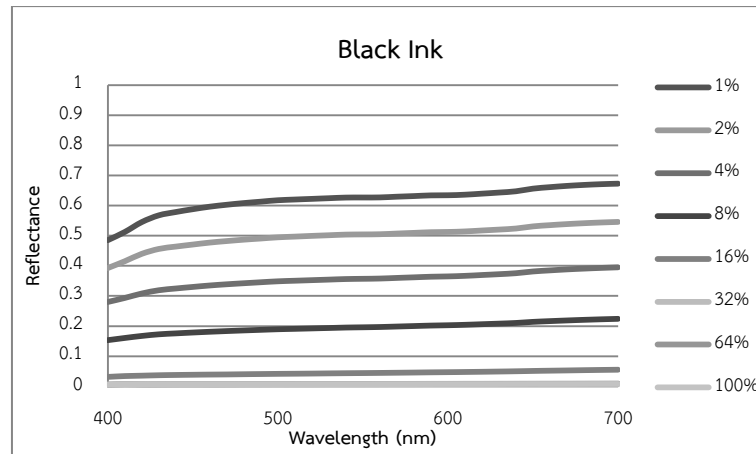
ภาพที่ 4.3 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐุมภูมิตีไซแอนที่ความเข้มข้นต่างๆ



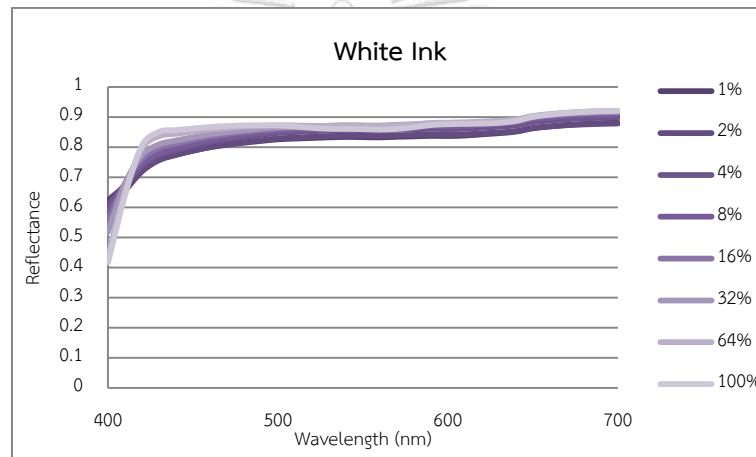
ภาพที่ 4.4 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐุมภูมิตีมะagentaที่ความเข้มข้นต่างๆ



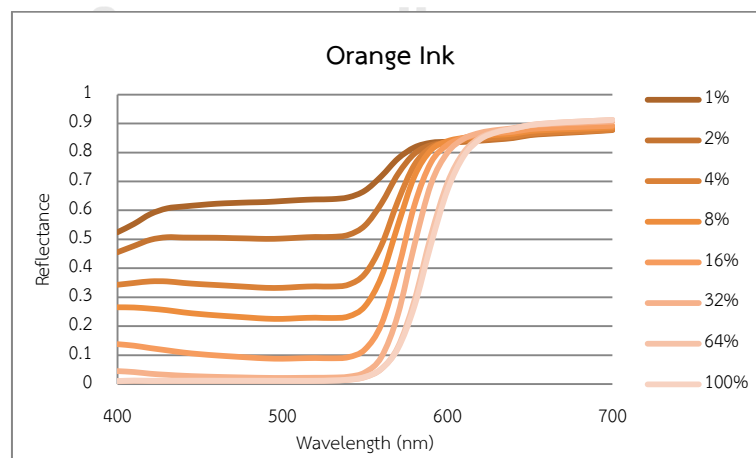
ภาพที่ 4.5 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐุมภูมิตีเหลืองที่ความเข้มข้นต่างๆ



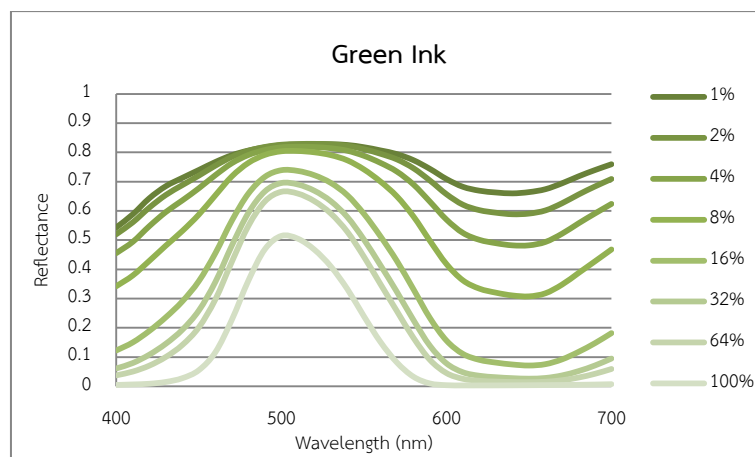
ภาพที่ 4.6 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีดำที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 4.7 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีขาวที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 4.8 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ



ภาพที่ 4.9 ค่าการสะท้อนแสงของสีปฐมภูมิสีส้มที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94}) ของหมึกพิมพ์ชุดทดสอบ 15 สี ที่ซอฟต์แวร์คำนวณได้เมื่อเทียบกับงานพิมพ์

รายการ	เฉดสี	ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94})	รายการ	เฉดสี	ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94})
สีที่ 1		11.10	สีที่ 10		1.70
สีที่ 2		8.00	สีที่ 11		8.20
สีที่ 3		14.90	สีที่ 12		4.30
สีที่ 4		3.20	สีที่ 13		2.80
สีที่ 5		4.90	สีที่ 14		15.90
สีที่ 6		8.70	สีที่ 15		21.80
สีที่ 7		1.50	เฉลี่ย 15 สี		7.94
สีที่ 8		5.90			
สีที่ 9		6.20			

เมื่อเตรียมฐานข้อมูลหมึกพิมพ์ของซอฟต์แวร์เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำซอฟต์แวร์ที่พร้อมใช้งานมาทดลองทำนายสีด้วยชุดสีทดสอบจำนวน 15 สีที่ได้จากการสุ่มจากชุดสีทั้งหมด 272 สีดังตารางที่ 4.1 พบว่าสีเหลืองสีที่ 7 มีค่าความต่างสีต่ำที่สุดเท่ากับ 1.50 ซึ่งเกิดจากการผสมสีเหลืองปฐมภูมิ 90% กับสีขาวปฐมภูมิ 10% รองลงมาคือสีที่ 10 มีค่าความต่างสี 1.70 ที่เกิดจากการผสมสีมาเจนตาปฐมภูมิ 70% กับสีเหลืองปฐมภูมิ 20% และสีขาวปฐมภูมิ 10% เข้าด้วยกัน ลำดับที่ 3 คือสีที่ 13 มีค่าความต่างสี 2.8 ซึ่งเกิดจากการผสมสีมาเจนตาปฐมภูมิ 20% กับสีเหลืองปฐมภูมิ 70% และสีเขียวปฐมภูมิ 10% เข้าด้วยกัน ส่วนสีทดสอบที่มีค่าความต่างสีมากที่สุดคือที่ 15 มีค่า 21.80

เป็นสีเทาซึ่งเกิดจากการผสมสีดำปฐมภูมิ 20% กับสีขาวปฐมภูมิ 70% และสีส้มปฐมภูมิ 10% เข้าด้วยกัน โดยจากทั้งหมดค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดหมึกพิมพ์ทดสอบมีค่าเท่ากับ 7.94

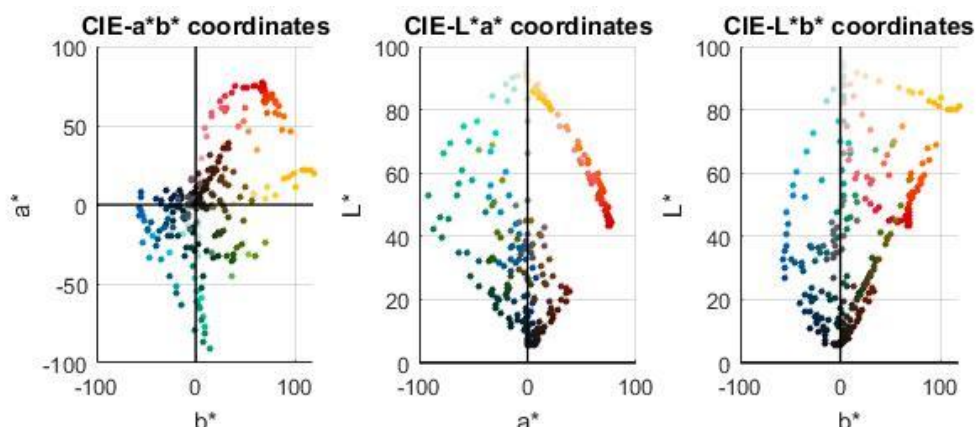
จากการทำนายสีชุดสีทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความต่างสีเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างสูงทั้งนี้อาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงเฉดสีกับความหนาของหมึกพิมพ์ ซึ่งเฉดสีและความอิ่มตัวสีสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่อความหนาของหมึกพิมพ์เปลี่ยนไป หรือเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างสารให้สีของสีปฐมภูมิ เป็นต้น

สำหรับต้นทุนที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลสำหรับซอฟต์แวร์การทำนายสีคิดจากราคาหมึกพิมพ์เฉลี่ย 1,200 บาท/กก./สี ต้องใช้ทั้งหมด 8 สี คิดเป็น 9,600 บาท ปริมาณหมึกพิมพ์สำหรับสีตัวอย่าง 57 สี และสีที่ต้องเตรียมสำหรับสร้างฐานข้อมูลอยู่ที่ 30 กรัม/สี ดังนั้นต้นทุนที่แท้จริงในการสร้างฐานข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์การทำนาย ink formulation 6 คือ $0.03 \times 57 \times 1200$ เท่ากับ 2,088 บาท

เวลาที่ใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์คิดเป็น 15 นาที/สี จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 57 สี โดยเป็นเวลาที่ใช้ในการชั่งและตวงหมึกพิมพ์ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการปั่นกระจายตัวหมึกพิมพ์ให้เข้ากัน ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์ทั้งหมดคือ 15×57 เท่ากับ 855 นาที

4.2 โครงข่ายประสาทเทียม

ชุดสีที่ใช้ทั้งหมด 272 สีที่นำมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ชุดสีฝึกสอน จำนวน 257 สีและชุดสีทดสอบจำนวน 15 สีซึ่งทั้งหมดมีการกระจายตัวของค่าความสว่าง (L^*) ค่าสี a^* และ b^* ดังภาพที่ 4.10 ซึ่งเห็นได้ว่าจากกราฟมีการกระจายตัวของค่าสี a^* และ b^* ค่อนข้างครอบคลุมเพราะมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่ระหว่าง -100 ถึง 100 เช่นเดียวกันกับกราฟระหว่าง L^* กับ a^* และ L^* กับ b^* โดยโครงข่ายประสาทเทียมได้รับการฝึกสอนด้วยชุดสีฝึกสอนจริงเป็นจำนวน 217 สีและชุดสีสำหรับทวนสอบ จำนวน 40 สี



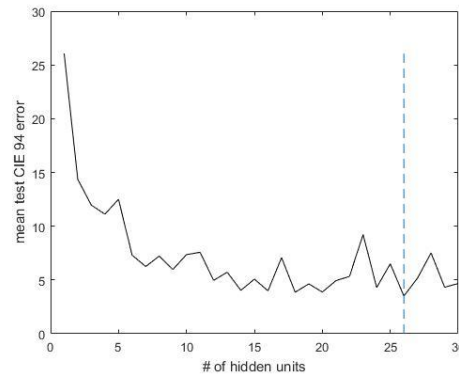
ภาพที่ 4.10 ค่าสี L^* a^* และ b^* ของชุดสีฝึกสอนและชุดสีทดสอบทั้งหมด 272 สี ($D65/2^\circ$)

การหยุดฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมของแต่ละขั้นตอนวิธีเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน ถูกกำหนดให้เพิ่มจำนวนยูนิตเมื่อเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งเกิดขึ้นก่อนดังนี้

- มีการวนซ้ำ (iteration) มากที่สุดภายใน 1,000 รอบ (epoch)
- Performance ถึงกำหนดตามที่มาตรฐานของแต่ละขั้นตอนวิธีตั้งค่าไว้
- ค่า performance gradient มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานของแต่ละขั้นตอนวิธีตั้งค่าไว้
- ค่า validation performance มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานของแต่ละขั้นตอนวิธีตั้งค่าไว้ ยกเว้น ขั้นตอนวิธี Trainbr

4.2.1 ขั้นตอนวิธี Trainbr

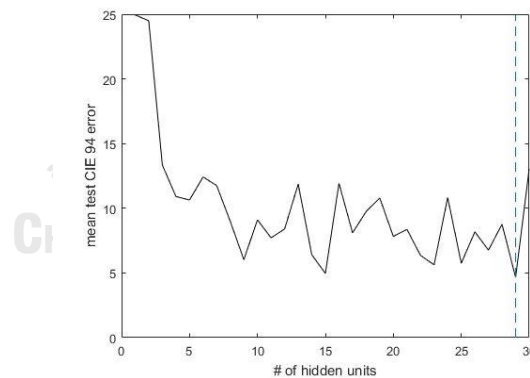
Trainbr เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี Levenberg-Marquardt optimization โดยเป็นการลดความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองกับค่าน้ำหนักลงจากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด (การปรับค่าน้ำหนักและไบแอส) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดี และเพื่อป้องกันการ overtraining และ overfitting [22] จากภาพที่ 4.11 พบว่าค่าความต่างสีเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มจำนวนยูนิตซ่อนไปจนถึง 7 ยูนิตจากนั้นจากนั้นค่อยๆลดลงสลับกับเพิ่มขึ้นจนมีค่าความต่างสีเฉลี่ยต่ำที่สุดที่จำนวนยูนิตซ่อนเท่ากับ 26



ภาพที่ 4.11 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainbr เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

4.2.2 ขั้นตอนวิธี Trainlm

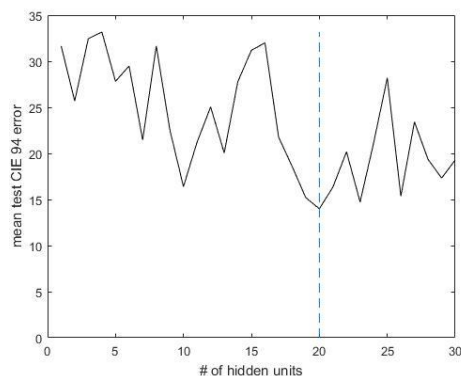
Trainlm เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี Levenberg-Marquardt optimization โดยเป็นการลดค่าค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน MSE จากภาพที่ 4.12 ค่าความต่างสีเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มจำนวนยูนิตซ่อนไปจนถึง 5 ยูนิตจากนั้นจากนั้นค่อยๆลดลงสลับกับเพิ่มขึ้นจนมีค่าความต่างสีเฉลี่ยต่ำที่สุดที่จำนวนยูนิตซ่อนเท่ากับ 29



ภาพที่ 4.12 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainlm เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

4.2.3 ขั้นตอนวิธี Trainbfg

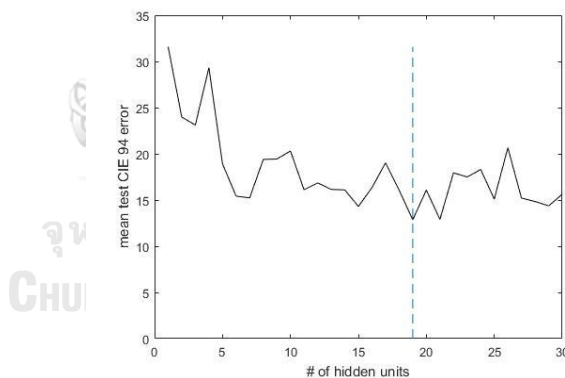
Trainbfg เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี BFGS quasi-Newton method จากภาพที่ 4.13 ค่าความต่างสีเฉลี่ยมีความแกว่งของข้อมูลเป็นอย่างมากตั้งแต่จำนวนยูนิตซ่อนน้อยๆถึงแม้โดยรวมจะมีแนวโน้มลดลงก็ตาม โดยมีจำนวนยูนิตซ่อนที่ทำให้ค่าความต่างสีเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 20 ยูนิต



ภาพที่ 4.13 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainbfg เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

4.2.4 ขั้นตอนวิธี Trainrp

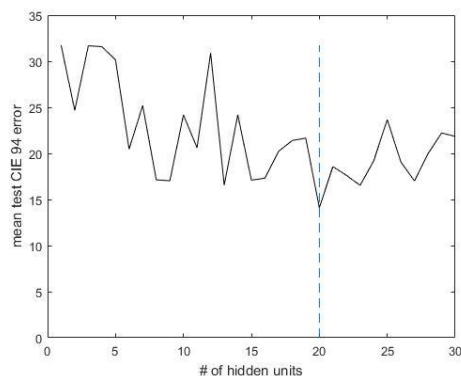
Trainrp เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี resilient backpropagation algorithm จากภาพที่ 4.14 ค่าความต่างสีเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มจำนวนยูนิตซ่อนไปจนถึง 6 ยูนิตจากนั้นจากนั้นค่อยๆลดลงสลับกับเพิ่มขึ้น จนมีค่าความต่างสีเฉลี่ยต่ำที่สุดที่จำนวนยูนิตซ่อนเท่ากับ 19



ภาพที่ 4.14 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainrp เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

4.2.5 ขั้นตอนวิธี Trainoss

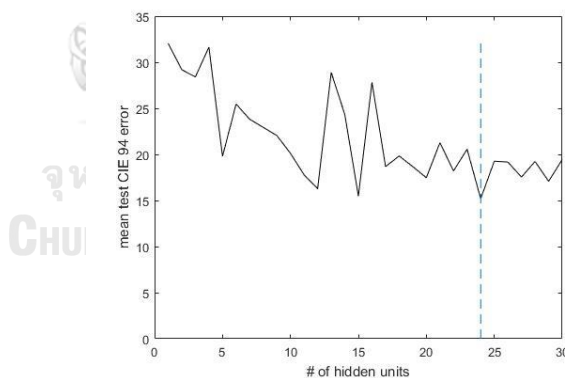
Trainoss เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี One-step secant ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องการความจุและมีความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่า ขั้นตอนวิธีแบบ Trainbfgs จากภาพที่ 4.15 ค่าความต่างสีเฉลี่ยมีความแกว่งของข้อมูลเป็นอย่างมาก ตั้งแต่จำนวนยูนิตซ่อนน้อยๆถึงแม้โดยรวมจะมีแนวโน้มลดลงก็ตาม โดยมีจำนวนยูนิตซ่อนที่ทำให้ค่าความต่างสีเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 20 ยูนิต



ภาพที่ 4.15 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainoss เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

4.2.6 ขั้นตอนวิธี Trainscg

Trainscg เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ฝึกสอนโดยการอัปเดตค่าน้ำหนักและไบแอส (bias) ด้วยวิธี scaled conjugate gradient backpropagation จากภาพที่ 4.16 ค่าความต่างสีเฉลี่ยมีความกว้างของข้อมูลเป็นอย่างมากจนถึงจำนวนยูนิตซ่อนเท่ากับ 7 จากนั้นค่าความต่างสีเฉลี่ยมีการแกว่งของข้อมูลเล็กน้อยและแนวโน้มคงที่ โดยมีจำนวนยูนิตซ่อนที่ทำให้ค่าความต่างสีเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 24 ยูนิต



ภาพที่ 4.16 ค่าความต่างสีเฉลี่ยของชุดสีทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainscg เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจำนวนยูนิตซ่อน

การเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมจากภาพที่ 4.11 - 4.16 จะเห็นได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนยูนิตซ่อนที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในทุกๆแบบของการฝึกสอน ทั้งนี้เป็นเพราะโครงข่ายประสาทเทียมมีการเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของชุดสีปฐมภูมิกับค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์สีพิเศษดีขึ้น โดยเฉพาะการฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธีแบบ Trainbr ที่มีแนวโน้มค่าความต่างสีเฉลี่ยลดลงอย่าง

รวดเร็วในช่วงจำนวนยูนิตซ่อน 1 – 6 ยูนิต จากนั้นค่อยๆมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าความต่างสี่เฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 3.75 ที่จำนวนยูนิตซ่อน 26 ยูนิต โดยมีค่าความต่างสี่น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.34 และมีค่าความต่างสี่มากที่สุดอยู่ที่ 9.22 ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ค่าความต่างสี่เฉลี่ย ค่าความต่างสี่น้อยที่สุด ($\min \Delta E^*_{94}$) และค่าความต่างสี่มากที่สุด ($\max \Delta E^*_{94}$) ของโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีในการฝึกสอน

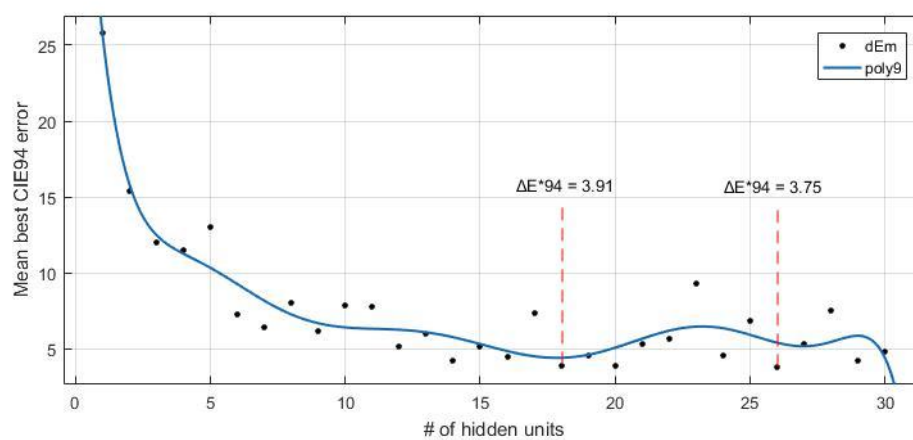
ชนิดของ ขั้นตอนวิธีที่ใช้ ในการฝึกสอน	จำนวนยูนิต ซ่อนที่ เหมาะสม	ค่าความต่างสี่ น้อยที่สุด ($\min \Delta E^*_{94}$)	ค่าความต่างสี่ มากที่สุด ($\max \Delta E^*_{94}$)	ค่าความต่าง สี่เฉลี่ย (Mean ΔE^*_{94})	ค่าส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
Trainbr	26	0.34	9.22	3.75	2.51
Trainlm	29	0.34	10.07	4.71	2.70
Trainbfg	20	4.66	23.65	14.56	5.82
Trainrp	19	3.13	24.99	13.20	6.74
Trainoss	20	3.73	25.67	15.01	6.93
Trainscg	24	5.28	27.83	15.19	6.89

จากตารางที่ 4.2 พบว่าขั้นตอนวิธีแบบ Trainbr และ Trainlm มีค่าความต่างสี่เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 3.75 และ 4.71 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะทั้ง 2 วิธีใช้วิธีการคำนวณแบบวิธีเดียวกันคือ Levenberg – Marquardt optimization ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) น้อยกว่าขั้นตอนวิธีแบบอื่นๆ [23] ส่วนขั้นตอนวิธีแบบอื่นจะใช้สมการวิธีการคำนวณแตกต่างกันออกไป ซึ่งไม่เหมาะสมกับข้อมูลชุดฝึกสอนที่มีปริมาณน้อยและมีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของชุดสีปฐมภูมิกับค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์สีพิเศษแบบไม่เป็นเส้นตรง ทำให้มีค่าเฉลี่ยความต่างสี่สูง ดังนั้นในการทดลองนี้ทางผู้ทำการวิจัยเลือกโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธีแบบ Trainbr และใช้จำนวนยูนิตซ่อนเท่ากับ 26 ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีกับซอฟต์แวร์การทำนายสี

ตารางที่ 4.3 ค่าทางสถิติต่างๆสำหรับขั้นตอนวิธี Trainbr

ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการฝึกสอน	R-Squared (R^2)	Adj R-sq	RMSE
Trainbr	0.9064	0.8643	1.67

เมื่อทราบขั้นตอนวิธีและจำนวนยูนิตซ่อนที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองแล้วได้นำขั้นตอนวิธี Trainbr มาวิเคราะห์การถดถอยด้วยสมการพหุนาม (polynomial) ระดับที่ 9 ซึ่งให้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.3 ได้ค่า R2 เท่ากับ 0.9064 สามารถแปลความหมายได้ว่าค่าความต่างสี่เฉลี่ยของขั้นตอนวิธี Trainbr มีความครอบคลุมชุดข้อมูลชุดฝึกสอนถึง 90.64 % กอปรกับค่า Adj R-sq มีค่าเข้าใกล้ 1 และน้อยกว่าค่า R2 อยู่ที่ 0.8643 และมีค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยมากที่สุดที่ 1.67 แสดงว่าขั้นตอนวิธี Trainbr มีความเหมาะสมใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม



ภาพที่ 4.17 การวิเคราะห์ความถดถอยด้วยสมการพหุนาม ที่ระดับที่ 9

จากภาพที่ 4.17 เป็นการวิเคราะห์สมการเชิงถดถอยด้วยสมการพหุนาม ระดับที่ 9 ของค่าเฉลี่ย ΔE^*_{94} ที่ฝึกสอนด้วยขั้นตอนวิธี Trainbr พบว่างานวิจัยนี้สามารถลดจำนวนการใช้ยูนิตซ่อนลงจาก 26 ยูนิตที่ค่าเฉลี่ย $\Delta E^*_{94} = 3.74$ เป็นจำนวนยูนิตซ่อน 18 ยูนิตที่ค่าเฉลี่ย $\Delta E^*_{94} = 3.91$ โดยการลดจำนวนยูนิตซ่อนลงส่งผลให้ใช้เวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสั้นลง ประหยัดเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมมากขึ้นในขณะที่ประสิทธิภาพในการทำนายสี่ยังคงใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนค่าน้ำหนักรวมต่อจำนวนข้อมูลชุดฝึกสอนของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ขั้นตอนวิธี Trainbr ในการฝึกสอนที่ 26 ยูนิตพบว่า มีค่าน้ำหนักรวม $(7 \times 26) + (26 \times 31)$ เท่ากับ 988 และมีจำนวนหมึกพิมพ์ชุดทดสอบเท่ากับ 257 สี ดังนั้นอัตราส่วนจะเท่ากับ 1:0.26 ในขณะที่การลดจำนวนยูนิตซ่อนลงเหลือ 18 ยูนิต ค่าน้ำหนักรวมของโครงข่ายประสาทเทียมจะมีค่าเท่ากับ $(7 \times 18) + (18 \times 31)$ เท่ากับ 684 ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างระหว่างค่าน้ำหนักรวมต่อจำนวนข้อมูลชุดฝึกสอนมีอัตราส่วน 1:0.38 ซึ่งมีอัตราส่วนเพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำนายสี่ยังคงดีอยู่

อนึ่งการทำนายสีจากชุดสีปฐมภูมิ 7 สีและมีเอาท์พุทเป็นค่าการสะท้อนแสง 31 ค่า (400–700 นาโนเมตร) ส่งผลให้อัตราส่วนค่าน้ำหนักรวมต่อจำนวนข้อมูลชุดฝึกสอนมีอัตราส่วนต่ำ แต่การเลือกเอาท์พุทเป็นค่าการสะท้อนแสงมีข้อดี คือสามารถนำค่าการสะท้อนแสงที่ทำนาย ไปใช้ในสถานะแสงอื่นนอกจากสภาวะ D65/2° ได้

สำหรับต้นทุนที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียมคิดจากราคาหมึกพิมพ์เฉลี่ย 1,200 บาท/กก./สี ต้องใช้ทั้งหมด 8 สี คิดเป็น 9,600 บาท ปริมาณหมึกพิมพ์สำหรับสีตัวอย่าง 272 สีและสีที่ต้องเตรียมสำหรับสร้างฐานข้อมูลอยู่ที่ 30 กรัม/สี ดังนั้นต้นทุนที่แท้จริงในการสร้างฐานข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียม คือ $0.03 \times 272 \times 1200$ เท่ากับ 9,792 บาท

เวลาที่ใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์คิดเป็น 15 นาที/สี สำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์ปฐมภูมิและทุติยภูมิจากจำนวนตัวอย่าง 167 สี ซึ่งเกิดจากเวลาที่ใช้ในการชั่ง ตวงหมึกพิมพ์และปั่นกระจายตัวหมึกพิมพ์ให้เข้ากัน และใช้เวลาการเตรียมหมึกพิมพ์คิดเป็น 17 นาที/สี สำหรับการเตรียมหมึกพิมพ์ตติยภูมิจากจำนวนตัวอย่าง 105 สี โดยเวลาที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเพิ่มจำนวนสีที่ 3 ที่ใช้ในการผสมหมึกพิมพ์ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการเตรียมหมึกพิมพ์ทั้งหมดคือ $(15 \times 167) + (17 \times 105)$ เท่ากับ 4,290 นาที ต่อจำนวนชุดสีทั้งหมด 272 สี

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพซอฟต์แวร์การทำนายสีกับโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 4.4 ค่าความต่างสี ΔE^*_{94} ของหมึกชุดทดสอบระหว่างการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสีกับโครงข่ายประสาท-เทียม

รายการ	ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94}) ที่ทำนายสีด้วยซอฟต์แวร์การทำนายสี	ค่าความต่างสี (ΔE^*_{94}) ที่ทำนายสีด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
สีที่ 1	11.10	4.00
สีที่ 2	8.00	6.52
สีที่ 3	14.90	5.34
สีที่ 4	3.20	1.72
สีที่ 5	4.90	0.54
สีที่ 6	8.70	3.39
สีที่ 7	1.50	0.38

สีที่ 8	5.90	2.80
สีที่ 9	6.20	6.46
สีที่ 10	1.70	2.30
สีที่ 11	8.20	3.21
สีที่ 12	4.30	2.42
สีที่ 13	2.80	3.50
สีที่ 14	15.90	7.41
สีที่ 15	21.80	2.65
เฉลี่ย	7.94	3.75

จากตารางที่ 4.4 พบว่าการทำนายสีชุดสีทดสอบ 15 สี ของโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำมากกว่าการทำนายสีด้วยซอฟต์แวร์การทำนายสีอย่างเห็นได้ชัดจนซึ่งมีค่าความต่างสีเฉลี่ยเท่ากับ 3.75 และ 7.94 ตามลำดับ มีเพียงสีลำดับที่ 9 สีลำดับที่ 10 และสีลำดับที่ 13 เท่านั้นที่มีค่าความต่างสีมากกว่าซึ่งเกิดจากความครอบคลุมของชุดสีฝึกสอนมีน้อยเกินไปจึงส่งผลให้โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสีออกมามีความแม่นยำน้อย โดยการที่โครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำสูงกว่าเป็นเพราะโครงข่ายประสาทเทียมมีความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของชุดแม่สีปฐมภูมิกับค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์สีพิเศษที่ผสมขึ้นได้ดี อีกทั้งยังนำปัจจัยอื่นๆ เช่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารสีแต่ละชนิดที่ใช้ ความหนา – บางของชั้นฟิล์มของหมึกพิมพ์ที่พิมพ์ได้จากเครื่องพิมพ์จำลอง ฯลฯ ต่างจากซอฟต์แวร์ทำนายสีที่อาศัยการทำนายสีจากการคำนวณการผสมค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ปฐมภูมิให้ได้เป็นค่าการสะท้อนแสงของสีพิเศษโดยไม่ได้พิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบด้านต่าง ๆ ระหว่างการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสีกับโครงข่ายประสาทเทียมในการทำฐานข้อมูล

รายการ	ซอฟต์แวร์ ink formulation	โครงข่ายประสาทเทียม
จำนวนสีที่ใช้ (ตัวอย่าง)	57	272
ต้นทุนเฉลี่ย (บาท/สี)	36	36
ต้นทุนรวม (บาท)	2,052	9,792
เวลาเฉลี่ย (นาท./สี)	15	15.77
เวลารวม (นาท.)	855	4,290

นอกจากความแม่นยำแล้วต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการทำนายสีด้วยโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับการทำนายสีด้วยวิธีการใช้ซอฟต์แวร์การทำนายสีด้วยเซนเดียวกันดังตารางที่ 4.5 พบว่าการเตรียมตัวอย่างสีมีต้นทุนเฉลี่ยต่อสีเท่ากับ 36 บาท/สี หากแต่การเตรียมตัวอย่างสีสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจำเป็นต้องผสมให้ได้สีทุติยภูมิและตติยภูมิรวมทั้งหมดเป็น 272 สี ซึ่งมีต้นทุนเท่ากับ 9,792 บาท ต่างจากวิธีการใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีที่มีต้นทุนเท่ากับ 2,052 บาท ซึ่งมีต้นทุนน้อยกว่า 4 – 5 เท่า

เวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างสีสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมใช้เวลาต่อสีมากกว่าวิธีของซอฟต์แวร์ทำนายสี 0.77 นาทีต่อสี ทั้งนี้เนื่องจากมีสีตัวอย่างตติยภูมิซึ่งใช้เวลาในการเตรียมนานกว่า กอปรกับจำนวนตัวอย่างสีที่ใช้มีจำนวนทั้งหมด 272 สี โดยคิดเป็นจำนวนชั่วโมงได้เท่ากับ 71.5 ชั่วโมง ซึ่งแตกต่างจากวิธีการใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีที่ใช้เวลา 14.25 ชั่วโมงในการเตรียมฐานข้อมูล



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์จัดทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายสีหมึกพิมพ์ยูวี เฟล็กโซกราฟีบนฉลากพอลิโพรพิลีนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมและซอฟต์แวร์การทำนายสี ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ซอฟต์แวร์การทำนายสีมีค่าความต่างสีเฉลี่ย (mean ΔE^*_{94}) ในการทำนายสีอยู่ที่ 7.94 และมีค่าความต่างสีน้อยที่สุดอยู่ที่ 1.50 ส่วนค่าความต่างสีมากที่สุดอยู่ที่ 21.80

5.1.2 การใช้ซอฟต์แวร์ทำนายสีมีข้อจำกัดในเรื่องของความแม่นยำจากการคำนวณจากค่าการสะท้อนแสงและการดูดกลืนแสงของหมึกพิมพ์เพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้คำนึงถึงความสัมพันธ์อื่นๆ

5.1.3 โครงข่ายประสาทเทียมมีค่าความต่างสีเฉลี่ย (mean ΔE^*_{94}) ในการทำนายสีอยู่ที่ 3.75 และมีค่าความต่างสีน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.38 ส่วนค่าความต่างสีมากที่สุดอยู่ที่ 7.41

5.1.4 เฉดสีที่โครงข่ายประสาทเทียมทำนายสีได้แม่นยำน้อยกว่าเกิดจากชุดสีเรียนรู้ที่มีจำนวนเฉดสีแบบนั้นๆที่นำมาใช้ในการฝึกสอนมีจำนวนไม่เพียงพอ

5.1.5 จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย สามารถลดจำนวนยูนิตซ่อนในโครงข่ายประสาทเทียมลงจาก 26 ยูนิตเหลือ 19 ยูนิต ในขณะที่ประสิทธิภาพในการทำนายสียังคงใกล้เคียงกัน

5.1.6 โครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสีมากกว่าซอฟต์แวร์ทำนายสี เพราะสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ในหลายๆด้าน เช่น ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของหมึกพิมพ์ปฐมภูมิกับค่าการสะท้อนแสงของหมึกพิมพ์ ความสัมพันธ์ของลักษณะเฉพาะของการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์จำลองที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ ความสัมพันธ์ระหว่างกันระหว่างสารให้สีแต่ละชนิด ฯลฯ ได้ดีกว่าซอฟต์แวร์ทำนายสี

5.1.7 ต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการเตรียมฐานข้อมูลทั้งหมดสำหรับซอฟต์แวร์การทำนายสี คือ 2,088 บาทและ 855 นาทีตามลำดับ ในขณะที่การใช้โครงข่ายประสาทเทียมมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นจากการใช้จำนวนสีปฐมภูมิในการเตรียมตัวอย่างสีมากกว่าและสิ้นเปลืองต้นทุนและเวลามากกว่าอยู่ที่ 9,792 บาทและ 4,290 นาที ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการนำไปใช้ทำนายสีสำหรับหมึกพิมพ์เพราะมีความแม่นยำในการทำนายสีสูงแต่ต้องการข้อมูลในการเรียนรู้มากดังนั้นในอนาคตหากสามารถทำให้โครงข่ายประสาทเทียมลดปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ลงแต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการทำนายสีเท่าเดิมหรือดีขึ้นก็สามารถนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมการพิมพ์ได้อย่างแน่นอน



บรรณานุกรม

1. Standford, *Neural networks*, A.b. neuron, Editor.:
<https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/neural-networks/Neuron/index.html>.
2. Gupta, V. *Understanding Feedforward Neural Networks*. 2017 October 9,2017 [cited 2019 November 18, 2019]; Available from:
<https://www.learnopencv.com/understanding-feedforward-neural-networks/>.
3. Kartalopoulos, S.V. and S.V. Kartakopoulos, *Understanding neural networks and fuzzy logic: basic concepts and applications*. 1997: Wiley-IEEE Press.
4. Lange, S. and T. Zeugmann. *Monotonic versus non-monotonic language learning*. in *International Workshop on Nonmonotonic and Inductive Logic*. 1991. Springer.
5. Marquardt, D.W., *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963. **11**(2): p. 431-441.
6. Brownlee, J. *14 Different Types of Learning in Machine Learning*. *Start Machine Learning* 2019 November 11, 2019 [cited 2019 November 18, 2019]; Available from: <https://machinelearningmastery.com/types-of-learning-in-machine-learning/>.
7. Reed, R. and R.J. MarksII, *Neural smithing: supervised learning in feedforward artificial neural networks*. 1999: Mit Press.
8. Ma, Y., et al., *Neural Network Modeling for the Extraction of Rare Earth Elements from Eudialyte Concentrate by Dry Digestion and Leaching*. *Metals*, 2018. **8**: p. 267.
9. Herbst, W. and K. Hunger, *Industrial organic pigments: production, properties, applications*. 2006: John Wiley & Sons.
10. Joshi, J., D. Vaidya, and H. Shah, *Application of multi-flux theory based on Mie scattering to the problem of modeling the optical characteristics of colored pigmented paint films*. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society*

- Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur, 2001. **26**(3): p. 234-245.
11. Lai, P.L. and C. Fyfe, *A neural implementation of canonical correlation analysis*. Neural Networks, 1999. **12**(10): p. 1391-1397.
 12. Shamey, R. and T. Hussain, *Artificial intelligence in the colour and textile industry*. Review of Progress in Coloration and Related Topics, 2003. **33**: p. 33-45.
 13. Jawahar, M., C.B. Narasimhan Kannan, and M. Kondamudi Manobhai, *Artificial neural networks for colour prediction in leather dyeing on the basis of a tristimulus system*. Coloration Technology, 2015. **131**(1): p. 48-57.
 14. Hemingray, C. and S. Westland, *A novel approach to using neural networks to predict the colour of fibre blends*. Coloration Technology, 2016. **132**(4): p. 297-303.
 15. Westland, S., *Artificial neural networks and colour recipe prediction*. Proceedings of Colour Science, 1998. **98**.
 16. Warren S. Sarle and Cary, *FAQ3*. 2002.
 17. Møller, M., *Moller, M.F.: A Scaled Conjugate Gradient Algorithm For Fast Supervised Learning*. Neural Networks 6, 525-533. Neural Networks, 1993. **6**: p. 525-533.
 18. Foresee, F.D., , and M.T. Hagan, *Gauss-Newton approximation to Bayesian learning*

Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97)

1997. **3**: p. 1930-1935 vol.3.

19. Ricketts, R.E., *Practical optimization, Philip E. Gill, Walter Murray and Margret H. Wright, Academic Press Inc. (London) Limited, 1981. No. of pages: 401. Price £19.20, \$46.50. ISBN: 0.12.283950.1*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1982. **18**(6): p. 954-954.
20. [<A direct adaptive method for faster backpropagation learning.pdf>](#).

21. Battiti, R., *First- and second-order methods for learning between steepest descent and Newton's method*. *Neural Computation*, 1992. **4**(2): p. 141-166.
22. Hawkins, D.M., *The Problem of Overfitting*. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 2004. **44**(1): p. 1-12.
23. Guide, O.T.U.s., *Natick, MA, USA: The MathWorks*. 2000, Inc.



ภาคผนวก

ตารางแสดงชุดหมึกพิมพ์ทุติยภูมิ

no.	Formulation conc.							T
	C	M	Y	K	W	O	G	
1			1					99
2			2					98
3			4					96
4			8					92
5			16					84
6			32					68
7			64					36
8				1				99
9				2				98
10				4				96
11				8				92
12				16				84
13				32				68
14				64				36
15					1			99
16					2			98
17					4			96
18					8			92
19					16			84
20					32			68
21					64			36
22	1							99
23	2							98
24	4							96
25	8							92

26	16						84
27	32						68
28	64						36
29						1	99
30						2	98
31						4	96
32						8	92
33						16	84
34						32	68
35						64	36
36						1	99
37						2	98
38						4	96
39						8	92
40						16	84
41						32	68
42						64	36
43		1					99
44		2					98
45		4					96
46		8					92
47		16					84
48		32					68
49		64					36
50	10	90					
51	20	80					
52	40	60					
53	50	40					
54	60	40					
55	80	20					

56	90	10					
57	10		90				
58	20		80				
59	40		60				
60	50		50				
61	60		40				
62	80		20				
63	90		10				
64	10			90			
65	20			80			
66	40			60			
67	50			40			
68	60			40			
69	80			20			
70	90			10			
71	10				90		
72	20				80		
73	40				60		
74	50				50		
75	60				40		
76	80				20		
77	90				10		
78	10					90	
79	20					80	
80	40					60	
81	50					40	
82	60					40	
83	80					20	
84	90					10	
85	10						90

86	20						80	
87	40						60	
88	50						50	
89	60						40	
90	80						20	
91	90						10	
92		10	90					
93		20	80					
94		40	60					
95		50	40					
96		60	40					
97		80	20					
98		90	10					
99		10	90					
100		20	80					
101		40	60					
102		50	50					
103		60	40					
104		80	20					
105		90	10					
106		10			90			
107		20			80			
108		40			60			
109		50			40			
110		60			40			
111		80			20			
112		90			10			
113		10				90		
114		20				80		
115		40				60		

116		50				50		
117		60				40		
118		80				20		
119		90				10		
120		10					90	
121		20					80	
122		40					60	
123		50					40	
124		60					40	
125		80					20	
126		90					10	
127			10	90				
128			20	80				
129			40	60				
130			50	50				
131			60	40				
132			80	20				
133			90	10				
134			10		90			
135			20		80			
136			40		60			
137			50		40			
138			60		40			
139			80		20			
140			90		10			
141			10			90		
142			20			80		
143			40			60		
144			50			50		
145			60			40		

146			80			20		
147			90			10		
148				20	80			
149				40	60			
150				10		90		
151				10		90		
152					60	60		
153					10		90	
154					20		80	
155					40		60	
156					50		50	
157					60		40	
158					80		20	
159					90		10	

จากตารางแสดงชุดหมึกพิมพ์ทุติยภูมิจำนวน 159 สี แต่ละสีเป็นการผสมกันระหว่างหมึกพิมพ์ปฐมภูมิจำนวน 2 สี เช่น สีลำดับที่ 1 เป็นการผสมสีกันระหว่างหมึกพิมพ์สีเหลือง (Y) 1% กับ มีเดียม (T) 99% w/w

ตารางแสดงหมึกพิมพ์ทุติยภูมิ

no.	Formulation conc.							
	C	M	Y	K	W	O	G	T
1	70	20	10					
2	70	20		10				
3	70	20			10			
4	70	20				10		
5	70	20					10	
6	70		20	10				
7	70		20		10			
8	70		20			10		

9	70		20				10	
10	70	10	20					
11	70				20	10		
12	70				20		10	
13	70	10			20			
14	70		10		20			
15	70					20	10	
16	70	10				20		
17	70		10			20		
18	70			10		20		
19	70				10	20		
20	70	10					20	
21	70		10				20	
22	70			10			20	
23	70				10		20	
24	70					10	20	
25		70	20	10				
26		70	20		10			
27		70	20			10		
28		70	20				10	
29	10	70	20					
30		70			20	10		
31		70			20		10	
32	10	70			20			
33		70	10		20			
34		70				20	10	
35	10	70				20		
36		70	10			20		
37		70		10		20		
38		70			10	20		

39	10	70					20	
40		70	10				20	
41		70		10			20	
42		70			10		20	
43		70				10	20	
44	20	70	10					
45	20	70		10				
46	20	70			10			
47	20	70				10		
48	20	70					10	
49			70		20	10		
50			70		20		10	
51	10		70		20			
52		10	70		20			
53			70			20	10	
54	10		70			20		
55		10	70			20		
56			70	10		20		
57			70		10	20		
58	10		70				20	
59		10	70				20	
60			70	10			20	
61			70		10		20	
62			70			10	20	
63	20	10	70					
64	20		70	10				
65	20		70		10			
66	20		70			10		
67	20		70				10	
68		20	70	10				

69		20	70		10			
70		20	70			10		
71		20	70				10	
72	10	20	70					
73					70	20	10	
74	10				70	20		
75		10			70	20		
76			10		70	20		
77				10	70	20		
78	10				70		20	
79		10			70		20	
80			10		70		20	
81				10	70		20	
82					70	10	20	
83	20	10			70			
84	20		10		70			
85	20			10	70			
86	20				70	10		
87	20				70		10	
88		20	10		70			
89		20		10	70			
90		20			70	10		
91		20			70		10	
92	10	20			70			
93			20	10	70			
94			20		70	10		
95			20		70		10	
96	10		20		70			
97		10	20		70			
98				20	70	10		

99				20	70		10	
100	10			20	70			
101		10		20	70			
102			10	20	70			
103	10					70	20	
104		10				70	20	
105			10			70	20	

จากตารางแสดงชุดหมึกพิมพ์ตติยภูมิจำนวน 105 สี แต่ละสีเป็นการผสมกันระหว่างหมึกพิมพ์ปฐมภูมิจำนวน 3 สี เช่น สีลำดับที่ 1 เป็นการผสมสีกันระหว่างหมึกพิมพ์สีไซแอน (C) จำนวน 70% หมึกพิมพ์สีมาเจนตา (M) 20% กับ หมึกพิมพ์สีเหลือง (Y) 10% w/w



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวิทย์ โสหา
วัน เดือน ปี เกิด	20 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2551 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพ และการพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	45/344 เซอร์ราโน้คอนโดมิเนียม ซอยพระรามที่ 2 ซอย 54 แขวงสามด้า เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY