รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับการใช้งานกระดาษเวียนทำใหม่ในการพิมพ์

Colour Tolerances for the Use of Recycled Paper in Printing

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาร

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การใช้งานกระดาษเวียนทำใหม่เป็นหนึ่งในความพยายามเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดการใช้การเยื่อบริสุทธิ์ (virgin pulp) ในการผลิตกระดาษ อย่างไรก็ดีหากต้องการให้กระดาษเวียนทำใหม่มีสีสันและความสว่างเทียบเท่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์ต้องผ่านกระบวนการดึงหมึกพิมพ์ออกและการฟอกเยื่อที่ต้องอาศัยน้ำและสารเคมีปริมาณมาก ซึ่งการใช้งานกระดาษบางประเภทอาจไม่ต้องการกระดาษที่มีความขาวมากนัก โครงการวิจัยการวิจัยนี้จึงศึกษาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี (colour tolerance) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ เตรียมตัวอย่างกระดาษสีเพื่อใช้แทนกระดาษเวียนทำใหม่ที่มีสีสันต่าง ๆ ด้วยการพิมพ์จำนวน 96 ตัวอย่าง ประกอบด้วยสีสันหลัก 6 สี ได้แก่ สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีม่วง ที่มีระดับความสว่างและความอิ่มตัวที่แตกต่างกัน 15 ระดับ กระดาษตัวอย่างสีเทาที่มีระดับความสว่างแตกต่างกัน 5 ระดับ และกระดาษขาวที่ไม่มีการพิมพ์ ให้ผู้สังเกตจำนวน 30 คน เป็นชาย 15 คน หญิง 15 คน พิจารณากระดาษสีตัวอย่างทีละตัวอย่างภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 ในด้านความเหมาะสมการนำไปใช้งาน และการซื้อมาใช้สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ตามลำดับ โดยทำการทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างที่มีการพิมพ์ตัวอักษรและไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร และลำดับของตัวอย่างสีเป็นแบบสุ่ม กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ร้อยละ 50 ของผู้สังเกตทั้งหมดยอมรับ จากการทดลองพบว่า กระดาษเฉดสีเหลืองหรือสีน้ำเงินมีขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนด้านความอิ่มตัวสีได้มากกว่ากระดาษเฉดสีอื่น เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษพิมพ์เขียนมีขอบเขตกว้างที่สุดและกระดาษหนังสือพิมพ์แคบที่สุด ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าไม่ต่ำกว่า 75, 79 และ 82 และค่าความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) มีค่าไม่มากกว่า 22, 18 และ 17 สำหรับความเหมาะสมในการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษถ่ายเอกสาร และกระดาษหนังสือพิมพ์ ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่
เลขทะเบียน 014422
วัน, เดือน, ปี 22 ก.ย. 53

Abstract

One of various attempts to lessen environmental problems is by using recycled paper, so as to reduce the use of virgin pulp in a paper making process. Nevertheless, large amounts of water and chemical substances are required in the processes of deinking and bleaching in order to achieve recycled paper with its colour and lightness equivalent to those of virgin-pulp paper, whereby paper with high whiteness may, in fact, not be necessary for some applications. This research thus investigated colour tolerances of recycled paper for using as photocopy paper, notebook paper, and newspaper. A total of 96 paper samples were prepared by printing. The coloured papers included samples printed with 6 major hues, i.e. red, orange, yellow, green, blue and purple, varying in 15 levels of lightness and chroma, grey samples with 5 different lightness levels and an un-printed plain white paper. A panel of 30 observers (15 males and 15 females) assessed a series of coloured papers in a random order under D65 illumination. Observers were instructed to give yes/no responses for a given colour sample whether it was suitable, usable, and purchasable as photocopy, notebook paper, and newspaper, respectively. The experiments were done using paper samples with and without printed text. Colour tolerances were determined at a 50% probability point, i.e. 50% of observers gave "yes" response. The results showed that yellow-tinted or blue-tinted paper had larger colour tolerances in terms of chroma than did any other colour-tinted paper. Colour tolerances for notebook paper were the largest, while those for newspaper were the smallest. Lightness (L^*) values of no lower than 75, 79 and 82, and chroma values (C^*_{ab}) of no higher than 22, 18 and 17 were suitable for notebook, photocopy paper, and newspaper, respectively.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อ		ข
Abstract		ค
สารบัญเรื่อง		ง
สารบัญตาราง		จ
สารบัญภาพ		ช
บทที่ 1	**บทนำ**	**1**
	1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
	1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
	1.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ ที่เกี่ยวข้อง	2
	1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
	1.6 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2	**ทฤษฎี**	**4**
	2.1 กระดาษเวียนทำใหม่	4
	2.2 การวัดสีระบบซีไออี	6
	2.3 ปริภูมิสีซีแล็บ (CIELAB colour space)	7
	2.4 การวิเคราะห์สี	8
	2.5 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี (colour tolerance)	9
บทที่ 3	**การทดลอง**	**13**
	3.1 วัสดุและอุปกรณ์	13
	3.2 วิธีการทดลอง	13
บทที่ 4	**ผลการทดลองและอภิปราย**	**17**
	4.1 กระดาษสีตัวอย่าง	17
	4.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษถ่ายเอกสาร	20
	4.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน	24
	4.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษหนังสือพิมพ์	27
	4.5 การเปรียบเทียบผลของกระดาษทั้งสามประเภท	29

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

		หน้า
บทที่ 5	**สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ**	38
	5.1 สรุปผลการทดลอง	38
	5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง		41
ภาคผนวก ก	ค่าสีของกระดาษสีตัวอย่าง	43
ภาคผนวก ข	ค่าสีของกระดาษเวียนทำใหม่	46
ประวัตินักวิจัย		47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษถ่ายเอกสาร	22
4.2	ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน	24
4.3	ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษหนังสือพิมพ์	28
4.4	พื้นที่ของวงรีแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษแต่ละประเภท	31
ก1	ค่าสี RGB และ L*a*b* ของกระดาษสีตัวอย่าง	43
ข1	ค่าสี L*a*b* ของกระดาษเวียนทำใหม่	46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปริภูมิสี CIELAB	7
2.2	ขอบเขตความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรี	10
2.3	พารามิเตอร์ของวงรี	12
3.1	ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสีทดสอบ	13
3.2	ตัวอย่างชุดสีทดสอบ	14
3.3	ตัวอย่างแบบสอบถามในการทดลอง	15
4.1	การกระจายตัวของกระดาษสีตัวอย่างในแผนภูมิ a*b*	18
4.2	การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีแดง-สีเขียว ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$	18
4.3	การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีเหลือง-สีน้ำเงิน ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$	19
4.4	การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีส้ม-สีม่วง ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$	19
4.5	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	21
4.6	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	23
4.7	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	23
4.8	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	23
4.9	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	24

ภาพที่		หน้า
4.10	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	26
4.11	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	26
4.12	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	26
4.13	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	27
4.14	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	28
4.15	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	29
4.16	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	29
4.17	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	30
4.18	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	31
4.19	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	32

ภาพที่		หน้า
4.20	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	33
4.21	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	33
4.22	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	33
4.23	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	34
4.24	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	35
4.25	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	35
4.26	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	36
4.27	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	36
4.28	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร	37

บทที่ 1
บทนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอผลการดำเนินการโครงการวิจัยเรื่องเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับการใช้งานกระดาษเวียนทำใหม่ในการพิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยสาระจำนวน 5 บท โดยในบทที่ 1 นี้จะกล่าวถึงความสำคัญ กรอบแนวคิด และความเป็นมาของงานวิจัย รวมถึงวัตถุประสงค์ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และขอบเขตของงานวิจัย บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีที่สำคัญต่องานวิจัย บทที่ 3 แสดงรายละเอียดขั้นตอนการทดลอง บทที่ 4 รายงานผลการทดลองพร้อมการอภิปราย และสรุปผลการทดลอง รวมถึงข้อเสนอแนะที่เกิดขึ้นจากการทดลองและสำหรับการวิจัยต่อยอดในบทที่ 5

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พัฒนาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้รุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว อุตสาหกรรมไม่ว่าด้านใดต่างก็มีกำลังการผลิตที่สูงขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าผลผลิตที่เพิ่มขึ้นนั้นแปรผันตรงกับปริมาณการใช้สารเคมีและการสูญสิ้นไปของทรัพยากรธรรมชาติ อันเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญของปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม การผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ (recycled paper) เป็นหนึ่งในความพยายามเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นการลดการใช้เยื่อจากไม้ และใช้เยื่อจากกระดาษใช้แล้วในการผลิตกระดาษขึ้นมาใหม่ อย่างไรก็ดีในกระบวนการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่นั้น ต้องอาศัยสารเคมีปริมาณมากในขั้นตอนการดึงหมึกออกและการฟอกเยื่อ อีกทั้งยังใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำปริมาณมาก เพื่อให้สีของกระดาษเวียนทำใหม่มีสีขาวใกล้เคียงกับกระดาษที่ทำจากเยื่อบริสุทธิ์ (virgin pulp) ยิ่งมีการฟอกเยื่อมาก ยิ่งทำให้ได้กระดาษที่มีสีขาวยิ่งขึ้น แต่ก็ต้องชดเชยด้วยการใช้สารเคมี น้ำ และพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย

ความต้องการความขาวหรือความเป็นสีต่าง ๆ ของกระดาษ ย่อมขึ้นกับประเภทการใช้งานของกระดาษ ในทางการพิมพ์โดยทั่วไปต้องการกระดาษสีขาว หากแต่ว่าสีของกระดาษนั้นสามารถคลาดเคลื่อนไปจากสีขาวได้มากน้อยเพียงใด โดยที่การใช้งานนั้นยังเป็นที่ยอมรับ ข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ให้มีสีอยู่ภายในขอบเขตที่ต้องการ ซึ่งอาจช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีและการฟอกเยื่อลง โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี (colour tolerance) ของกระดาษเวียนทำใหม่ในการใช้งานทางการพิมพ์ โดยเน้นการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ เพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีในปริภูมิสี CIELAB ซึ่งเป็นระบบการวัดสีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ต่อไป

1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เกณฑ์การยอมรับความคลาดเคลื่อนสีของตัวอย่างสีใด ๆ ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งานเป็นสำคัญ การใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสีสูง ย่อมต้องมีขอบเขตความคลาดเคลื่อนสีที่ยอมรับได้แคบกว่างานทั่วไป กระดาษเวียนทำใหม่เมื่อนำมาใช้ในทางการพิมพ์ น่าจะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีต่าง ๆ กันไปขึ้นกับการนำไปใช้งานด้วยเช่นกัน ทั้งนี้รูปร่างของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีอาจไม่สมมาตร กล่าวคือ ทิศทางที่คลาดเคลื่อนไปในทางสีใดสีหนึ่ง หรือในทางลักษณะสีที่ปรากฏเห็น (colour attributes) ทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อาจกว้างกว่าอีกทิศทางหนึ่งได้ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีที่เท่ากันในต่างทิศทาง ส่งผลให้เกิดการยอมรับหรือปฏิเสธสีของกระดาษเพื่อการใช้งานที่แตกต่างกัน หากทราบข้อมูลดังกล่าว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ให้มีคุณภาพสีตามต้องการ

1.3 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ ที่เกี่ยวข้อง

ขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีในการเทียบสีตัวอย่างกับสีมาตรฐานนั้น แตกต่างไปตามตำแหน่งของสีในปริภูมิสี CIELAB และทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสี [1] กล่าวคือ รูปร่างและขนาดของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีขึ้นกับสีมาตรฐานที่ใช้เทียบ นอกจากนี้ยังขึ้นกับประเภทของตัวอย่างสี เช่น เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของตัวอย่างสีผ้าและพลาสติกนั้นแตกต่างกัน แม้ว่าวัสดุทั้งสองประเภทนั้นจะมีสีมาตรฐานเดียวกันก็ตาม [2] จากงานวิจัยเกี่ยวกับการรับรู้ความแตกต่างสีพบว่า คนเราจะมีการยอมรับความแตกต่างสีในทิศทางการเปลี่ยนแปลงของความสว่าง (lightness) ได้ดีที่สุด นั่นคือ สีตัวอย่างสามารถมีความแตกต่างไปจากสีมาตรฐานในด้านความสว่างได้มากกว่าในด้านสีสัน (hue) และความอิ่มตัวสี (chroma) [1, 2] อย่างไรก็ตามเราจะยอมรับความคลาดเคลื่อนสีได้มากหรือน้อย ยังขึ้นกับประเภทการใช้งานของตัวอย่างสี

ได้มีการศึกษาเรื่องเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษเวียนทำใหม่ของประเทศญี่ปุ่น [3-5] ซึ่งแสดงผลในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (แสดงความสว่างและความอิ่มตัวสีในปริภูมิสี CIELAB) พบว่า กระดาษเวียนทำใหม่ที่มีค่าความสว่างเท่ากับ 70 (เทียบจากกระดาษขาวปกติมีความสว่างเท่ากับ 100) สามารถนำมาใช้เป็นกระดาษพิมพ์เขียนได้ อย่างไรก็ดีคนญี่ปุ่นมีความคุ้นเคยกับการใช้กระดาษเวียนทำใหม่และอาจมีขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีกว้างกว่าคนในชาติอื่นที่ไม่นิยมใช้กระดาษเวียนทำใหม่ ซึ่งการรับรู้สีของคนชนชาติต่าง ๆ นั้นแตกต่างกันไปตามวัฒนธรรม [6] ดังนั้นจึงควรทำการทดสอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษเวียนทำใหม่โดยผู้สังเกตคนไทยเพื่อพิจารณาผลเปรียบเทียบ และแสดงผลในปริภูมิสี CIELAB

1.4 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ในการใช้เป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์
2. เพื่อเปรียบเทียบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีระหว่างกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ ที่เป็นกระดาษเวียนทำใหม่

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

ได้เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีและผลเปรียบเทียบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับการใช้งานกระดาษเวียนทำใหม่เพื่อเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์

1.5.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ได้สามารถใช้เป็นปัจจัยในการกำหนดคุณภาพในการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ ให้มีสีที่เหมาะสม และอาจช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

1.6 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ผลิตตัวอย่างกระดาษสี โดยการพิมพ์สีที่ต้องการลงบนกระดาษขาว เพื่อเป็นตัวอย่างทดสอบแทนกระดาษเวียนทำใหม่
2. ทดสอบหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้วยวิธีการทาง Psychophysics โดยอาศัยผู้สังเกตและการวัดสีในระบบซีไออี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎี

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและแนวคิดที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย โดยหัวข้อ 2.1 อธิบายถึงกระบวนการดึงหมึกพิมพ์ออกจากเยื่อกระดาษเพื่อการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่ ซึ่งทำให้ตระหนักถึงความสำคัญว่าในกระบวนการมีการใช้น้ำและสารเคมีปริมาณมาก รวมถึงพลังงานที่ต้องสูญเสียไปในการผลิตให้กระดาษมีความขาวเหมือนกระดาษที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์ หัวข้อ 2.2 อธิบายวิธีการและแนวคิดของการกำหนดค่าสีที่รับรู้เป็นตัวเลขที่มีความหมายทางคณิตศาสตร์ หัวข้อ 2.3 กล่าวถึงการแสดงค่าสีในระบบสี CIELAB ความหมายของค่าสีในมิติต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจถึงค่าสีที่ใช้ในการวิจัยนี้ หัวข้อ 2.4 กล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์สีของตัวอย่างสีและค่าความแตกต่างสี (colour difference) และในหัวข้อสุดท้ายเป็นการอธิบายเรื่องเกี่ยวกับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี (colour tolerance) เทคนิคและวิธีการวิเคราะห์ผลเพื่อหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีในโครงการวิจัยนี้

2.1 กระดาษเวียนทำใหม่

กระดาษเวียนทำใหม่ (recycled paper) หมายถึง กระดาษที่ทำจากเยื่อเวียนทำใหม่ (recycled pulp) โดยการนำกระดาษที่ใช้แล้ว เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ บรรจุภัณฑ์จากกระดาษ กระดาษสำนักงาน หนังสือทั่วไป มาผ่านการกระจายเยื่อ กระบวนการดึงหมึกออกและการฟอกเยื่อ ก่อนทำการขึ้นแผ่นกระดาษ แล้วจึงผ่านการทำให้แห้ง และอาจใส่สีหรือเคลือบด้วยสารเคลือบเงา

การนำกระดาษที่ใช้แล้วมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษใหม่ควรจะต้องผ่านกระบวนการดึงหมึกออก เพื่อที่จะให้ได้เยื่อกระดาษที่สามารถนำไปผลิตกระดาษที่มีคุณภาพสูงได้ การดึงหมึกออกจากเยื่อกระดาษจึงประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจมีการใช้ทุกขั้นตอน หรือเลือกใช้เฉพาะบางขั้นตอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระดาษที่ผ่านเข้ามาในกระบวนการ ชนิดของหมึกที่ต้องการดึงออก และผลผลิตสุดท้ายที่ต้องการผลิตเป็นสำคัญ ขั้นตอนที่สำคัญในการดึงหมึกพิมพ์ออกจากเยื่อกระดาษ (deinking process) ประกอบด้วย 9 ขั้นตอน [7] ดังนี้

2.1.1 การตีเยื่อหรือการกระจายเยื่อ (pulping or repulping)

การตีเยื่อหรือการกระจายเยื่อเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในกระบวนการดึงหมึกออก เพราะเป็นขั้นตอนที่หมึกมีการแยกตัวออกจากผิวหน้าของเส้นใยโดยอาศัยแรงกลและความร้อน หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง และเป็นขั้นตอนที่ขนาดอนุภาคของหมึกมีการควบคุมมากที่สุด ในขั้นตอนการตีเยื่อนี้ จะมีการเตรียมน้ำเยื่อ (pulp stock) โดยใช้เครื่องตีเยื่อ (pulper) เพื่อทำให้เส้นใยกระจายตัวแยกออกจากกันและทำให้อนุภาคของหมึกพิมพ์หลุดจากเส้นใย

2.1.2 การล้างเยื่อ (pre-washing)

การล้างเยื่อเป็นขั้นตอนที่กำจัดน้ำหลังจากการตีกระจายเยื่อแล้ว โดยเยื่อจะผ่านขั้นตอนการเอาน้ำออก (Dewatering) จนทำให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อเพิ่มขึ้นและเพื่อนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในการตีเยื่อครั้งต่อไป

2.1.3 การคัดกรองหรือการแยกกรอง (screening)

การคัดกรองหรือการแยกกรองเป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีขนาดใหญ่ออกจากเยื่อกระดาษ เช่น คลิปหนีบกระดาษ ลวดเย็บกระดาษ เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอมเหล่านี้หลุดไปสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนขั้นตอนต่อไป

2.1.4 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning หรือ Through-flow cleaning

การทำความสะอาดเยื่อแบบ Reverse cleaning หรือ Through-flow cleaning เป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยการคัดกรอง วิธีนี้จะใช้เครื่องทำความสะอาดหนีศูนย์กลาง (centifugal cleaner) กำจัดสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเส้นใยออกจากเยื่อกระดาษ อาทิเช่น พลาสติก โฟม เป็นต้น

2.1.5 การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning

การทำความสะอาดเยื่อแบบ Forward cleaning เป็นการใช้เครื่องทำความสะอาดหนีศูนย์กลาง กำจัดสิ่งแปลกที่มีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใยออกจากเยื่อกระดาษ เช่น เม็ดทราย เป็นต้น

2.1.6 การดึงหมึกพิมพ์ออกโดยวิธีการล้าง (washing)

การดึงหมึกพิมพ์คือขั้นตอนการกำจัดหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยกระดาษ เพื่อที่จะให้ได้เยื่อที่มีคุณภาพดี มีความสว่างสูง เป็นวิธีการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย โดยการล้างเยื่อด้วยน้ำซ้ำหลาย ๆ ครั้งจนได้เยื่อที่สะอาด

2.1.7 การเอาหมึกพิมพ์ออกโดยการกระจายเยื่อ (dispersion deinking)

การเอาหมึกพิมพ์ออกโดยการกระจายเยื่อ วิธีนี้ไม่ใช่เป็นการกำจัดหมึกออกอย่างแท้จริง หากแต่เป็นการนำกระดาษมาตีกระจายจนกระทั่งหมึกพิมพ์มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของหมึกพิมพ์ได้ด้วยตาเปล่า วิธีนี้จะเหมาะกับการกำจัดอนุภาคของหมึกที่มีขนาดใหญ่ เช่น หมึกพิมพ์ยูวี และหมึกโทนเนอร์ อย่างไรก็ตามหากนำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าความขาวสว่างแล้ว จะพบว่าความขาวสว่างของเยื่อโดยรวมลดลง

2.1.8 การฟอกเยื่อ (bleaching)

การฟอกเยื่อเป็นการช่วยทำให้เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างมากขึ้น โดยการนำเยื่อมาฟอกหลังจากที่ผ่านการดึงหมึกออกแล้ว ทั้งนี้ความขาวสว่างที่ได้จะมีค่ามากน้อยแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อ ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ และกระบวนการฟอกเยื่อที่จะนำมาใช้เป็นสำคัญ

2.1.9 การเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่และการเติมน้ำ (water recirculation and make up)

ปัญหาส่วนมากที่พบในการผลิตเยื่อรีไซเคิล คือ ระบบการเวียนน้ำกลับมาใช้ใหม่และการเติมน้ำ เนื่องจากน้ำที่นำมาใช้บางครั้ง มีค่า pH เป็นกรด และมี Alum แฝงอยู่ในรูปของ Aluminum ion และด้วย Aluminum ion ที่มากับน้ำนี่เอง ทำให้อนุภาคของหมึกที่ถูกแยกออกมาจากเส้นใยหลังจากที่ผ่านการกระจายเยื่อแล้วนั้น มีแนวโน้มที่จะกลับไปเกาะติดกับเส้นใยใหม่อีกครั้ง (ink redeposition)

2.2 การวัดสีระบบซีไออี

การวัดสีระบบซีไออี [8] พัฒนามาจากค่าไตรสติมูลัส XYZ ค่าไตรสติมูลัสเป็นค่าที่ใช้เพื่อระบุสีของวัตถุหนึ่ง ๆ ว่ามีปริมาณสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน อยู่มากน้อยเท่าไร ซึ่งอ้างอิงถึงปัจจัยในการเห็นสีทั้ง 3 อย่าง คือ ค่าการสะท้อนแสงของวัตถุ (reflectance) ค่าการกระจายพลังงาน (Spectral Power Distribution) และค่าฟังก์ชันการเทียบสีของตา (Color Matching Functions)

CIE ได้กำหนดวิธีการคำนวณค่าสีออกมาเป็นตัวเลข โดยนำค่า Spectral Power Distribution (SPD) ของแหล่งกำเนิดแสง นำมาคูณกับค่าการสะท้อนแสงของวัตถุ และคูณกับค่า Color matching functions ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$X = k \int_{400}^{700} p(\lambda) r(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{400}^{700} p(\lambda) r(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \qquad \text{สมการที่ 1}$$

$$Z = k \int_{400}^{700} p(\lambda) r(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

โดยที่ $$k = \frac{100}{\left(\int_{400}^{700} p(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \right)}$$

XYZ คือ ค่าไตรสติมูลัสที่คำนวณในช่วงความยาวคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ (400-700 นาโนเมตร)

k คือค่า normalizing factor ที่ปรับให้ค่า Y มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100 มีค่าเท่ากับ

$p(\lambda)$ คือค่าการกระจายพลังงานของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ (SPD)

$r(\lambda)$ คือค่าแฟคเตอร์การสะท้อนแสงในสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นนั้น ๆ

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ คือค่าฟังก์ชันการเปรียบเทียบสีที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

$d\lambda$ คือระยะห่างของความยาวคลื่นเพื่อระบุว่าให้ทำการคำนวณที่ทุก ๆ กี่นาโนเมตร

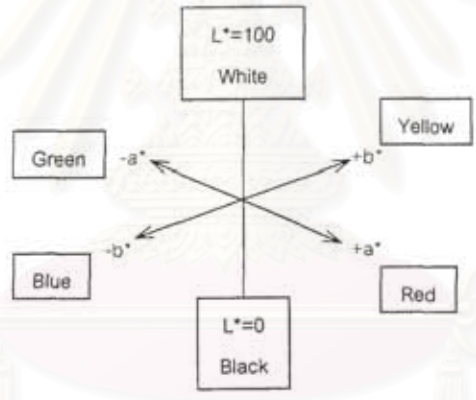
2.3 ปริภูมิสีซีแล็บ (CIELAB colour space)

การกำหนดค่าสีของ CIELAB สร้างขึ้นจากทฤษฎีการมองเห็นสีคู่ตรงข้าม [9] ซึ่งต่างจากระบบการวัดสีด้วยค่าไตรสติมูลัสซึ่งเป็นระบบที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีการมองเห็นสีไตรโครมาติก โดยปริภูมิซีแล็บเป็นปริภูมิสี 3 มิติ ประกอบด้วย 3 แกน คือ แกน L* แกน a* และ แกน b* ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยที่

แกน L* เป็นแกนที่ใช้แสดงมิติความสว่างสีสัมพัทธ์ของสี มีค่าอยู่ระหว่าง 0-100

แกน a* เป็นแกนที่ใช้แสดงความเป็นสีแดงและความเป็นสีเขียวของสี โดยส่วนของแกนที่เป็น "+" ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีแดง ยิ่งค่า a* มีค่าเป็นบวกมากเท่าไร สีก็ยิ่งมีความเป็นสีแดงมากเท่านั้น และส่วนของแกนที่เป็น "-" ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเขียว ยิ่งค่า a* มีค่าเป็นลบมากเท่าใด สีก็ยิ่งมีความเป็นสีเขียวมากขึ้นเท่านั้น

แกน b* เป็นแกนที่ใช้แสดงความเป็นสีเหลืองและความเป็นสีน้ำเงินของสี โดยส่วนแกนที่เป็น "+" ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเหลือง ยิ่งค่า b* มีค่าเป็นบวกมากเท่าไร สีก็ยิ่งมีความเป็นสีเหลืองมากเท่านั้น และส่วนของแกนที่เป็น "-" ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีน้ำเงิน ยิ่งค่า b* มีค่าเป็นลบมากเท่าใด สีก็ยิ่งมีความเป็นสีน้ำเงินมากขึ้นเท่านั้น



ภาพที่ 2.1 ปริภูมิสี CIELAB

สำหรับสีอรงค์ทั้งหลายเป็นสีที่มีค่า a* และ b* เท่ากับ 0 แต่มีค่า L* แตกต่างกัน โดยที่สีที่ขาวที่สุดจะมีค่า L* = 100 และสีที่ดำที่สุดจะมีค่า L* = 0 ส่วนสีเทาจะเป็นค่าสีที่มีค่า L* อยู่ระหว่างค่า L* สีขาวและ L* สีดำ

ค่าสี L*a*b* สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2 ดังนี้

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3}-16 \quad \text{สำหรับ } Y/Y_n > 0.008856$$

$$L^* = 903.3\,(Y/Y_n) \quad \text{สำหรับ } Y/Y_n <= 0.008856 \qquad \text{สมการที่ 2}$$

$$a^* = 500[F(X/X_n)-F(Y/Y_n)]$$

$$b^* = 200[F(Y/Y_n)-F(Z/Z_n)]$$

โดยที่ $F(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3}$ สำหรับ $X/X_n > 0.008856$

$F(X/X_n) = 7.787\,(X/X_n) + 16/116$ สำหรับ $X/X_n <= 0.008856$

$F(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3}$ สำหรับ $Y/Y_n > 0.008856$

$F(Y/Y_n) = 7.787\,(Y/Y_n) + 16/116$ สำหรับ $Y/Y_n <= 0.008856$

$F(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3}$ สำหรับ $Z/Z_n > 0.008856$

$F(Z/Z_n) = 7.787\,(Z/Z_n) + 16/116$ สำหรับ $Z/Z_n <= 0.008856$

ซึ่ง X, Y, Z คือ ค่าไตรสติมูลัสของตัวอย่างสีหนึ่ง ๆ

X_n, Y_n, Z_n คือค่าไตรสติมูลัสของสีขาวที่อ้างอิงถึง (reference white) อาจหมายถึงกระดาษที่ใช้เป็นวัสดุรองรับงานพิมพ์หรือแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน

จากสมการที่ 2 เมื่อคำนวณหาค่า L*, a* และ b* ได้แล้วสามารถนำค่าที่ได้มาหาค่า Hue (h_{ab}) และค่า Chroma (C^*_{ab}) ได้ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

$$h_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \qquad \text{สมการที่ 3}$$

$$C^*_{ab} = (a^{*2}+b^{*2})^{1/2} \qquad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่ h_{ab} คือ มุมของสีสันของสีนั้น

C^*_{ab} คือความอิ่มตัวสัมพัทธ์ของสีนั้น

a* และ b* คือ ค่าสีพิกัด a* และ b* ของสีนั้น

2.4 การวิเคราะห์สี

การวิเคราะห์สี [10] ทั่วไปมีรูปแบบพื้นฐานที่สำคัญ 2 ส่วนคือ การตรวจสอบ (examination) เป็นขั้นตอนที่ตรวจสอบปัจจัย 3 อย่างที่มีผลในการรับรู้สี และการประเมิน (assessment) ใช้ในการตัดสินใจว่าตัวอย่างนั้นจะเหมือนกับสีมาตรฐานหรือไม่ แบ่งการทำงานได้ 3 ส่วนคือ

1. พิจารณาว่าตัวอย่างกับมาตรฐานแตกต่างกันหรือไม่ ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นค่าที่ได้จากการอ่านเครื่องมือวัด หรือการแสดงความคิดต่อสีที่เห็น

2. การอธิบายความแตกต่างของสี โดยหลังจากที่ประเมินแล้วว่าค่าสีมีความแตกต่างกัน จะต้องมีการวิเคราะห์อธิบายความแตกต่างของสีนั้นให้สามารถสื่อให้ทุกคนรู้ตรงกันว่าแตกต่างจริง วิธีหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายความแตกต่างของสีในระบบการวัดสีของซีไออีคือ การคำนวณความแตกต่างของสีสองสีใด ๆ ในปริภูมิสี CIELAB ดังสมการที่ 5

$$\Delta E^*_{ab} = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$ สมการที่ 5

ΔE^*_{ab} หมายถึง ความแตกต่างสีของสีสองสีในปริภูมิสี CIELAB

ΔL^* หมายถึง ความแตกต่างของค่า L^* ระหว่างสีสองสี

Δa^* หมายถึง ความแตกต่างของค่า a^* ระหว่างสีสองสี

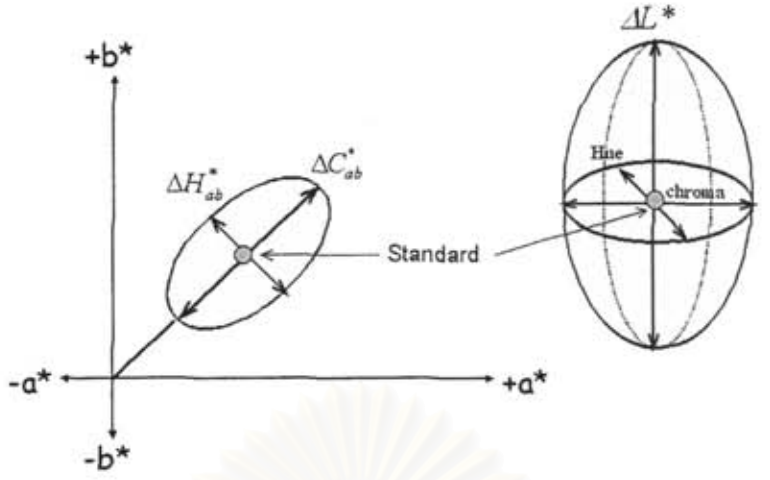
Δb^* หมายถึง ความแตกต่างของค่า b^* ระหว่างสีสองสี

3. การพิจารณาว่าจะยอมรับความแตกต่างของสีนั้น ๆ หรือไม่ (pass/fail colour tolerance) ในทางปฏิบัติคือ การจำกัดค่า ΔE^*_{ab} นั่นเอง ซึ่งในการจำกัดค่าความแตกต่างนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะหรือจุดประสงค์ของการนำสีนั้นไปใช้งานและความต้องการของลูกค้า

2.5 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี (colour tolerance)

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีหมายถึง ขอบเขตการยอมรับหรือไม่ยอมรับความแตกต่างหรือความคลาดเคลื่อนไปของสีใด ๆ เมื่อเทียบกับสีมาตรฐาน ซึ่งเป็นการใช้ค่าตัวเลขที่แสดงความแตกต่างสีแทนการเทียบสีและตัดสินการยอมรับหรือปฏิเสธความคลาดเคลื่อนสี (pass/fail colour tolerance) ด้วยการมองเปรียบเทียบ ตัวอย่างเช่น ในการผลิตสีหนึ่ง เรากำหนดเกณฑ์การยอมรับความคลาดเคลื่อนสีไว้ที่ 3 ΔE^*_{ab} นั่นคือ เมื่อสีที่ผลิตได้มีค่าความแตกต่างสีเมื่อเทียบกับสีมาตรฐานแล้ว มีค่าน้อยกว่า 3 ΔE^*_{ab} ความแตกต่างนั้นถือว่าอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ แต่ถ้าคำนวณค่า ΔE^*_{ab} ได้มากกว่า 3 ΔE^*_{ab} จะปฏิเสธ (reject) สีนั้น เพราะได้ตั้งเกณฑ์ไว้ที่ 3 ΔE^*_{ab} เป็นต้น

เมื่อใช้ค่าความแตกต่างสี ΔE^*_{ab} เป็นเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี ขอบเขตการยอมรับหรือปฏิเสธความแตกต่างสีของสีตัวอย่างเมื่อเทียบกับสีมาตรฐานจะเป็นรูปทรงกลมในปริภูมิสี CIELAB ซึ่งไม่สอดคล้องกับการเทียบสีด้วยตา เนื่องจากตามนุษย์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสีด้านต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดยทั่วไปแล้วเราจะสังเกตเห็นความแตกต่างของสีสัน (hue) ก่อน จากนั้นจึงเป็นความอิ่มตัวสี (chroma) และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ ขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีที่ตามองเห็นจึงมีลักษณะเป็นรูปวงรีในปริภูมิสี CIELAB [11] โดยมีแกนมุขสำคัญหลัก (ด้านที่ยาวที่สุด) อยู่ในทิศทางของความสว่าง (L^*) และมีลักษณะเป็นรูปวงรีในแผนภูมิ a^* b^* โดยมีแกนหลักอยู่ในแนวการเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ขอบเขตความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรี

การหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีคือ การหาขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ที่ผู้สังเกตตัดสินใจยอมรับ/ไม่ยอมรับตัวอย่างสีที่เบี่ยงเบนไปจากสีมาตรฐาน ซึ่งขีดเริ่มเปลี่ยนนี้แสดงด้วยค่าสีของตัวอย่างสีหรือความแตกต่างของค่าสีระหว่างตัวอย่างสีกับสีมาตรฐาน วิธีการหาขีดเริ่มเปลี่ยนมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือ Method of Constant Stimuli [12] เพราะเป็นวิธีง่ายต่อผู้สังเกต และมีความแปรปรวนของผลการทดลองที่เกิดจากตัวผู้สังเกตต่ำกว่าวิธีอื่น วิธีนี้ให้ผู้สังเกตตัดสินการยอมรับหรือปฏิเสธความคลาดเคลื่อนสีของตัวอย่างสีที่มีความแตกต่างของสีในมิติต่าง ๆ รอบ ๆ สีมาตรฐาน โดยมีลำดับการแสดงตัวอย่างสีแบบสุ่ม ผู้สังเกตตอบว่า ใช่/ไม่ใช่ (yes/no response) สำหรับคำถามเกี่ยวกับการยอมรับตัวอย่างสีนั้น ผลการทดลองที่ได้คือ ร้อยละของจำนวนผู้สังเกตที่ตอบว่า "ใช่" (ยอมรับ) สำหรับตัวอย่างสีแต่ละตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาขีดเริ่มเปลี่ยนด้วยวิธีการทางสถิติที่เรียกว่า Probit Analysis [13]

2.5.1 *Probit Analysis*

เมื่อนำค่าร้อยละหรือความถี่ของจำนวนผู้สังเกตที่ตอบยอมรับ (frequency of yes response) มาพล็อตกับค่าสีของตัวอย่างสีในมิติ (เช่น ค่า C^*_{ab}) ที่แตกต่างไปจากสีมาตรฐาน (stimulus intensity) จะได้เส้นโค้งรูปตัวเอส (sigmoid curve) ซึ่งอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงปกติ ดังสมการที่ 6

$$P = \int_{-\infty}^{z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz \qquad \text{สมการที่ 6}$$

โดยที่

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \qquad \text{สมการที่ 7}$$

P คือ ความน่าจะเป็นที่ตัวอย่างสีที่มีค่าสี *x* มีค่ามากกว่าการแจกแจงของการยอมรับที่มีค่าเฉลี่ย μ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ โดยที่ *z* เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติมาตรฐาน (z score) ค่าความน่าจะเป็น *P* ได้มาจากการหาพื้นที่ใต้โค้งปกตินั่นเอง

การวิเคราะห์หาขีดเริ่มเปลี่ยนด้วย Probit Analysis ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

1. การแปลงค่าความน่าจะเป็นของคำตอบที่ได้จากผู้สังเกต (*P*) นั่นคือค่าความถี่ของจำนวนผู้สังเกตที่ตอบยอมรับไปเป็นค่า *z* ด้วยการกลับสมการที่ 6
2. ค่า *z* ที่ได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าสีของตัวอย่างสีในมิติที่ทดสอบดังสมการที่ 8

$$z = ax + b \qquad \text{สมการที่ 8}$$

ดังนั้น $$\mu = -b/a \quad \text{และ} \quad \sigma = 1/a \qquad \text{สมการที่ 9}$$

μ คือค่าของขีดเริ่มเปลี่ยนที่ความน่าจะเป็นของการตอบยอมรับเท่ากับ 0.5 (หรือร้อยละ 50)

2.5.2 การสร้างเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรี

ผลที่ได้จาก Probit Analysis เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของตัวอย่างสีที่อยู่รอบ ๆ สีมาตรฐานตามทิศทางการเปลี่ยนแปลงของมิติสีที่ทดสอบ เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลอง จึงควรแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้วยรูปวงรีที่กำหนดจากค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเหล่านั้น [14]

วงรีความคลาดเคลื่อนสีแสดงขอบเขตการยอมรับตัวอย่างสีที่เบี่ยงเบนไปจากสีมาตรฐานในปริภูมิสีที่กำหนด โครงการวิจัยนี้วิเคราะห์หาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีในปริภูมิสี CIELAB โดยพิจารณาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ a*b* ซึ่งแสดงวงรีโครมาติซิตี้ (chromaticity ellipse) ดังสมการที่ 10

$$\Delta E^2 = g_{11}(\Delta a^*)^2 + g_{22}(\Delta b^*)^2 + 2g_{12}\Delta a^*\Delta b^* \qquad \text{สมการที่ 10}$$

ΔE คือ ความแตกต่างสีรอบ ๆ (หรือระยะทางจาก) สีมาตรฐาน

Δa^*, Δb^* คือ ความแตกต่างของค่า a*, b* ระหว่างตัวอย่างสีกับสีมาตรฐาน

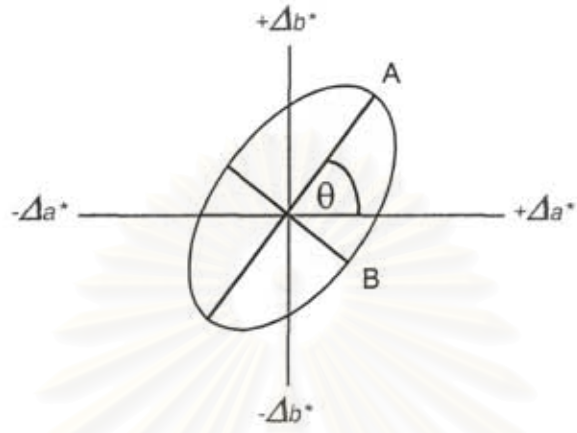
g_{11}, g_{22}, g_{12} คือ สัมประสิทธิ์ของวงรี

พารามิเตอร์ของวงรีได้แก่ ความยาวของแกนหลัก A (แกนยาว) และ B (แกนสั้น) และมุมแสดงทิศทางการเอียงของวงรี (θ) (ภาพที่ 2.3) สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์ *g* ดังสมการที่ 11-13

$$A = 1/\sqrt{g_{22} + g_{12}\cot\theta} \qquad \text{สมการที่ 11}$$

$$B = 1/\sqrt{g_{11} - g_{12}\cot\theta} \qquad \text{สมการที่ 12}$$

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2g_{12}}{g_{11} - g_{22}}\right) \qquad \text{สมการที่ 13}$$



ภาพที่ 2.3 พารามิเตอร์ของวงรี

สัมประสิทธิ์ g สามารถประมาณค่าได้จากค่าผลรวมความแตกต่างกำลังสองที่น้อยที่สุด (S^2) ระหว่างค่าการยอมรับที่ได้จากการทดลอง (ΔV) กับค่า ΔE ที่คำนวณด้วยสมการที่ 10 สำหรับจำนวน N ตัวอย่างสี ดังสมการที่ 14 [15]

$$S^2 = \sum_{i=1}^{N}(\Delta V_i - \Delta E_i)^2 \qquad \text{สมการที่ 14}$$

ค่า ΔV มีค่าเท่ากันสำหรับทุก ๆ ตัวอย่างสีที่แสดงขีดเริ่มเปลี่ยนรอบ ๆ สีมาตรฐาน นั่นคือ ทุกจุดแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ผู้สังเกตยอมรับ ดังนั้นสามารถกำหนดค่า ΔV ไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งสำหรับการคำนวณประมาณค่าที่เหมาะที่สุดของสัมประสิทธิ์ g ด้วยสมการที่ 14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

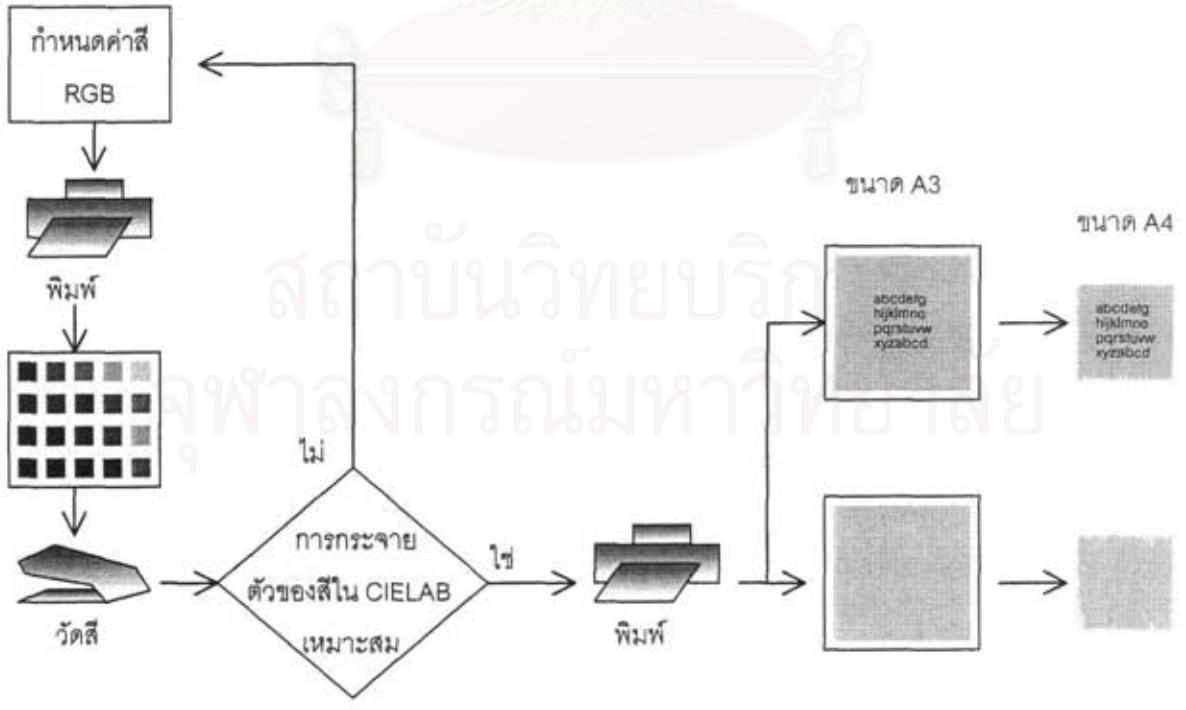
1. กระดาษถ่ายเอกสาร Double A ขนาด A3 น้ำหนัก 80 แกรม
2. เครื่องพิมพ์เลเซอร์ Epson Aculaser C8600
3. เครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ต Epson StylusPro 7800
4. เครื่องวัดสี X-Rite SP62 Spectrophotometer
5. ตู้แสงมาตรฐาน Highlight 2000 ใช้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ เป็นการสร้างตัวอย่างกระดาษสีเพื่อใช้ในการทดลอง และตอนที่ 2 การหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้วยการสังเกต เป็นการทดลองโดยให้ผู้สังเกตพิจารณาสีที่ยอมรับในการใช้งาน

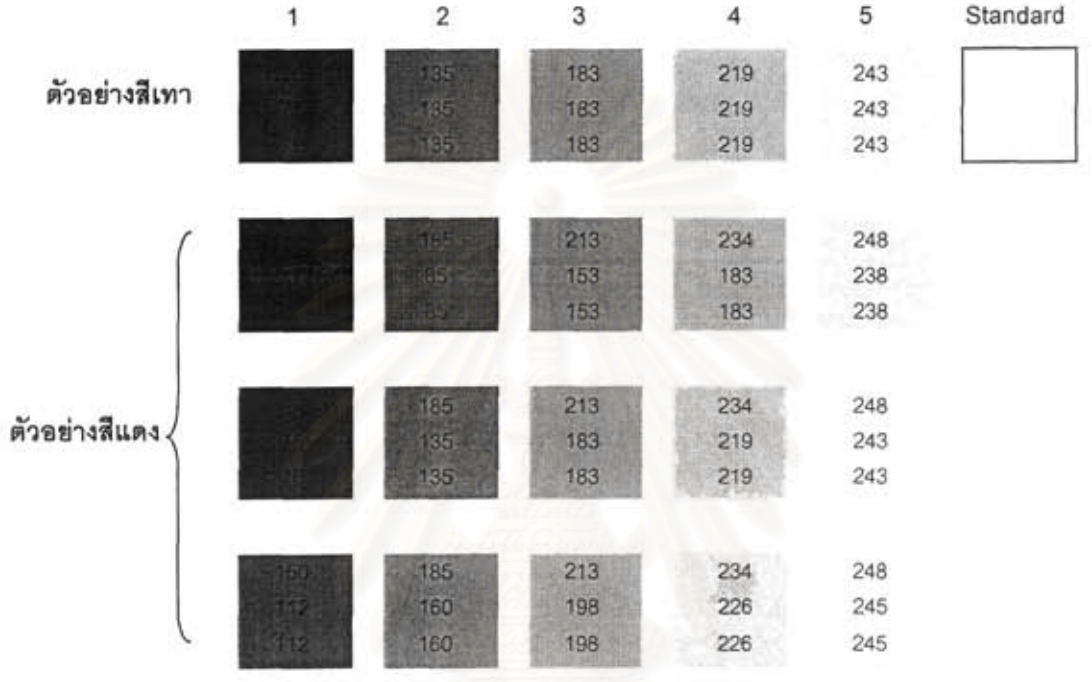
ตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างสีทดสอบ

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสีทดสอบ

1. สร้างตัวอย่างสีที่มีขนาด 0.5 x 0.5 นิ้ว จำนวน 7 สี ได้แก่ สีเทา สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีม่วง โดยกำหนดค่าสี R, G, B ในโปรแกรม Microsoft Word และกำหนดให้แต่ละสีมีระดับความแตกต่างของค่าความสว่าง (Lightness) และความอิ่มตัวสี (Chroma) เท่ากับ 15 ระดับ ยกเว้นสีเทา ที่มีความแตกต่างของความสว่างเพียงแค่ 5 ระดับ ตัวอย่างการสร้างชุดตัวอย่างสีทดสอบสีเทาและสีแดงแสดงดังภาพที่ 3.2 ตัวเลขในแต่ละแผ่นสีแสดงค่าสี R, G, B ที่กำหนดตามลำดับ สี Standard คือ สีของกระดาษขาว (ไม่มีการพิมพ์สี)



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างชุดสีทดสอบ

2. พิมพ์ตัวอย่างสีทั้งหมดบนกระดาษขาวและวัดค่าสี XYZ ภายใต้สภาวะ D65/10 (SPIN) คำนวณค่าสี L*a*b* ของตัวอย่างสีโดยใช้สีของกระดาษขาวเป็นสีขาวอ้างอิง

3. พิจารณาการกระจายตัวของตัวอย่างสีทดสอบที่สร้างขึ้นจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และค่า b* หากพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีในทิศทางใดกระจัดกระจาย ไม่แสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าความอิ่มตัวสีที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ ต้องกลับไปปรับเปลี่ยนค่าสี R, G, B ของตัวอย่างสีในข้อ 1 และดำเนินการตามข้อ 2 ซ้ำ จนได้การกระจายตัวของตัวอย่างสีที่เหมาะสม

4. นำค่าสี R, G, B ของตัวอย่างสีที่เหมาะสม (จากข้อ 3) มาพิมพ์ลงบนกระดาษขาว โดยพิมพ์สี 1 สีตัวอย่างต่อ 1 หน้ากระดาษขนาด A3 ดังนั้นได้ตัวอย่างกระดาษทดสอบทั้งหมด 96 สี ซึ่งเป็นสีเทา 5 ระดับ และเป็นสีหลักอีก 6 สี ได้แก่ สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีม่วง อย่างละ 15 ระดับ รวมกับตัวอย่างกระดาษขาวที่ไม่มีการพิมพ์สี

5. สร้างตัวอย่างกระดาษสีทดสอบอีก 1 ชุด ที่มีการพิมพ์ตัวอักษรลงบนกระดาษด้วย

6. นำตัวอย่างกระดาษขนาด A3 ทั้งสองชุดมาตัดให้มีขนาด A4 ดังนั้นกระดาษตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะมีสีเดียวกันทั่วทั้งแผ่น

ตอนที่ 2 การหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้วยการสังเกต

การประเมินเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ ผู้สังเกตมองกระดาษตัวอย่างสีทดสอบทั้งหมด 96 สีที่เตรียมขึ้นจากการทดลองตอนที่ 1 ทีละตัวอย่างสีภายใต้สภาวะการมองควบคุม (controlled viewing condition) แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. จัดทำแบบสอบถามเพื่อใช้ในการทดลอง แบบสอบถามนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของข้อมูลเกี่ยวกับผู้สังเกตและคำชี้แจ้งเกี่ยวกับสิ่งที่ผู้สังเกตต้องปฏิบัติในการทดลอง ส่วนที่สองเป็นตารางบันทึกผลการทดลองของผู้สังเกต ตัวอย่างแบบสอบถามแสดงในภาพที่ 3.3

แบบสอบถาม

ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่

ชื่อ_____ อายุ_____ ปี เพศ_____

คณะ_____ สถาบัน_____ ชั้นปี_____

วันที่___เดือน_____พ.ศ._____เวลา_____น. เบอร์โทร._____

กรุณาพิจารณากระดาษที่แสดงในตู้แสงมาตรฐานและตอบคำถามต่อไปนี้

1. ท่านคิดว่ากระดาษสีนี้เหมาะสมสำหรับใช้งานเป็น กระดาษถ่ายเอกสาร (Photocopy), กระดาษพิมพ์เขียน (Notebook) และกระดาษหนังสือพิมพ์ (Newspaper) หรือไม่

   โดยให้ทำเครื่องหมาย ✓ ในช่อง "เหมาะสม" ถ้าท่านคิดว่า "เหมาะสม"

   และทำเครื่องหมาย × ในช่อง "เหมาะสม" ถ้าท่านคิดว่า "ไม่เหมาะสม"

2. ท่านคิดว่ากระดาษสีนี้ สามารถนำไปใช้งานเป็น กระดาษถ่ายเอกสาร (Photocopy), กระดาษพิมพ์เขียน (Notebook) และกระดาษหนังสือพิมพ์ (Newspaper) หรือไม่

   โดยให้ทำเครื่องหมาย ✓ ในช่อง "ใช้งานได้" ถ้าท่านคิดว่า "สามารถนำไปใช้งานได้"

   และทำเครื่องหมาย × ในช่อง "ใช้งานได้" ถ้าท่านคิดว่า "ไม่สามารถนำไปใช้งานได้"

3. ท่านคิดว่าท่านจะซื้อกระดาษสีนี้นี้มาใช้งานเป็น กระดาษถ่ายเอกสาร (Photocopy), กระดาษพิมพ์เขียน (Notebook) และกระดาษหนังสือพิมพ์ (Newspaper) หรือไม่

   โดยให้ทำเครื่องหมาย ✓ ในช่อง "ซื้อมาใช้" ถ้าท่านคิดว่า "สามารถซื้อไปใช้งานได้"

   และทำเครื่องหมาย × ในช่อง "ซื้อมาใช้" ถ้าท่านคิดว่า "ไม่สามารถซื้อไปใช้งานได้"

.....

1. กระดาษถ่ายเอกสาร (Photocopy)

No.	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้	No.	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้	No.	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้
1				33				65			
:				:				:			
32				64				96			

ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างแบบสอบถามในการทดลอง

2. ทำการทดลองกับผู้สังเกตที่มีการมองเห็นสีปกติ (ผ่านการทดสอบด้วย Ishihara Test) จำนวน 30 คน เป็นเพศชาย 15 คนและเพศหญิง 15 คน อายุระหว่าง 20–30 ปี

3. นำแผ่นกระดาษสีแต่ละสี ที่ทำการพิมพ์ลงบนกระดาษขาวแบบไม่มีตัวอักษรมาให้ผู้สังเกตแสดงความคิดเห็นต่อสีของกระดาษโดยตัดสินว่า กระดาษตัวอย่างสีนี้

1) เหมาะในการใช้งานหรือไม่
2) สามารถใช้งานได้หรือไม่
3) จะซื้อมาใช้งานหรือไม่

สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยอธิบายให้ผู้สังเกตเข้าใจว่า "เหมาะสม" หมายถึง กระดาษสีนั้นสามารถใช้งานเป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุได้ดี เมื่อมีการเขียนหรือพิมพ์ข้อความแล้วอ่านได้ง่าย

"ใช้งานได้" หมายถึง กระดาษสีนั้นสามารถนำมาใช้งานเป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุได้ เมื่อมีการเขียนหรือพิมพ์ข้อความแล้วสามารถอ่านได้

"ซื้อมาใช้" หมายถึง การตัดสินใจของผู้สังเกตเองว่าจะซื้อกระดาษสีนั้นมาใช้เป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุหรือไม่

ทั้งนี้ลำดับตัวอย่างสีที่ให้ผู้สังเกตทำการทดลองเป็นแบบสุ่ม สภาวะที่ใช้ในการทดสอบทำภายใต้ตู้ควบคุมแสงมาตรฐาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 โดยเปลี่ยนแผ่นกระดาษสีตัวอย่างเป็นชุดที่มีการพิมพ์ตัวอักษร

5. หาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษแต่ละประเภทด้วยวิธี Probit Analysis (อธิบายในหัวข้อ 2.5.1 หน้า 10) โดยกำหนดการยอมรับที่ร้อยละ 50 ของจำนวนผู้สังเกตทั้งหมด เป็นขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ในแต่ละทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสีในปริภูมิสี CIELAB สำหรับการยอมรับด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้"

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ทำการทดลองกับผู้สังเกตที่มีการมองเห็นสีปกติ (ผ่านการทดสอบด้วย Ishihara Test) จำนวน 30 คน เป็นเพศชาย 15 คนและเพศหญิง 15 คน อายุระหว่าง 20–30 ปี

3. นำแผ่นกระดาษสีแต่ละสี ที่ทำการพิมพ์ลงบนกระดาษขาวแบบไม่มีตัวอักษรมาให้ผู้สังเกตแสดงความคิดเห็นต่อสีของกระดาษโดยตัดสินว่า กระดาษตัวอย่างสีนี้

1) เหมาะในการใช้งานหรือไม่
2) สามารถใช้งานได้หรือไม่
3) จะซื้อมาใช้งานหรือไม่

สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยอธิบายให้ผู้สังเกตเข้าใจว่า "เหมาะสม" หมายถึง กระดาษสีนั้นสามารถใช้งานเป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุได้ดี เมื่อมีการเขียนหรือพิมพ์ข้อความแล้วอ่านได้ง่าย

"ใช้งานได้" หมายถึง กระดาษสีนั้นสามารถนำมาใช้งานเป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุได้ เมื่อมีการเขียนหรือพิมพ์ข้อความแล้วสามารถอ่านได้

"ซื้อมาใช้" หมายถึง การตัดสินใจของผู้สังเกตเองว่าจะซื้อกระดาษสีนั้นมาใช้เป็นกระดาษตามประเภทที่ระบุหรือไม่

ทั้งนี้ลำดับตัวอย่างสีที่ให้ผู้สังเกตทำการทดลองเป็นแบบสุ่ม สภาวะที่ใช้ในการทดสอบทำภายใต้ตู้ควบคุมแสงมาตรฐาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 โดยเปลี่ยนแผ่นกระดาษสีตัวอย่างเป็นชุดที่มีการพิมพ์ตัวอักษร

5. หาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษแต่ละประเภทด้วยวิธี Probit Analysis (อธิบายในหัวข้อ 2.5.1 หน้า 10) โดยกำหนดการยอมรับที่ร้อยละ 50 ของจำนวนผู้สังเกตทั้งหมด เป็นขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ในแต่ละทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสีในปริภูมิสี CIELAB สำหรับการยอมรับด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้"

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

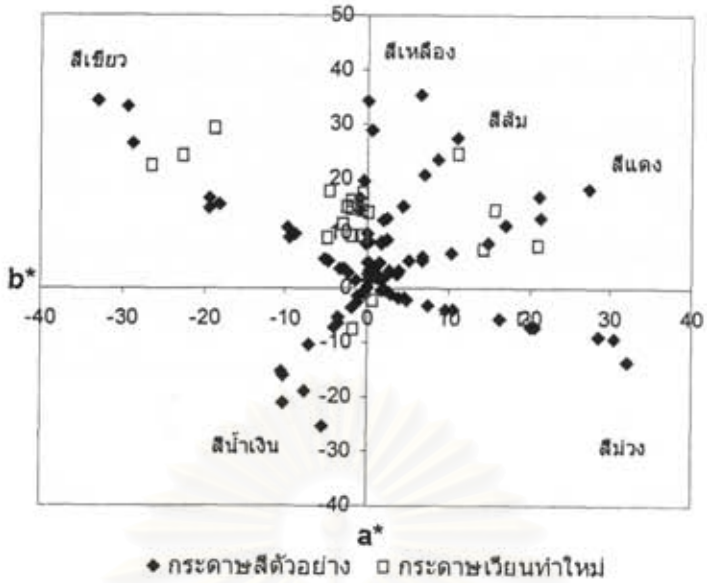
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปราย

การทดลองหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน เริ่มขั้นตอนแรกด้วยการสร้างกระดาษสีตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองให้ผู้สังเกตประเมินการยอมรับการใช้งานเป็นกระดาษประเภทต่าง ๆ กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีจากตัวอย่างสีที่ผู้สังเกตจำนวนร้อยละ 50 ของผู้สังเกตทั้งหมดยอมรับกระดาษสีนั้นสำหรับใช้งานเป็นกระดาษแต่ละประเภท โดยผลการทดลองแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อดังนี้ หัวข้อ 4.1 อภิปรายผลการเตรียมกระดาษสีตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบแทนกระดาษเวียนทำใหม่ หัวข้อ 4.2–4.4 อภิปรายผลของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ตามลำดับ และหัวข้อ 4.5 เปรียบเทียบผลเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษแต่ละประเภท

4.1 กระดาษสีตัวอย่าง

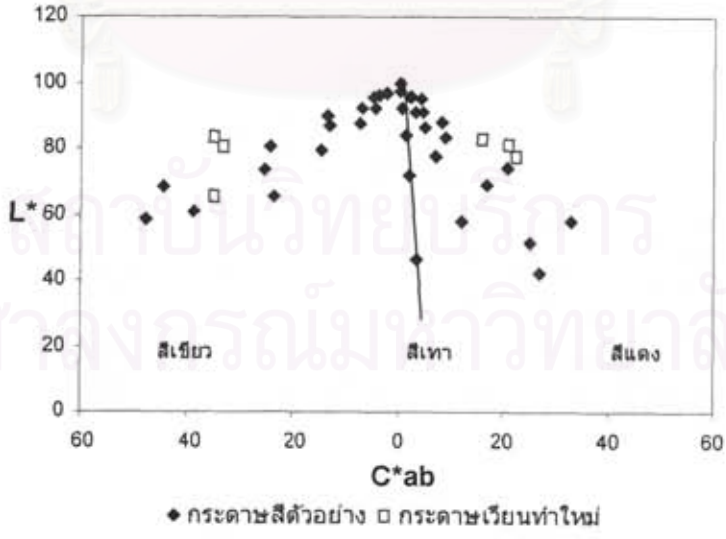
กระดาษสีตัวอย่างทั้งหมด 96 สี ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวอย่างทดสอบแทนการผลิตกระดาษเวียนทำใหม่มีสีสันต่าง ๆ ครอบคลุมการกระจายตัวของสีในปริภูมิสี CIELAB ประกอบด้วยกระดาษตัวอย่างสีเทา 5 ระดับความสว่างสี กระดาษตัวอย่างสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีม่วง ที่มีระดับความสว่างและความอิ่มตัวสีที่แตกต่างกันสีละ 15 ระดับ ผลการกระจายตัวในแผนภูมิ a*b* ของกระดาษสีตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 4.1 (ค่าข้อมูลสี RGB และ L*a*b* ของแต่ละตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ก) นอกจากนี้เพื่อเปรียบเทียบว่ากระดาษสีตัวอย่างครอบคลุมสีของกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้อยู่ทั่วไปหรือไม่ จึงได้ทำการสุ่มตัวอย่างกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้เป็น กระดาษหนังสือพิมพ์ และกระดาษพิมพ์เขียน (สีสันต่าง ๆ) มาวัดค่าสี ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ค่าข้อมูลสีของแต่ละตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ข)

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างสีทดสอบที่พิมพ์ลงบนกระดาษขาวปกติที่ใช้อยู่มีการกระจายตัวครอบคลุมสีหลักทั้ง 6 สี ในแต่ละสีมีระดับความอิ่มตัวสีลดหลั่นกันเป็นลำดับ (ระยะห่างของตำแหน่งตัวอย่างสีจากจุดตัดกันของแกน a* และ b* ที่จุดศูนย์ แสดงระดับของความอิ่มตัวสี) ครอบคลุมตั้งแต่ความอิ่มตัวสีต่ำ (สีจาง ๆ มีความเป็นสีนั้น ๆ น้อย) ไปจนถึงระดับที่มีความอิ่มตัวสีปานกลาง (มีความเป็นสีนั้น ๆ มากขึ้น) เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสีกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้ทั่วไปพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วกระดาษเวียนทำใหม่มีสีเหลืองและมีความอิ่มตัวสีต่ำ ($C^*_{ab} < 20$) กระดาษสีตัวอย่างที่สร้างขึ้นครอบคลุมสีของกระดาษเวียนทำใหม่ทั้งด้านสีสันและความอิ่มตัวสี



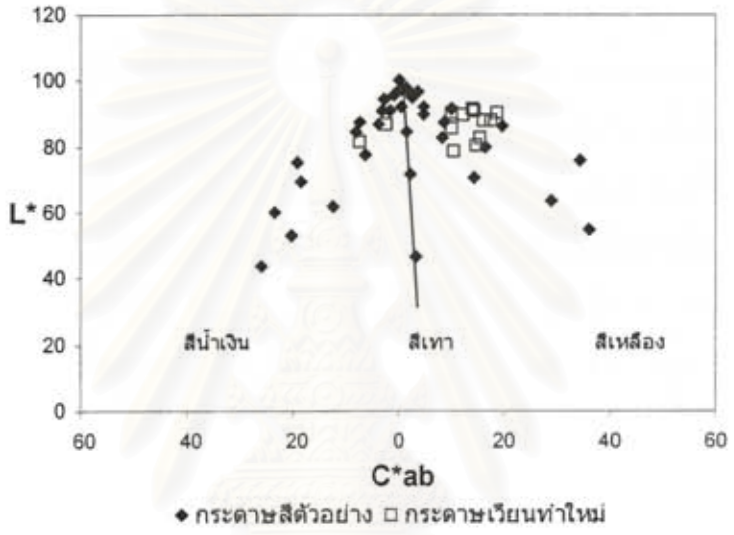
ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของกระดาษสีตัวอย่างในแผนภูมิ a*b*

ในส่วนของตัวอย่างกระดาษสีเทา มีความอิ่มตัวสีเท่ากับศูนย์ หรือมีค่าน้อยมาก ๆ (ใกล้เคียงศูนย์) ค่าสีจึงรวมตัวอยู่บริเวณจุดตัดของกราฟ ความแตกต่างของระดับสีของตัวอย่างสีเทาจะเห็นได้ชัดเจนจากค่าความสว่าง (L*) ภาพที่ 4.2–4.4 แสดงการกระจายตัวของกระดาษสีตัวอย่างและกระดาษเวียนทำใหม่ในแผนภูมิที่พล็อตระหว่างค่าความสว่างและความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) สำหรับสีแดง-สีเขียว สีเหลือง-สีน้ำเงิน และสีส้ม-สีม่วง ตามลำดับ รวมถึงกระดาษตัวอย่างสีเทา

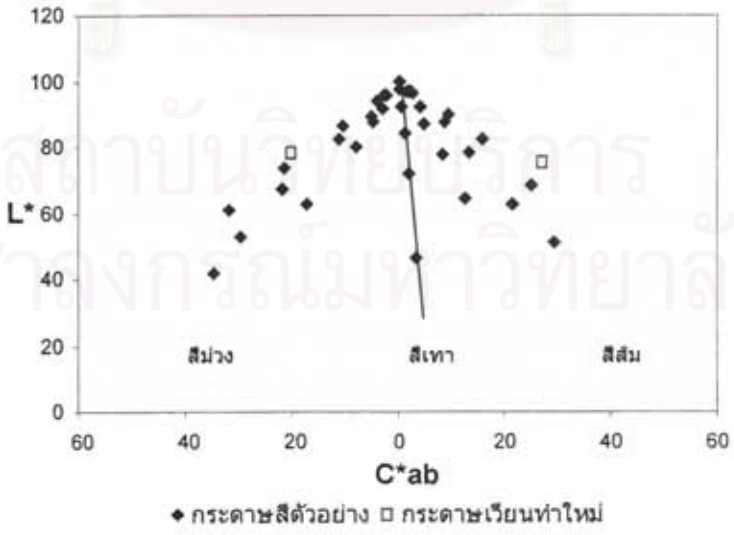


ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีแดง-สีเขียว ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$

จากภาพที่ 4.2 เห็นได้ว่า กระดาษตัวอย่างสีเขียวและสีแดงมีจำนวนมากพอครอบคลุมสีของกระดาษเวียนทำใหม่ กระดาษสีตัวอย่างมีระดับความอิ่มตัวสีและความสว่างลดหลั่นกันเป็นลำดับ ในขณะที่จำนวนชนิดของกระดาษเวียนทำใหม่ที่มีสีแดงหรือสีเขียวมีไม่มากนัก เนื่องจากในกระบวนการผลิตกระดาษต้องเพิ่มขั้นตอนการใส่สารสีเพื่อให้กระดาษมีสีสันต่าง ๆ หากไม่มีการใส่สารสีลงไปกระดาษจะมีสีเหลือง ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.3 ที่กระดาษเวียนทำใหม่สีเหลืองมีจำนวนมากที่สุด ความสว่างและความอิ่มตัวสีของกระดาษเวียนทำใหม่ขึ้นกับกระบวนการฟอกเยื่อ ยิ่งมีการฟอกเยื่อมาก กระดาษยิ่งมีความขาวและความสว่างสูงขึ้น



ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีเหลือง-สีน้ำเงิน ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของกระดาษตัวอย่างสีส้ม-สีม่วง ในแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 4.2–4.4 จะเห็นว่า สีเทามีค่าความอิ่มตัวสีใกล้เคียงค่าศูนย์ ในทางอุดมคติสีเทาควรมีค่าความอิ่มตัวสีเท่ากับศูนย์ เนื่องจากเป็นสีอรงค์ (achromatic) ไม่มีสีสัน (hue) ใด ๆ เลย แต่ในการทดลองนี้ ไม่สามารถสร้างตัวอย่างกระดาษสีเทาที่มีค่าความอิ่มตัวสีเท่ากับศูนย์ได้ในทุกระดับความสว่าง จะเห็นได้ว่าเมื่อสีเทามีความสว่างต่ำลง นั่นคือมีการพิมพ์สีลงไปมากขึ้น ตัวอย่างสีมีค่าความอิ่มตัวสีเบี่ยงเบนไปจากค่าศูนย์ ไปในทิศทางของโทนสีเหลือง เนื่องจากสีขาวของกระดาษปกติที่ไม่มีการพิมพ์สีลงไป ไม่ได้มีค่า a* และ b* เท่ากับศูนย์เมื่อเทียบกับสีขาวในอุดมคติ หากแต่มีความเป็นสีน้ำเงินอยู่เล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผู้สังเกตจะรู้สึกว่าสีขาวน้ำเงินมีความสว่างมากกว่าสีขาวเหลือง ในการผลิตกระดาษจึงมีการใส่สารเพิ่มความขาวสว่าง (Optical Brightening Agent, OBA) ซึ่งช่วยเพิ่มค่าการสะท้อนแสงช่วงแสงสีน้ำเงิน ทำให้ค่าสีของกระดาษเป็นสีน้ำเงินเล็กน้อย ในการทดลองนี้ใช้กระดาษที่ไม่มีการพิมพ์สีเป็นสีขาวอ้างอิง จึงกำหนดค่า a* และ b* ของกระดาษขาวเท่ากับศูนย์ เมื่อมีการพิมพ์สีเทาลงไป ค่าสีที่วัดได้จึงมีค่าเป็นสีเหลืองเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเบี่ยงเบนนั้นมีค่าน้อยมาก และไม่สามารถสังเกตเห็น จึงยอมรับกระดาษสีเทาเป็นตัวอย่างทดสอบในการทดลองได้

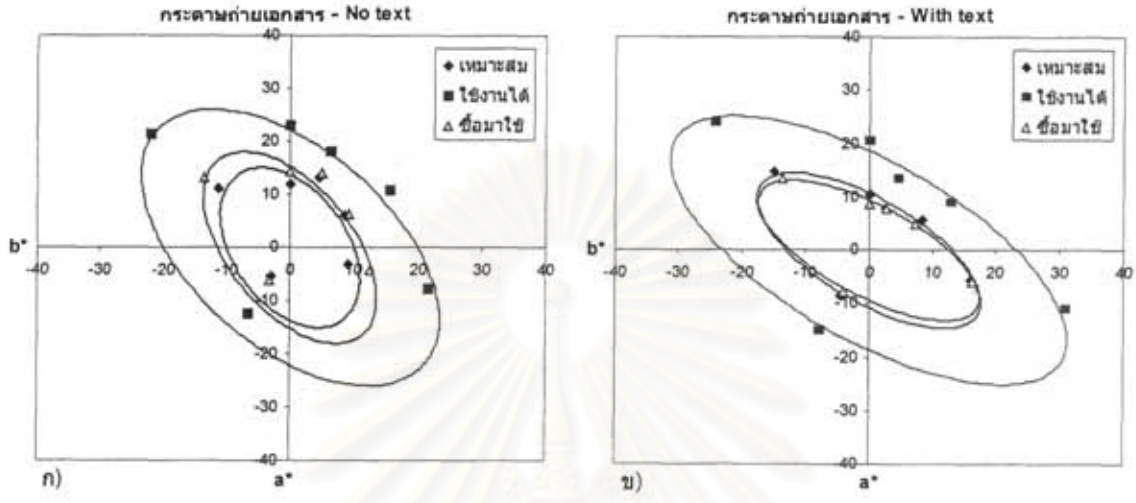
ตัวอย่างสีหลักอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างลดหลั่นลงเป็นลำดับเช่นเดียวกับตัวอย่างสีเทา ครอบคลุมตั้งแต่ค่า L* เท่ากับ 100 (กระดาษขาว ไม่มีการพิมพ์สี) ถึง 40 (ความสว่างปานกลาง) ความอิ่มตัวสีของแต่ละสีหลักครอบคลุมตั้งแต่ค่า C^*_{ab} เท่ากับ 0 (ไม่มีสี) ถึง 40 กล่าวคือ มีการกระจายตัวครอบคลุมตั้งแต่ตัวอย่างกระดาษที่มีสีเพียงเล็กน้อย จนถึงกระดาษที่มีสีชัดเจน แต่ไม่ได้รวมถึงกระดาษที่มีสีสดหรือเข้มมากจนเกินไป เพราะไม่เหมาะสมในการใช้งานในทางการพิมพ์อย่างแน่นอน จึงไม่มีความจำเป็นในการทดลองนี้ และเพื่อเป็นการจำกัดจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไม่ให้มีมากเกินไป อันจะเป็นอุปสรรคต่อการทดลองด้วยผู้สังเกตในขั้นต่อไป นอกจากนี้กระดาษสีตัวอย่างยังครอบคลุมสีของกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้อยู่ทั่วไปทั้งด้านสีสัน ความอิ่มตัวสีและความสว่าง ดังนั้นกระดาษสีตัวอย่างเหล่านี้จึงมีความเหมาะสมใช้เป็นตัวอย่างทดสอบเพื่อหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี

4.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษถ่ายเอกสาร

จากการทดลองให้ผู้สังเกตตัดสินสีของกระดาษตัวอย่างที่คิดว่า "เหมาะสม" หรือ "ใช้งานได้" หรือจะ "ซื้อมาใช้" งานหรือไม่ (ดูความหมายของเกณฑ์แต่ละด้านจากวิธีการทดลองตอนที่ 2 ข้อ 3 หน้า 16) เมื่อจะนำกระดาษสีนั้นมาใช้เป็นกระดาษถ่ายเอกสาร ผลเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ผู้สังเกตยอมรับในการใช้ด้านต่าง ๆ กำหนดจากตำแหน่งค่าสีที่มีจำนวนผู้สังเกตร้อยละ 50 ยอมรับการใช้งานด้านนั้น โดยทำการทดสอบด้วยกระดาษสีที่มีและไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร ภาพที่ 4.5 แสดงผลเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ a*b*

จุดที่แสดงในภาพที่ 4.5 คือตำแหน่งสีที่ผู้สังเกตร้อยละ 50 ของจำนวนผู้สังเกตทั้งหมดยอมรับกระดาษสีที่คลาดเคลื่อนไปจากกระดาษขาวปกติที่มีค่าสี a*=b*=0 ในทิศทางของสีสันต่าง ๆ สำหรับใช้

งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร รูปวงรีคือเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่สร้างขึ้นจากจุดเหล่านั้น จะเห็นได้ว่า ผู้สังเกตยอมรับความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษในทิศทางของสีสันต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ผู้สังเกตจะยอมรับกระดาษที่มีสีเหลืองเขียว ได้มากกว่ากระดาษที่มีสีแดงหรือสีน้ำเงิน



ภาพที่ 4.5 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

เมื่อพิจารณาเกณฑ์ด้านต่าง ๆ พบว่า เกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" ซึ่งให้ผู้สังเกตลงความเห็นว่ากระดาษสีนั้นสามารถนำมาใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสารได้หรือไม่ มีขอบเขตกว้างที่สุด ในขณะที่ขอบเขตของเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" ใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากผู้สังเกตคิดว่า กระดาษที่มีสีเหมาะสมสำหรับเป็นกระดาษถ่ายเอกสารนั้น ไม่ควรมีสีมากเกินไป ไม่เช่นนั้นเมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ตัวอักษรอ่านยาก และผู้สังเกตจะตัดสินใจซื้อกระดาษมาใช้งานเมื่อกระดาษนั้นมีสีที่เหมาะสม ในส่วนของเกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" ถึงแม้กระดาษจะมีสีสันที่มีความอิ่มตัวสีสูง แต่ก็สามารถนำไปใช้ถ่ายเอกสารและปรากฏตัวอักษรที่อ่านได้ แม้ว่าความเปรียบต่างสีระหว่างตัวอักษรกับสีของกระดาษจะไม่ชัดเจนมากนัก

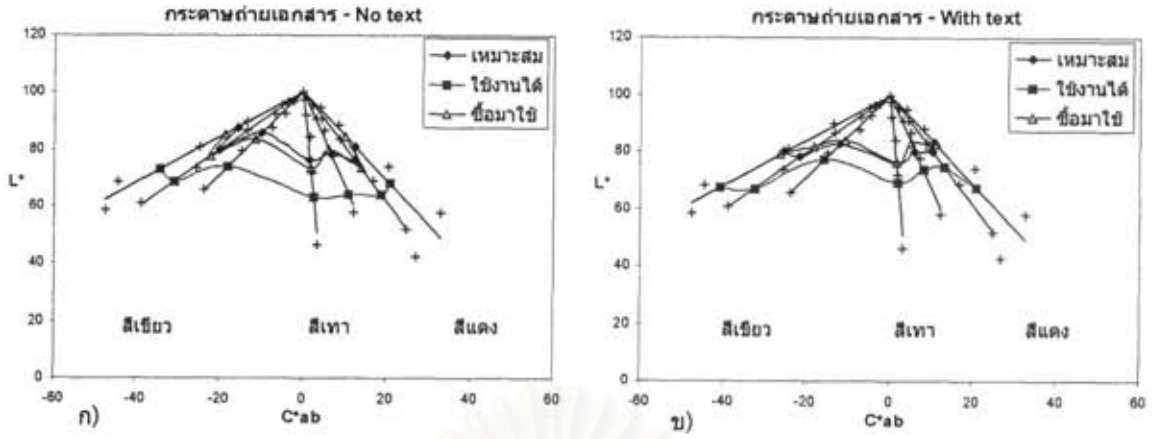
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการใช้กระดาษตัวอย่างแบบที่มีการพิมพ์ตัวอักษรและไม่มีการพิมพ์ตัวอักษรพบว่า แนวโน้มการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีในทิศทางต่าง ๆ นั้นคล้ายคลึงกันคือ ผู้สังเกตยอมรับกระดาษสีเหลืองเขียวได้มากกว่าสีอื่น ๆ ขอบเขตการยอมรับด้านความเหมาะสมกับการตัดสินซื้อมาใช้ใกล้เคียงกันและแคบกว่าด้านการใช้งาน อย่างไรก็ตามพบว่า ผลการทดสอบด้วยกระดาษที่มีการพิมพ์ตัวอักษรให้ขอบเขตการยอมรับกว้างกว่าเมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร โดยพิจารณาได้จากค่าความยาวของแกนหลัก A (แกนยาว) และ B (แกนสั้น) ของวงรีแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่แสดงในตารางที่ 4.1 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากกระดาษที่มีตัวอักษรนั้นเหมือน

กับตัวอย่างการใช้งานจริง ผู้สังเกตสามารถประเมินความยากง่ายในการอ่าน ความชัดเจนของตัวอักษรเมื่อพิมพ์อยู่บนกระดาษสีนั้น ๆ ขณะที่เมื่อมองกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร ผู้สังเกตต้องจินตนาการว่ากระดาษสีนั้นจะใช้ได้หรือไม่ เมื่อนำไปถ่ายเอกสารตัวอักษรที่ปรากฏจะชัดเจนหรือไม่ ผู้สังเกตจึงมักเลือกกระดาษที่มีสีอ่อน ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถใช้งานได้จริง ดังนั้นขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีจึงแคบกว่าการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรเมื่อพิจารณาเกณฑ์ด้านเดียวกัน

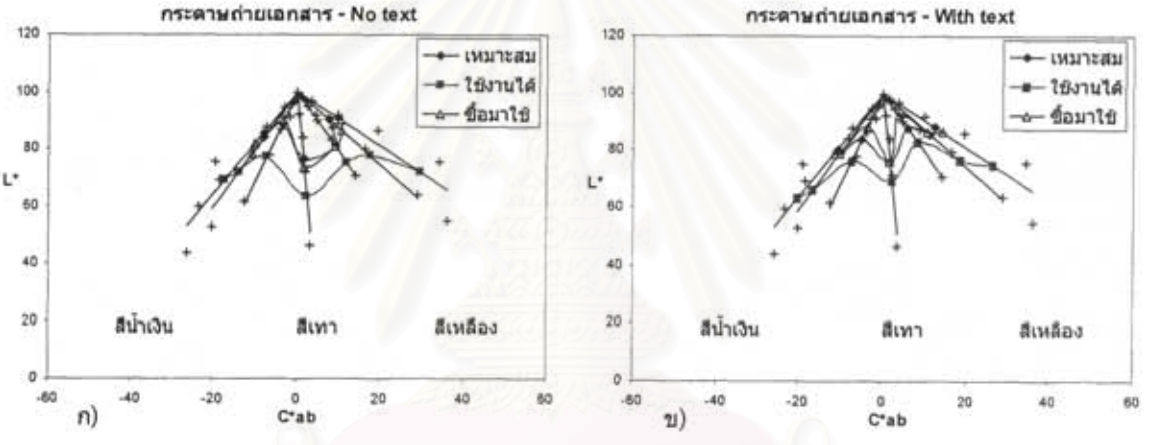
ตารางที่ 4.1 ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษถ่ายเอกสาร

	กระดาษสีตัวอย่างไม่มีตัวอักษร			กระดาษสีตัวอย่างมีตัวอักษร		
	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้
A	16.12	30.71	20.11	20.99	36.89	20.24
B	9.33	16.90	10.33	9.06	15.84	8.10
θ	116.01	129.39	121.05	143.24	144.13	146.27

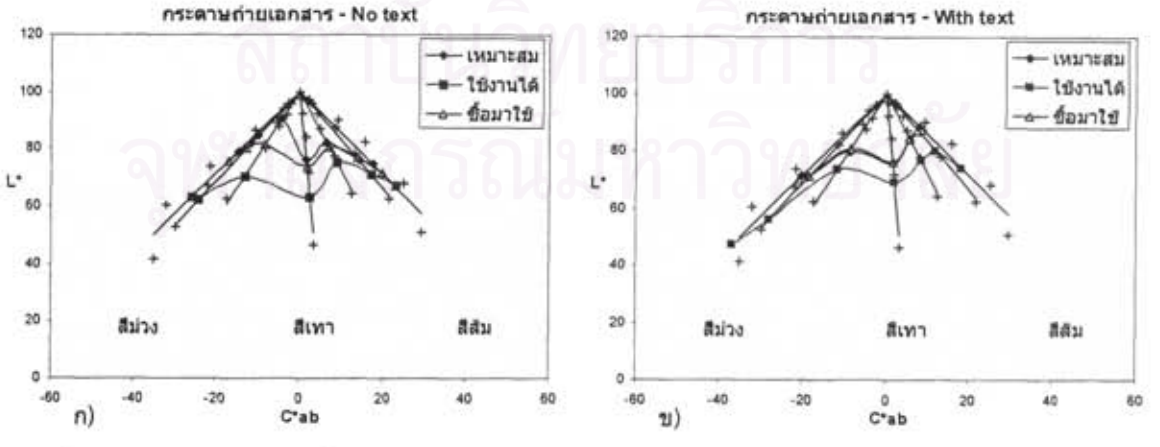
ภาพที่ 4.6–4.8 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ สำหรับทิศทางของสีเขียว-สีแดง สีน้ำเงิน-สีเหลือง และสีม่วง-สีส้ม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีเห็นได้ว่าสีของกระดาษตัวอย่างที่ผู้สังเกตคิดว่าเหมาะสมต่อการใช้งานและจะซื้อมาใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสารมีความสว่างสูง ($L^* > 75$) และมีความอิ่มตัวสีต่ำ ($C^*_{ab} < 20$) นั่นคือ มีสีใกล้เคียงกับกระดาษขาว มีความเป็นสีน้อย ขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีของทั้งสองด้าน ("เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้") ใกล้เคียงกันมาก ส่วนสีของกระดาษตัวอย่างที่ผู้สังเกตคิดว่าสามารถนำมาใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสารได้นั้นมีความสว่างที่ต่ำกว่า ($L^* \approx 60$) และมีความอิ่มตัวสีในระดับปานกลาง ($C^*_{ab} \approx 30$) นั่นแสดงให้เห็นว่าเกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" มีขอบเขตการยอมรับสีของกระดาษกว้างกว่าเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" อย่างไรก็ดีจะเห็นได้ว่า ทิศทางของสีสันมีผลต่อเกณฑ์การยอมรับความสว่างและความอิ่มตัวสีของกระดาษตัวอย่าง ผู้สังเกตสามารถยอมรับกระดาษสีน้ำเงิน และสีม่วง ที่ระดับความสว่างต่ำลง ($L^* \approx 60$) ได้มากกว่ากระดาษสีอื่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกระดาษสีน้ำเงินหรือสีม่วง ให้ความรู้สึกว่าสว่างกว่าหรือมีความขาวมากกว่าเมื่อกระดาษมีเฉดสีอื่นที่ระดับความสว่าง (ค่า L^*) เดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้สังเกตยอมรับกระดาษสีเหลืองที่ความอิ่มตัวสีมากกว่ากระดาษสีอื่น ซึ่งน่าจะเกิดจากความคุ้นเคยในการใช้งานกระดาษสีเหลืองมากกว่ากระดาษสีอื่น ๆ ผู้สังเกตจึงยอมรับได้เมื่อกระดาษมีสีเหลือง แต่กระดาษสีสันอื่นที่ระดับความอิ่มตัวสี (ค่า C^*_{ab}) เดียวกัน ผู้สังเกตจะรู้สึกว่ามีสีสันมากเกินไป



ภาพที่ 4.6 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.7 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

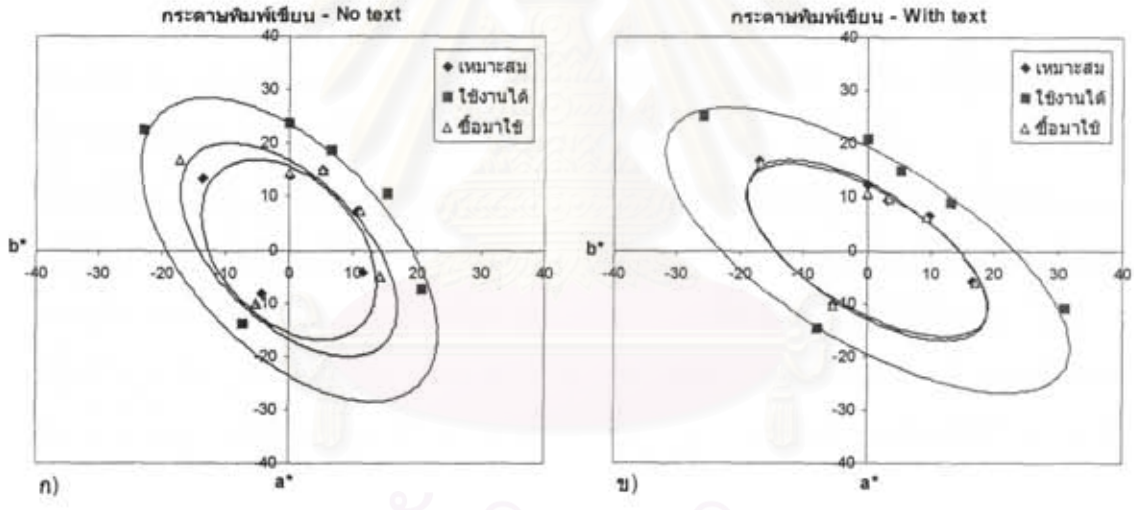


ภาพที่ 4.8 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรและไม่มีตัวอักษรพบว่า เกณฑ์การยอมรับในด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้" ระหว่างกระดาษมีตัวอักษรและไม่มีตัวอักษรมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ยกเว้นในกรณีของกระดาษสีม่วง ซึ่งกระดาษที่มีตัวอักษรมีเกณฑ์การยอมรับความสว่างที่ต่ำกว่าและมีความอิ่มตัวสีสูงกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ทดสอบด้วยกระดาษไม่มีตัวอักษร นั่นคือ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร กระดาษสีม่วงมีเกณฑ์การยอมรับที่กว้างกว่าเมื่อทดสอบด้วยกระดาษไม่มีตัวอักษร

4.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน

ผลการวิเคราะห์หาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน โดยสีที่เบี่ยงเบนไปจากสีมาตรฐาน (กระดาษขาว) มากที่สุดที่ผู้สังเกตร้อยละ 50 ยอมรับในด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้" แสดงบนแผนภูมิ a*b* และ $L^*C^*_{ab}$ ดังภาพที่ 4.9–4.12 ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรของวงรีแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ a*b*



ภาพที่ 4.9 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

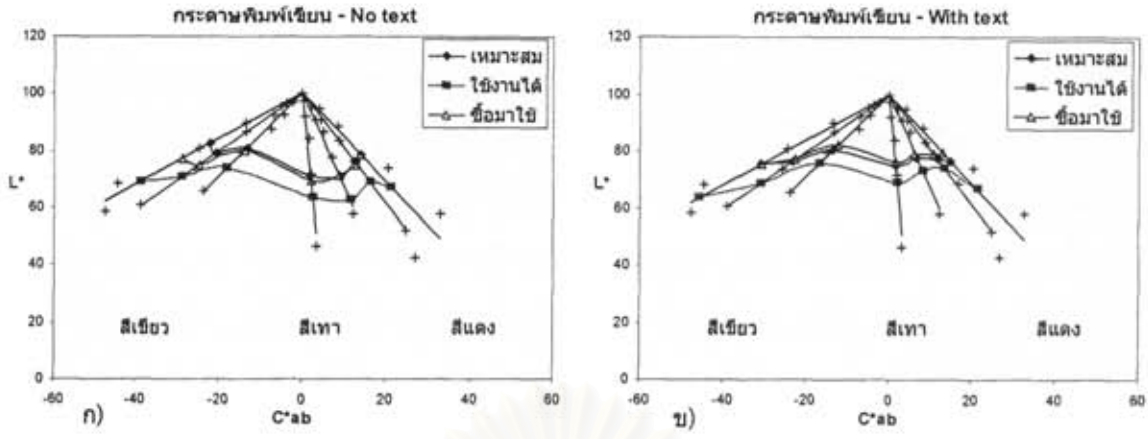
ตารางที่ 4.2 ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน

	กระดาษสีตัวอย่างไม่มีตัวอักษร			กระดาษสีตัวอย่างมีตัวอักษร		
	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้
A	18.39	32.72	23.25	23.07	38.35	22.75
B	11.61	16.78	12.20	10.58	16.18	10.30
θ	120.53	124.96	126.53	139.67	142.06	141.84

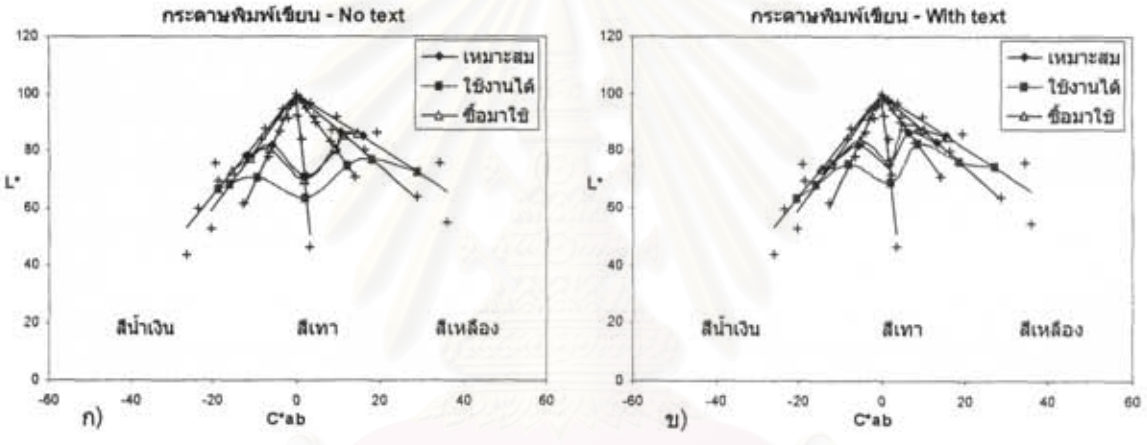
เมื่อพิจารณาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษตัวอย่างที่ไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร จากภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.2 พบว่า ขอบเขตการยอมรับด้าน "ใช้งานได้" มีขอบเขตกว้างที่สุด รองลงมาคือด้าน "ซื้อมาใช้" และ "เหมาะสม" ตามลำดับ โดยการเบี่ยงเบนไปในทิศทางของสีเหลืองเขียว หรือสีม่วงได้รับการยอมรับให้มีความอิ่มตัวสีได้มากกว่าการเบี่ยงเบนไปในทิศทางของสีแดง หรือสีน้ำเงิน สำหรับขอบเขตการยอมรับด้าน "ซื้อมาใช้" และ "เหมาะสม" พบว่า การยอมรับการเบี่ยงเบนไปในทิศทางสีส้มแดง และสีน้ำเงินมีขอบเขตใกล้เคียงกัน แต่ขอบเขตของ "ซื้อมาใช้" มีการยอมรับกระดาษสีเหลืองเขียวและสีม่วงที่ความอิ่มตัวสีมากกว่าขอบเขตของ "เหมาะสม"

สำหรับผลการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร (ภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.2) พบว่า ขอบเขตการยอมรับด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" มีขอบเขตเท่ากัน และแคบกว่าขอบเขตด้าน "ใช้งานได้" แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่ากระดาษจะมีสีสันต่างไปจากกระดาษขาวปกติ ก็สามารถนำมาพิมพ์หรือเขียนและสามารถอ่านได้ แต่การซื้อมาใช้งาน ผู้สังเกตพิจารณาจากความเหมาะสมเป็นหลัก หากกระดาษมีความอิ่มตัวสีมากเกินไป ผู้สังเกตจะคิดว่าไม่เหมาะสมเพราะตัวอักษรบนพื้นกระดาษที่มีสีเข้มหรือสีสดทำให้ความแตกต่างของตัวอักษรกับสีของกระดาษไม่เด่นชัด จึงอ่านได้ยาก นอกจากนี้พบว่า ผู้สังเกตยอมรับความคลาดเคลื่อนในทิศทางของสีเหลืองเขียว หรือสีม่วง ได้มากกว่าสีแดง หรือสีน้ำเงิน ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากความคุ้นเคยกับการใช้กระดาษสีขาวเหลือง หรือกระดาษที่มีสารเพิ่มความขาวสว่างที่ทำให้กระดาษมีการสะท้อนแสงช่วงความยาวคลื่นสั้น (สีม่วง-น้ำเงิน) มากยิ่งขึ้น

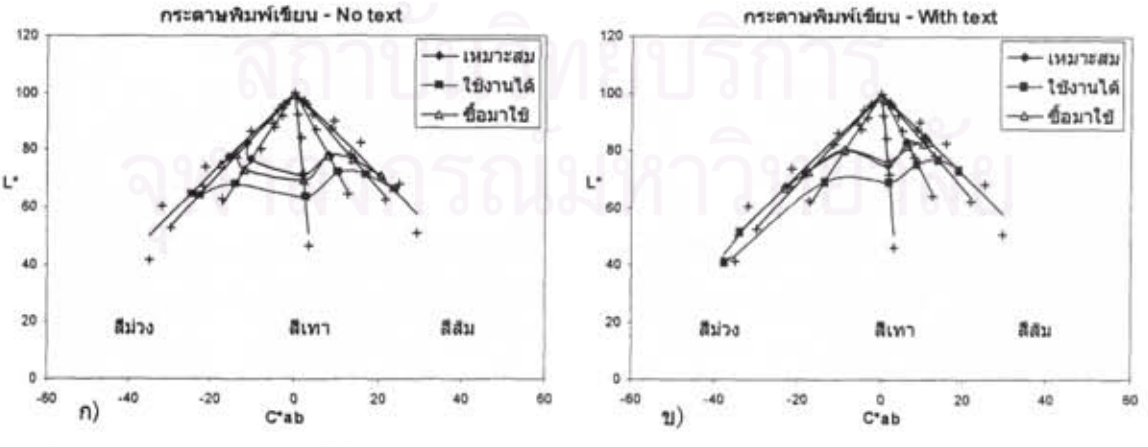
เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรกับกระดาษไม่มีตัวอักษรพบว่าเกณฑ์ด้านต่าง ๆ นั้นใกล้เคียงกัน ยกเว้นเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" ที่ผลจากกระดาษไม่มีตัวอักษรมีขอบเขตแคบกว่า น่าจะเป็นผลมาจากการที่ผู้สังเกตพยายามเลือกกระดาษที่มีสีอ่อน ๆ ไม่ต่างจากกระดาษขาวมากนัก เพื่อให้มั่นใจว่าเมื่อนำมาใช้งานแล้ว ตัวอักษรชัดเจนอ่านได้ง่าย หากเมื่อทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่มีตัวอักษรผู้สังเกตพบว่า ตัวอักษรนั้นอ่านได้ง่ายบนกระดาษสีที่มีความอิ่มตัวสีมากขึ้นเช่นกัน ขอบเขตของ "เหมาะสม" จึงกว้างขึ้น และจากผลการทดลองด้วยกระดาษตัวอย่างที่ไม่มีตัวอักษรพบว่า ผู้สังเกตตัดสินใจซื้อกระดาษสีเหลืองเขียว หรือสีม่วงที่มีความอิ่มตัวสีสูงกว่าที่คิดว่าเหมาะสมมาใช้ ซึ่งน่าจะเนื่องมาจากความคุ้นเคยกับสีของกระดาษโดยทั่วไป และการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียนมีความหลากหลาย เช่น ใช้เป็นกระดาษทำปกรายงาน กระดาษจดบันทึกสีสันต่าง ๆ เพื่อความสวยงาม ผู้สังเกตจึงอาจซื้อมาใช้ถึงแม้ว่าอาจจะไม่เหมาะสมต่อการพิมพ์หรือเขียนให้ตัวอักษรมีความชัดเจน แต่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร ผู้สังเกตเห็นว่ากระดาษสีเหลืองเขียว หรือสีม่วงที่ความอิ่มตัวสีเท่ากับขอบเขตของ "ซื้อมาใช้" แสดงตัวอักษรได้ชัดเจน ขอบเขตของ "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" จึงเท่ากันเมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.10 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.11 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

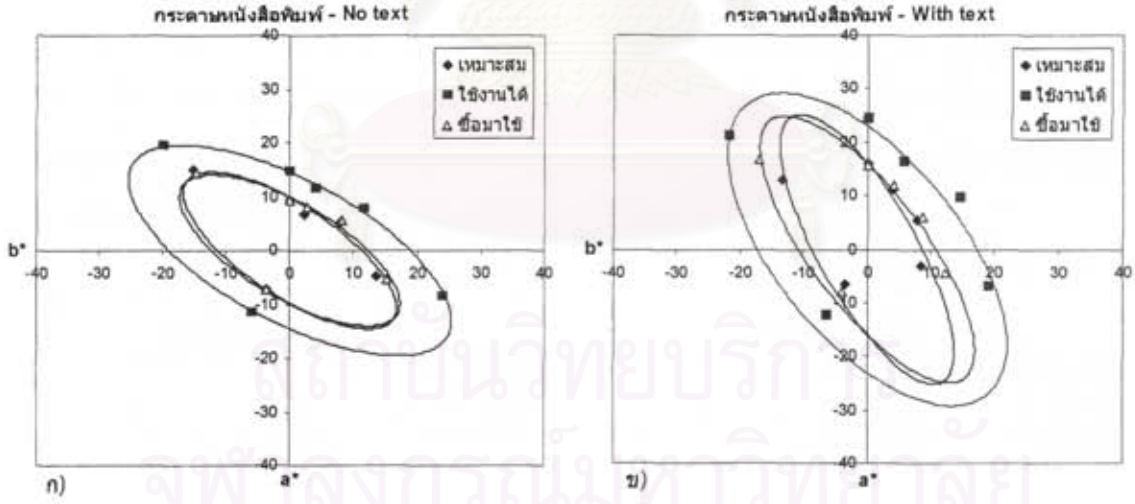


ภาพที่ 4.12 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

จากภาพที่ 4.10–4.12 จะเห็นว่า เกณฑ์ระดับความสว่างที่ยอมรับสำหรับการใช้งานกระดาษพิมพ์เขียนในด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" มีขอบเขตใกล้เคียงกัน นั่นคือมีความสว่างสูง ($L^* > 75$) และมีความอิ่มตัวสีต่ำ ($C^*_{ab} < 20$) ในส่วนของเกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" มีขอบเขตที่กว้างกว่า ระดับความสว่างมีค่าประมาณ 60 ความอิ่มตัวสีประมาณ 30 ยกเว้นกระดาษตัวอย่างในกลุ่มสีเขียว หรือสีม่วง ที่มีความอิ่มตัวสีปานกลาง ($C^*_{ab} \approx 40$) ในกรณีของการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร ผู้สังเกตยอมรับกระดาษตัวอย่างสีม่วงที่มีระดับความสว่างต่ำ ($L^* \approx 40$) เมื่อความอิ่มตัวสีของกระดาษสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้กระดาษสีม่วงที่มีตัวอักษรในการทดสอบ ผู้สังเกตเห็นว่า กระดาษสีม่วงที่มีความอิ่มตัวสีมาก ก็สามารถใช้งานได้เพราะสามารถอ่านตัวอักษรบนกระดาษได้ ต่างจากเมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีที่ไม่มีตัวอักษร ผู้สังเกตคิดว่ากระดาษมีสีเข้มเกินกว่าจะสามารถใช้งานได้

4.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษหนังสือพิมพ์

ภาพที่ 4.13–4.16 แสดงผลการวิเคราะห์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ผู้สังเกตร้อยละ 50 ของจำนวนผู้สังเกตทั้งหมด ยอมรับในด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้" สำหรับการนำกระดาษสีตัวอย่างมาใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ ตารางที่ 4.3 แสดงค่าตัวแปรของวงรีแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ a*b*



ภาพที่ 4.13 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

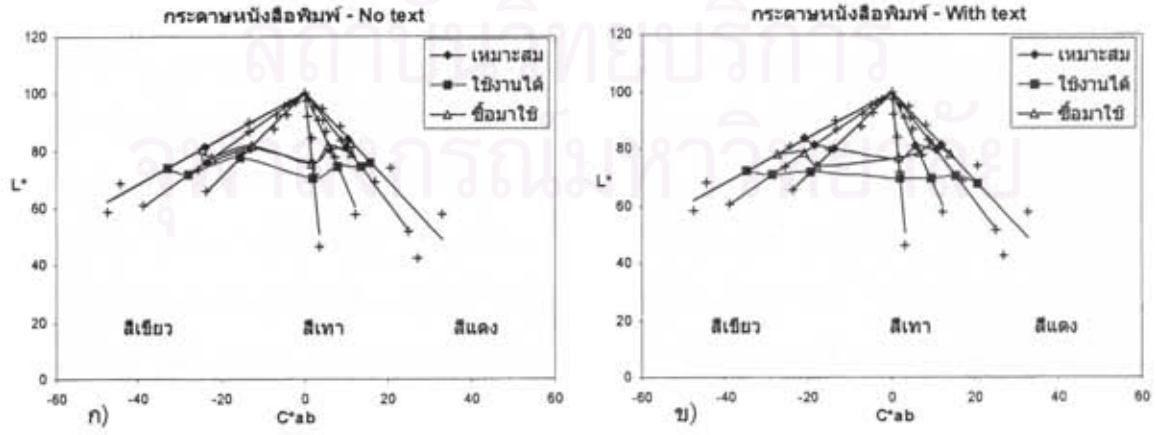
จากผลการทดลองพบว่า สำหรับการทดสอบด้วยกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร เกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" มีขอบเขตใกล้เคียงกัน ในขณะที่เกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" มีขอบเขตที่กว้างกว่า ผู้สังเกตยอมรับกระดาษสีเหลืองเขียว หรือสีม่วง ที่ความอิ่มตัวสีมากกว่ากระดาษสีแดง หรือสีน้ำเงิน ซึ่งผลการ

ทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรก็ได้ผลเช่นเดียวกัน และขอบเขตใกล้เคียงกับการทดสอบด้วยกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร หากแต่สังเกตเห็นได้ว่า เมื่อใช้กระดาษที่มีตัวอักษร ผู้สังเกตยอมรับทิศทางความคลาดเคลื่อนไปทางสีเหลืองมากขึ้น (มุมของวงรีเอียงน้อยลง) เนื่องจากกระดาษหนังสือพิมพ์ทั่วไปมีสีเหลือง ผู้สังเกตจึงคุ้นเคยกับการพิมพ์บนกระดาษสีเหลืองว่าเป็นหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรจึงยอมรับได้มากกว่า แต่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษไม่มีตัวอักษร เป็นการยากต่อผู้สังเกตที่จะจินตนาการว่ากระดาษนั้นเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์และถ้าพิมพ์ตัวอักษรไปแล้วจะเป็นอย่างไร ความคลาดเคลื่อนสีจึงเบี่ยงเบนไปจากสีของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้งานปกติ

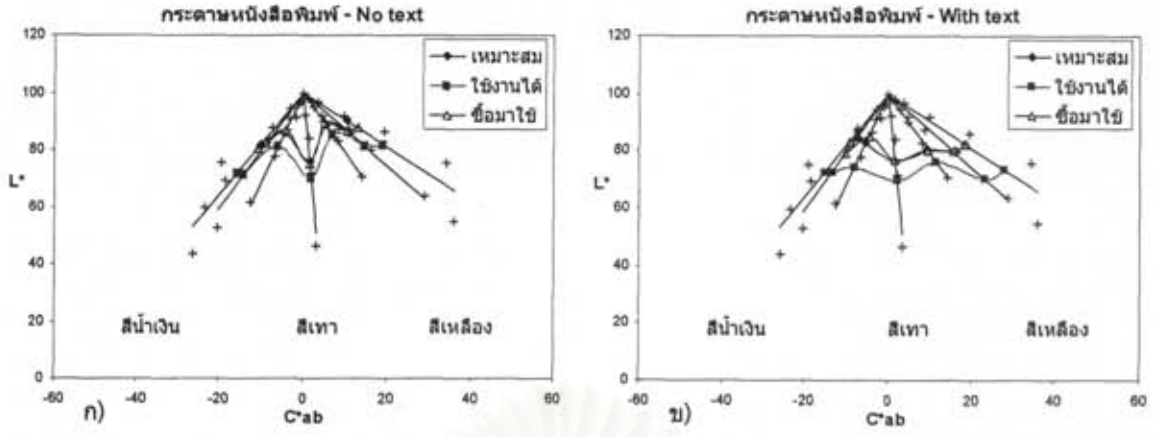
ตารางที่ 4.3 ผลค่าตัวแปรของวงรีที่แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษหนังสือพิมพ์

	กระดาษสีตัวอย่างไม่มีตัวอักษร			กระดาษสีตัวอย่างมีตัวอักษร		
	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้	เหมาะสม	ใช้งานได้	ซื้อมาใช้
A	20.71	29.48	20.69	27.48	33.20	28.54
B	7.91	12.53	8.29	7.96	15.21	9.47
θ	140.27	145.80	143.24	115.00	122.43	121.38

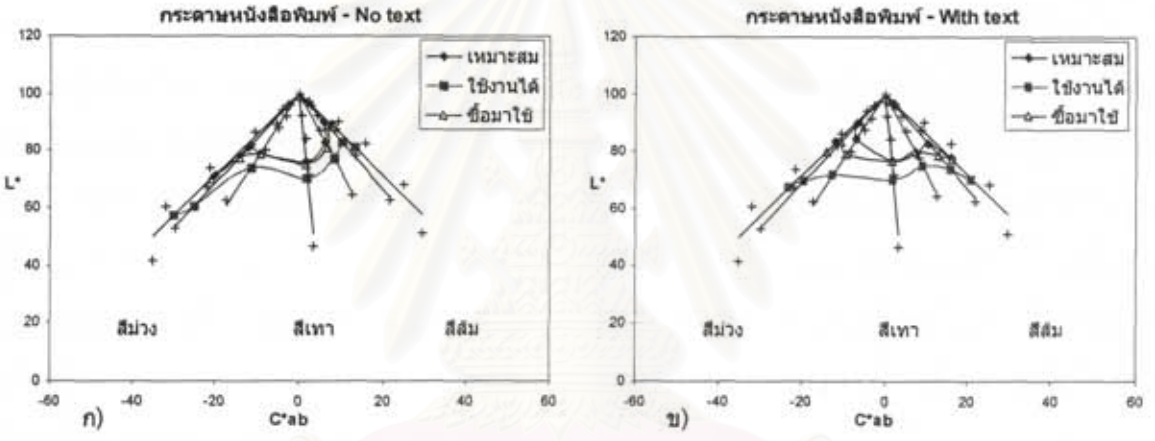
ในส่วนของระดับความสว่างพบว่า การยอมรับด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" อยู่ในระดับเดียวกันสำหรับทุกทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสีสัน มีเกณฑ์ระดับความสว่างสูง ($L^* \approx 80$) และความอิ่มตัวสีต่ำ ($C^*_{ab} < 20$) กระดาษตัวอย่างสีเทามีเกณฑ์ความสว่างต่ำกว่าสีอื่น ๆ ($L^* \approx 70$) เกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" มีขอบเขตความสว่างต่ำกว่า และความอิ่มตัวสีมากกว่าเกณฑ์ด้านอื่นในทุกสีสัน โดยที่กระดาษตัวอย่างสีม่วงมีแนวโน้มการยอมรับความสว่างได้ต่ำกว่า และความอิ่มตัวสีสูงกว่ากระดาษสีสันอื่น ผลการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรและไม่มีตัวอักษรไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 4.14 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



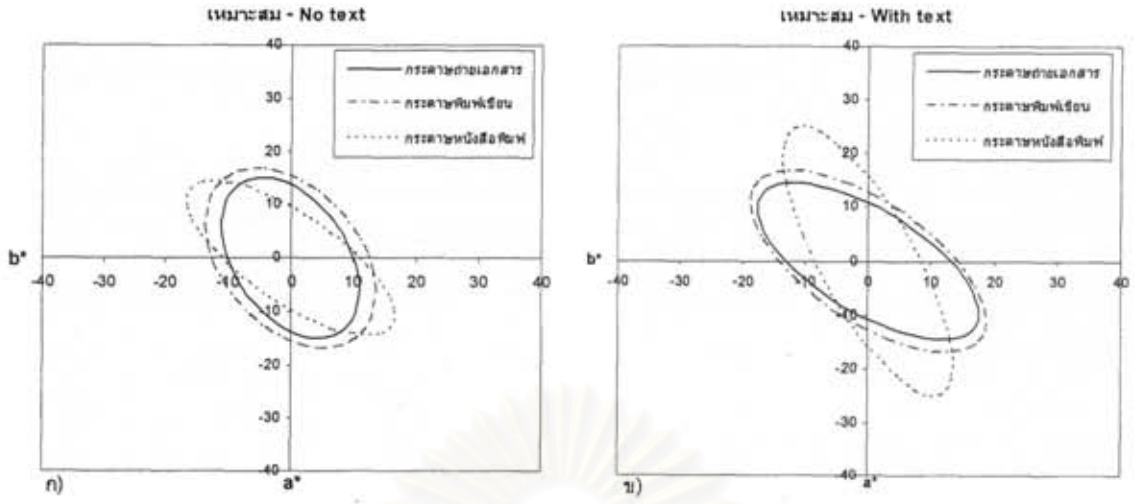
ภาพที่ 4.15 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.16 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่สำหรับใช้งานเป็นกระดาษหนังสือพิมพ์ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

4.5 การเปรียบเทียบผลของกระดาษทั้งสามประเภท

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาผลเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีที่ยอมรับในด้านความเหมาะสม ความสามารถในการใช้งาน และการตัดสินใจซื้อมาใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน หรือกระดาษหนังสือพิมพ์ ในเชิงเปรียบเทียบจึงได้นำค่าข้อมูลเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีในด้านต่าง ๆ สำหรับกระดาษทั้งสามประเภทมาพล็อตในแผนภูมิเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 4.17–4.19 สำหรับวงรีแสดงความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ a*b* สำหรับเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้" ตามลำดับ ภาพที่ 4.20–4.22 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ ของกระดาษตัวอย่างสีเขียว-สีแดง ภาพที่ 4.23–4.25 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ สำหรับกระดาษสีน้ำเงิน-สีเหลือง และ ภาพที่ 4.26–4.28 แสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ สำหรับกระดาษตัวอย่างสีม่วง-สีส้ม



ภาพที่ 4.17 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

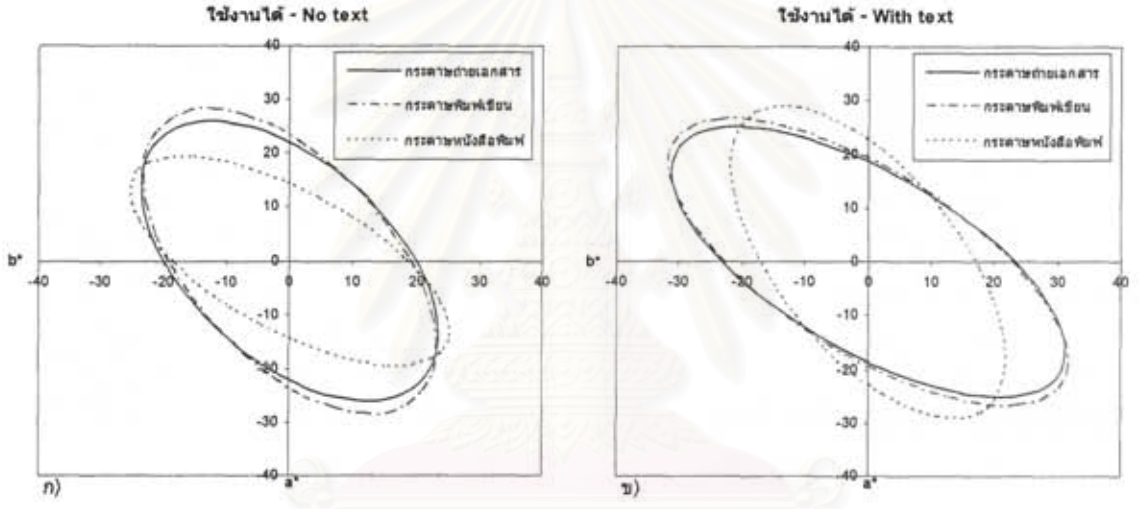
จากภาพที่ 4.17และตารางที่ 4.4 พบว่า ขอบเขตการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีด้าน "เหมาะสม" สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษทั้งสามประเภทที่แตกต่างกันมีขอบเขตกว้างมากขึ้นเมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างที่มีการพิมพ์ตัวอักษร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผู้สังเกตตัดสินความเหมาะสมจากความชัดเจนของตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษสี เมื่อเห็นว่าสามารถอ่านตัวอักษรได้ก็จะยอมรับ แต่เมื่อเป็นกระดาษเปล่า ไม่มีการพิมพ์ตัวอักษรลงไป ผู้สังเกตต้องประมาณความเข้มสีขึ้นเองในใจ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้สังเกตมักเลือกกระดาษสีอ่อน ๆ และไม่ต่างจากกระดาษขาวปกติมากนัก เพื่อความมั่นใจว่าตัวอักษรจะสามารถอ่านได้ชัดเจนบนกระดาษสีนั้น ๆ

สำหรับการทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่ไม่มีตัวอักษร เมื่อพิจารณาขอบเขตการยอมรับด้านความเหมาะสมในการใช้งานเป็นกระดาษสามประเภทที่แตกต่างกันพบว่า การยอมรับความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนมีทิศทางไปในทางเดียวกัน (วงรีเอียงด้วยมุมใกล้เคียงกัน) แสดงว่าผู้สังเกตยอมรับให้กระดาษสีเหลืองหรือสีม่วงมีความอิ่มตัวสีได้มากกว่ากระดาษสีอื่นในการนำมาใช้งาน ในขณะที่ขอบเขตความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์เอียงไปทางสีเขียวมากกว่า (ยอมรับการใช้งานกระดาษสีเขียวที่มีความอิ่มตัวสีสูงกว่ากระดาษสีอื่น) แต่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์เอียงไปทางสีเหลืองมากกว่าเกณฑ์ของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผู้สังเกตตัดสินจากความคุ้นเคยกระดาษหนังสือพิมพ์ที่เป็นสีเหลือง จึงยอมรับความคลาดเคลื่อนสีได้มากกว่าการใช้งานเป็นกระดาษประเภทอื่นที่นิยมใช้เป็นกระดาษขาว อย่างไรก็ดีพบว่า ขอบเขตการยอมรับของกระดาษพิมพ์เขียนมีขอบเขตกว้างที่สุด น่าจะเป็นเพราะกระดาษพิมพ์เขียนสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย

อาจนำมาใช้เป็นกระดาษจดบันทึกเตือนความจำ ดังนั้นจะมีสีสันอย่างไรก็ได้ ผู้สังเกตจึงยอมให้กระดาษพิมพ์เขียนมีสีคลาดเคลื่อนไปจากกระดาษขาวได้มากที่สุด

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ของวงรีแสดงเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีสำหรับกระดาษแต่ละประเภท

พื้นที่ (ตารางหน่วย)	กระดาษสีตัวอย่างไม่มีตัวอักษร			กระดาษสีตัวอย่างมีตัวอักษร		
	กระดาษถ่ายเอกสาร	กระดาษพิมพ์เขียน	กระดาษหนังสือพิมพ์	กระดาษถ่ายเอกสาร	กระดาษพิมพ์เขียน	กระดาษหนังสือพิมพ์
เหมาะสม	118	168	129	149	192	172
ใช้งานได้	408	431	290	459	487	397
ซื้อมาใช้	163	223	135	129	184	212

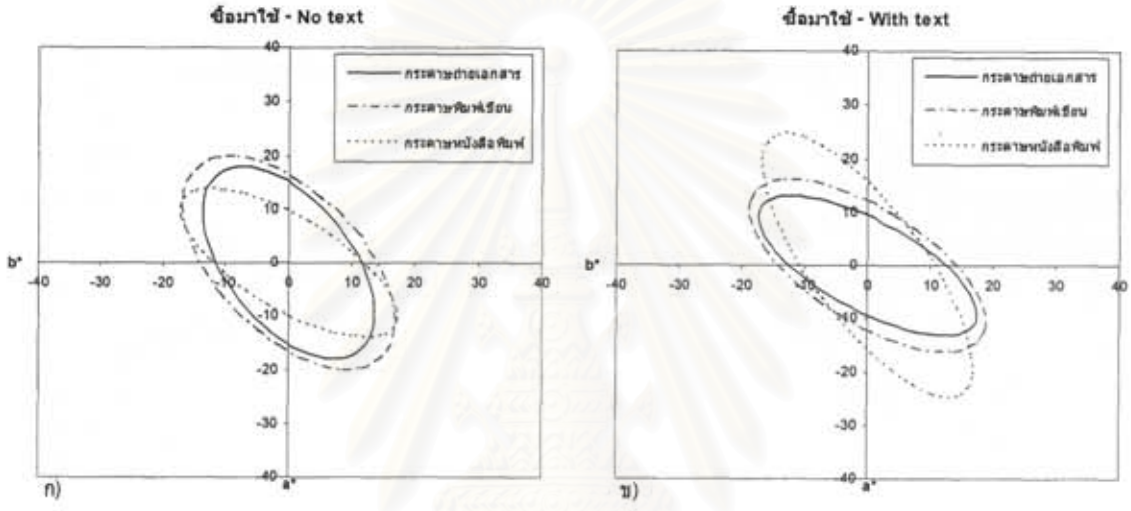


ภาพที่ 4.18 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

จากภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.4 พบว่า เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้าน "ใช้งานได้" ซึ่งหมายถึง สีของกระดาษตัวอย่างนั้นสามารถนำมาใช้เป็นกระดาษประเภทนั้น ๆ ได้หรือไม่ มีวงรีแสดงการยอมรับความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์แตกต่างไปจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษประเภทอื่น กล่าวคือ สำหรับการทดสอบด้วยกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์เอียงตัวไปในทิศทางของสีเขียวมากกว่าสีเหลือง ขณะที่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร วงรีเอียงตัวไปทางสีเหลืองมากกว่า ซึ่งมีผลตรงข้ามกับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนที่มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองของ Sato และคณะ [3-5] ที่พบว่า เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้เป็น

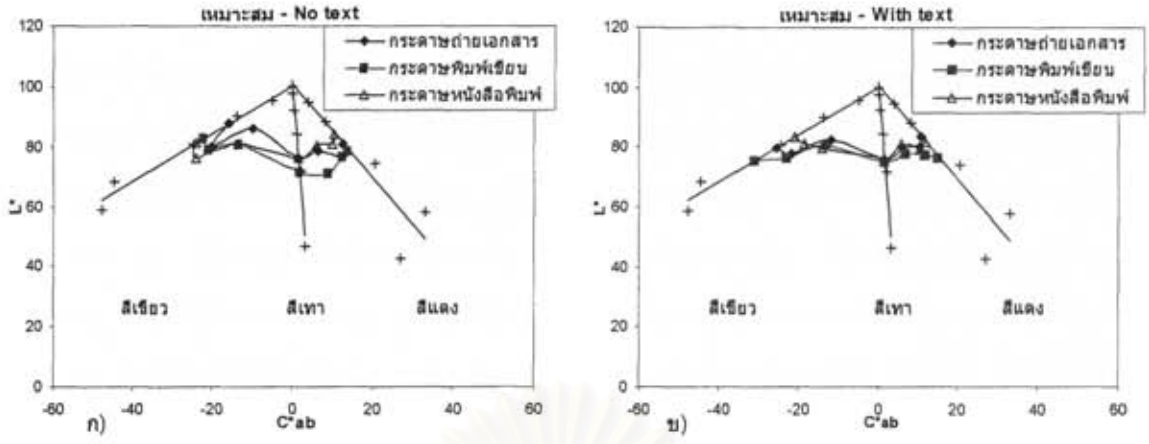
กระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนมีความใกล้เคียงกัน และแตกต่างไปจากเกณฑ์ของกระดาษหนังสือพิมพ์

นอกจากนี้ยังพบว่า ขอบเขตความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์มีขนาดแคบที่สุด อาจเป็นผลมาจากการใช้งานของกระดาษหนังสือพิมพ์เป็นงานเฉพาะเจาะจง ผู้สังเกตยอมรับสีของกระดาษจากประสบการณ์การใช้งานที่ได้พบเห็น แตกต่างไปจากกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนที่ผู้สังเกตสามารถนึกถึงการใช้งานได้หลากหลายกว่า และตัดสินจากความชัดเจนของตัวอักษรที่จะปรากฏบนพื้นกระดาษสีนั้น ๆ

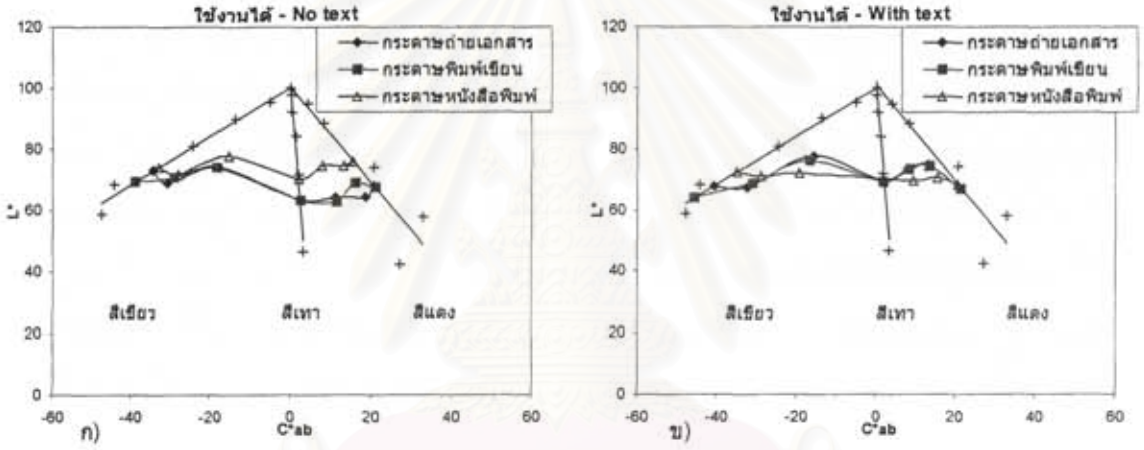


ภาพที่ 4.19 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีรูปวงรีของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

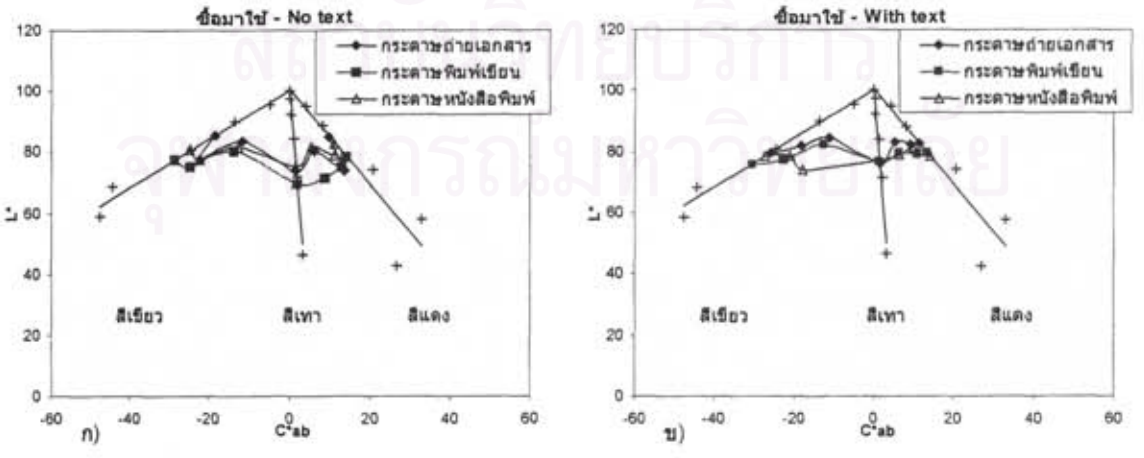
จากภาพที่ 4.19 และตารางที่ 4.4 พบว่า เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้าน "ซื้อมาใช้" ของกระดาษหนังสือพิมพ์แตกต่างไปจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียน และการทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรและไม่มีตัวอักษรให้ผลที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันกับผลของเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" และ "ใช้งานได้" ทั้งนี้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรทำให้เกณฑ์การยอมรับของผู้สังเกตเปลี่ยนไปและมักจะยอมรับได้มากขึ้น เพราะผู้สังเกตมองเห็นว่าตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษสีนั้นสามารถอ่านได้ ขณะที่ถ้าไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร ผู้สังเกตมักเลือกกระดาษสีอ่อน ๆ ผลของกระดาษหนังสือพิมพ์แตกต่างจากกระดาษประเภทอื่นเพราะเป็นกระดาษที่ใช้งานเฉพาะด้าน และผู้สังเกตตัดสินเกณฑ์จากความคุ้นเคย นอกจากนี้พบว่า ขอบเขตการยอมรับของกระดาษพิมพ์เขียนกว้างที่สุด เพราะสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย จึงยอมรับสีสันและความอิ่มตัวสีที่คลาดเคลื่อนไปจากกระดาษขาวปกติได้มากกว่าการนำกระดาษสีนั้นไปใช้งานเป็นกระดาษประเภทอื่น



ภาพที่ 4.20 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



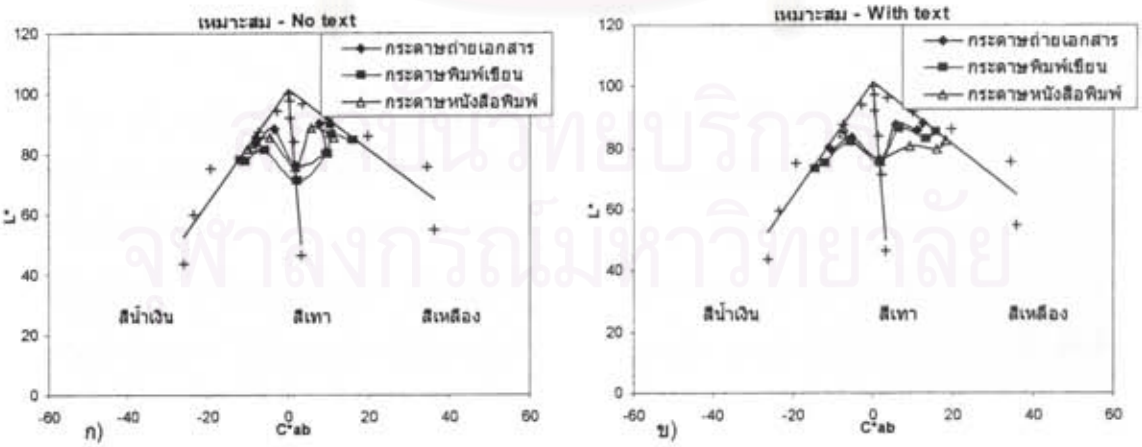
ภาพที่ 4.21 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



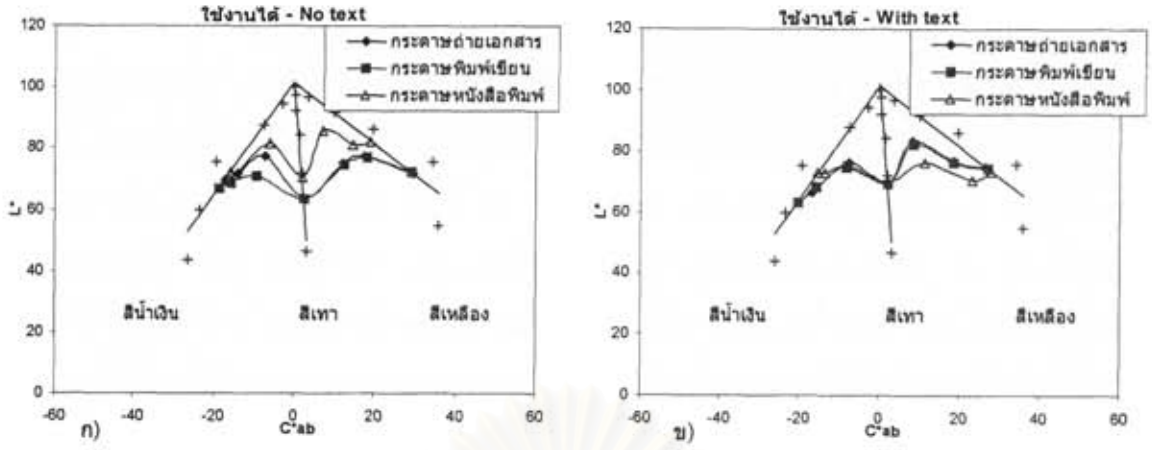
ภาพที่ 4.22 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีเขียว–สีแดง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

ภาพที่ 4.20–4.22 เปรียบเทียบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ ของกระดาษสีเขียวและสีแดง สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ในแง่ความเหมาะสม ความสามารถในการใช้งาน และการตัดสินใจซื้อ ตามลำดับ พบว่า เกณฑ์การยอมรับความสว่างของกระดาษตัวอย่างสีเขียวและสีแดงด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" ไม่แตกต่างกันนัก สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษต่างประเภทกัน กล่าวคือ กระดาษสีเขียว หรือสีแดง ที่มีความสว่าง (L*) ประมาณ 75 มีความเหมาะสมและผู้สังเกตจะซื้อมาใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ อย่างไรก็ตามหากกระดาษมีความอิ่มตัวสีเพิ่มมากขึ้น ความสว่างควรเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน หากเป็นกระดาษสีเทา (achromatic) ผู้สังเกตจะยอมรับความสว่างที่ต่ำกว่ากระดาษที่มีสีสัน (chromatic) แสดงให้เห็นว่า สีสันและความอิ่มตัวสีมีผลต่อเกณฑ์ด้านความสว่างที่จะยอมรับได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่มีตัวอักษรและไม่มีตัวอักษรให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

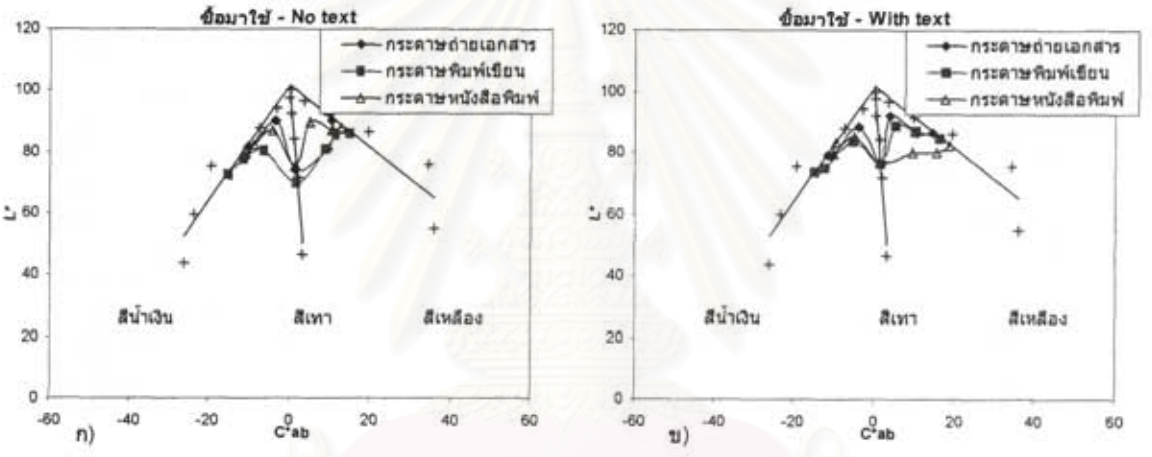
เมื่อพิจารณาเกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" พบว่า การใช้งานเป็นกระดาษต่างประเภทกันให้ผลแตกต่างกันสำหรับกระดาษตัวอย่างสีแดงที่ไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร โดยกระดาษหนังสือพิมพ์ให้ผลที่แตกต่างไปจากกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียน ในขณะที่กระดาษสองประเภทหลังมีเกณฑ์การยอมรับค่าความสว่างอยู่ที่ประมาณ 60 กระดาษหนังสือพิมพ์มีเกณฑ์การยอมรับที่สูงกว่า คือ ที่ L* ประมาณ 75 น่าจะเป็นผลมาจากการที่ผู้สังเกตไม่คุ้นเคยกับกระดาษหนังสือพิมพ์ที่มีเฉดสีแดง จึงยอมรับกระดาษสีแดงที่มีความสว่างสูง เพราะจะดูว่ามีสีสันอ่อนลง แต่จากการทดสอบด้วยกระดาษที่มีการพิมพ์ตัวอักษรพบว่า เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษแต่ละประเภทคล้ายคลึงกัน กระดาษหนังสือพิมพ์มีเกณฑ์การยอมรับความสว่างที่ค่าประมาณ 60 เช่นเดียวกับกระดาษประเภทอื่น ๆ



ภาพที่ 4.23 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.24 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.25 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีน้ำเงิน–สีเหลือง) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

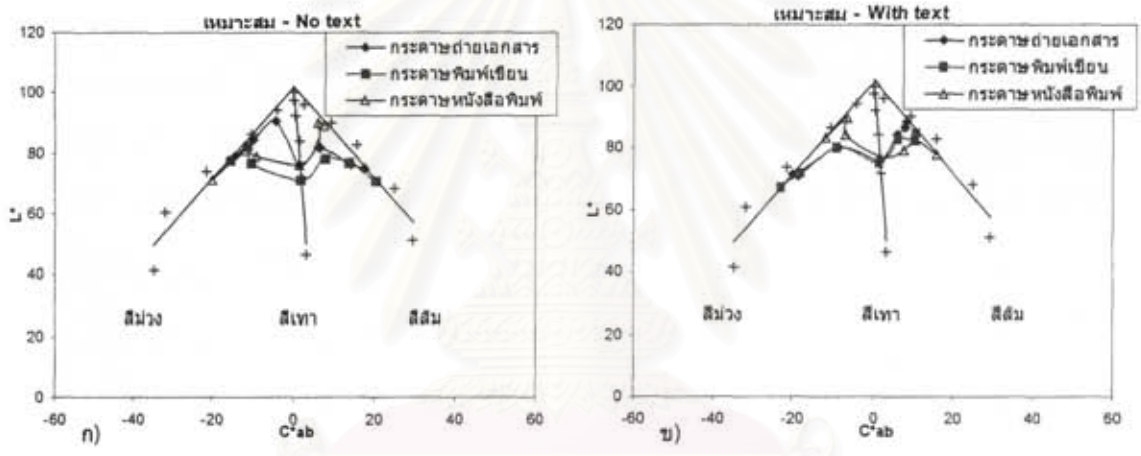
จากภาพที่ 4.23–4.25 เห็นได้ว่า เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษตัวอย่างสีน้ำเงินและสีเหลืองให้ผลแตกต่างไปจากกระดาษสีเขียวและสีแดง กระดาษตัวอย่างสีเหลืองมีแนวโน้มการยอมรับความอิ่มตัวสีที่มากกว่ากระดาษสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" และ "ซื้อมาใช้" ให้ผลเหมือนกันคือ เมื่อกระดาษมีสีเหลืองมากขึ้น ความสว่างมีแนวโน้มสูงขึ้น สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษทุกประเภท ในส่วนของกระดาษตัวอย่างสีน้ำเงินพบว่า กระดาษสีน้ำเงินที่มีความอิ่มตัวสีปานกลาง ($C^*_{ab} \approx 30$) มีการยอมรับความสว่างได้ต่ำกว่ากระดาษสีเหลือง เนื่องจากกระดาษที่มีเฉดสีน้ำเงินจะให้ความรู้สึกว่าขาวกว่ากระดาษที่มีเฉดสีเหลืองที่ระดับความสว่าง (ค่า L^*) เดียวกัน

จากผลการทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างที่มีตัวอักษรพบว่า กระดาษหนังสือพิมพ์มีเกณฑ์ยอมรับกระดาษตัวอย่างสีเหลืองที่มีความสว่างต่ำกว่ากระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียน เนื่องจาก

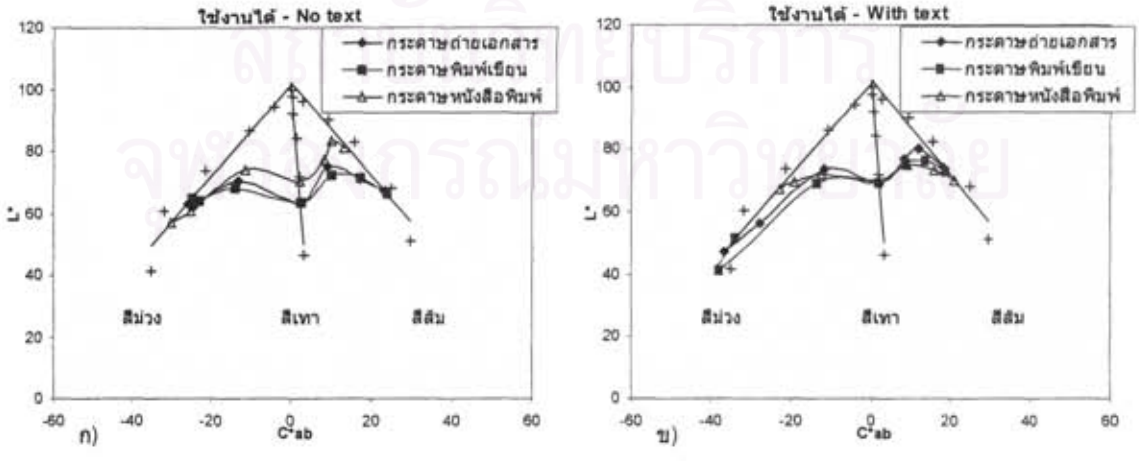
I94340340

กระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้โดยทั่วไปมีสีเหลือง ผู้สังเกตจึงตัดสินใจจากประสบการณ์และยอมรับกระดาษสีเหลืองที่ความอิ่มตัวสีมากกว่าสีอื่น และมีความสว่างต่ำกว่าการยอมรับกระดาษประเภทอื่น

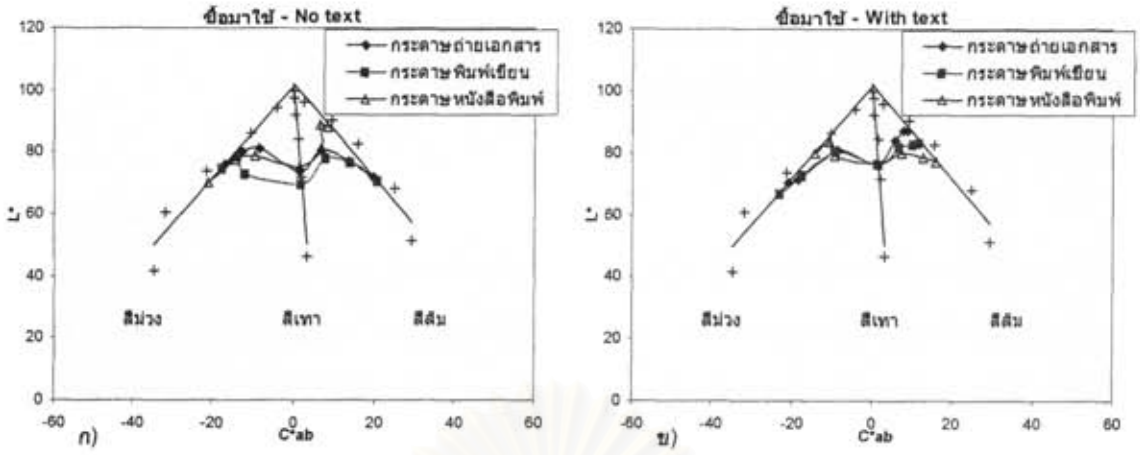
สำหรับเกณฑ์ด้าน "ใช้งานได้" พบว่า เมื่อทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่ไม่มีตัวอักษร กระดาษหนังสือพิมพ์มีเกณฑ์การยอมรับความสว่างสูง ($L^* \approx 80$) กว่ากระดาษประเภทอื่น ๆ แต่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษรกลับพบว่า สามารถยอมรับกระดาษที่มีความสว่างต่ำถึง 70 ได้ ในขณะที่ขอบเขตการยอมรับของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนไม่ขึ้นกับการพิมพ์ตัวอักษรลงบนกระดาษตัวอย่างทดสอบ จากการสุ่มตัวอย่างวัดค่าสีของกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ใช้อยู่ทั่วไปพบว่า มีค่า L^* ประมาณ 80 (แสดงในภาคผนวก ข) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่า ผู้สังเกตตัดสินการยอมรับการใช้งานกระดาษหนังสือพิมพ์จากประสบการณ์เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่ไม่มีตัวอักษร แต่เมื่อทดสอบด้วยกระดาษที่มีตัวอักษร ผู้สังเกตตัดสินใจจากความชัดเจนของตัวอักษรบนกระดาษนั้น



ภาพที่ 4.26 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความเหมาะสม เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.27 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านความสามารถในการใช้งาน เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร



ภาพที่ 4.28 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีบนแผนภูมิ $L^*C^*_{ab}$ (สีม่วง–สีส้ม) ของกระดาษเวียนทำใหม่ด้านการตัดสินใจซื้อ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างแบบ ก) ไม่มีตัวอักษร และ ข) มีตัวอักษร

จากภาพที่ 4.26–4.28 เห็นได้ว่า ความสว่างของกระดาษสีม่วง และสีส้มที่ยอมรับในการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ไม่แตกต่างกันนักสำหรับเกณฑ์ด้าน "เหมาะสม" "ใช้งานได้" และ "ซื้อมาใช้" ทั้งสามด้าน เนื่องจากกระดาษตัวอย่างสีม่วงและสีส้มไม่ใช่สีของกระดาษที่ใช้กันปกติสำหรับกระดาษทั้งสามประเภท เกณฑ์การยอมรับของผู้สังเกตจึงไม่แตกต่างกันไปตามประเภทของกระดาษ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่เพื่อการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างกระดาษสีตัวอย่างที่ใช้แทนตัวอย่างกระดาษเวียนทำใหม่ในการทดลองสร้างจากการกำหนดค่าสี RGB ในโปรแกรม Microsoft Word พิมพ์และวัดค่าสีในระบบ CIELAB ภายใต้สภาวะ D65/10 ได้กระดาษสีตัวอย่างทั้งหมด 96 สี ประกอบด้วยสีเทาที่มีความสว่างแตกต่างกัน 5 ระดับ สีหลักอีก 6 สีคือ สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน และสีม่วง ที่มีระดับความสว่างและความอิ่มตัวสีที่แตกต่างกันสีละ 15 ระดับ และกระดาษสีขาวที่ไม่มีการพิมพ์สี ใช้เป็นสีขาวอ้างอิง

ขั้นตอนที่สองเป็นการทดลองด้วยผู้สังเกต ให้ผู้สังเกตมองกระดาษสีตัวอย่างภายใต้สภาวะควบคุมตามที่กำหนด และพิจารณาว่ากระดาษสีตัวอย่างนี้ 1) เหมาะในการใช้งานหรือไม่ 2) สามารถใช้งานได้หรือไม่ และ 3) จะซื้อมาใช้งานหรือไม่ สำหรับการใช้งานเป็นกระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียนและกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยทำการทดสอบกับกระดาษสีตัวอย่างทั้งที่มีและไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี โดยกำหนดขอบเขตจากสีที่ร้อยละ 50 ของผู้สังเกตทั้งหมดยอมรับ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. กระดาษสีตัวอย่างที่สร้างขึ้นครอบคลุมการกระจายตัวของสีในปริภูมิสี CIELAB ตั้งแต่ค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 100–40 ค่าความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) เท่ากับ 0–40 และมีสีสันครอบคลุมตามที่กำหนด ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการหาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษเวียนทำใหม่ เนื่องจากมีสีครอบคลุมตัวอย่างกระดาษที่มีสีต่างไปจากการกระดาษขาวปกติเพียงเล็กน้อย จนถึงตัวอย่างกระดาษที่มีสีชัดเจน แต่ไม่มีสีสด หม่น หรือเข้มจนเกินไป และครอบคลุมสีของกระดาษเวียนทำใหม่ที่ใช้อยู่ทั่วไป
2. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้านความเหมาะสมในการใช้งานเป็นกระดาษประเภทต่าง ๆ มีขอบเขตใกล้เคียงกับเกณฑ์ด้านการซื้อมาใช้ นั่นคือ ผู้สังเกตจะตัดสินใจซื้อกระดาษสีนั้นมาใช้เมื่อเห็นว่ามีความเหมาะสม ซึ่งโดยรวมแล้วกระดาษจะมีสีไม่ต่างไปจากกระดาษขาวปกติมากนัก
3. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้านความสามารถในการนำไปใช้งานเป็นกระดาษประเภทต่าง ๆ มีขอบเขตกว้างกว่าขอบเขตด้านความเหมาะสมและการซื้อมาใช้ กล่าวคือ หากกระดาษไม่มีความเป็นสีมากเกินไป เมื่อพิมพ์ตัวอักษรแล้วอ่านได้ กระดาษสีนั้นจะสามารถใช้งานได้

4. ผู้สังเกตมีเกณฑ์การยอมรับความคลาดเคลื่อนสีสำหรับการใช้งานเป็นกระดาษแต่ละประเภทกว้างขึ้นเมื่อทำการทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่มีการพิมพ์ตัวอักษร ผู้สังเกตตัดสินการยอมรับจากความชัดเจนของตัวอักษรบนกระดาษสีนั้น ๆ เมื่อทดสอบด้วยกระดาษสีตัวอย่างที่ไม่มีการพิมพ์ตัวอักษร ผู้สังเกตมักเลือกกระดาษตัวอย่างที่มีสีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเพื่อความมั่นใจว่าเมื่อมีการพิมพ์แล้วสามารถอ่านได้
5. กระดาษเฉดสีเหลืองและสีน้ำเงินมีขอบเขตการยอมรับในการนำไปใช้งานมากกว่ากระดาษที่มีเฉดสีอื่น ผู้สังเกตยอมรับให้กระดาษที่มีเฉดสีดังกล่าวมีระดับความสว่างต่ำกว่าหรือมีระดับความอิ่มตัวสีสูงกว่ากระดาษเฉดสีอื่น
6. ลักษณะ (รูปร่าง) เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษพิมพ์เขียนมีความคล้ายคลึงกัน ส่วนเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์มีลักษณะแตกต่างไปจากกระดาษทั้งสองประเภทข้างต้น เป็นผลจากกระดาษหนังสือเป็นการใช้งานเฉพาะ ผู้สังเกตกำหนดเกณฑ์จากประสบการณ์การใช้งานที่ได้พบเห็น
7. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษพิมพ์เขียนมีขอบเขตกว้างที่สุด เมื่อเทียบกับกระดาษถ่ายเอกสารและกระดาษหนังสือพิมพ์ ในขณะที่เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษหนังสือพิมพ์มีขอบเขตแคบที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความหลากหลายในการใช้งานของกระดาษแต่ละประเภท
8. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษสีเทา (ไม่มีสี แต่มีระดับความสว่างต่ำลง เมื่อเทียบกับกระดาษขาวที่มีค่า $L^*=100$) ควรมีค่า L^* ไม่ต่ำกว่า 75, 76 และ 77 เพื่อความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษถ่ายเอกสาร และกระดาษหนังสือพิมพ์ ตามลำดับ สำหรับเกณฑ์ด้านการนำไปใช้งาน กระดาษทุกประเภทไม่ควรมีความคลาดเคลื่อนสีต่ำกว่า $L^*=70$
9. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้านความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษถ่ายเอกสาร และกระดาษหนังสือพิมพ์ เฉลี่ยโดยรวมสำหรับกระดาษทุกสีสัน ควรมีค่า L^* ไม่ต่ำกว่า 75, 79 และ 82 ตามลำดับ และมีค่าความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) ไม่มากกว่า 22, 18 และ 17 ตามลำดับ
10. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีด้านการนำไปใช้งานสำหรับการใช้งานเป็นกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษถ่ายเอกสาร และกระดาษหนังสือพิมพ์ เฉลี่ยโดยรวมสำหรับกระดาษทุกสีสัน ควรมีค่า L^* ไม่ต่ำกว่า 64, 66 และ 70 ตามลำดับ และมีค่าความอิ่มตัวสี (C^*_{ab}) ไม่มากกว่า 36, 33 และ 31 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองทาง Psychophysics อาศัยผู้สังเกตในการทำการทดลอง ซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อผลการทดลอง ปัจจัยด้านจำนวน เพศ อายุ และประสบการณ์ของผู้สังเกตล้วนส่งผลกระทบต่อผลการทดลองทั้งสิ้น โครงการวิจัยนี้ใช้ผู้สังเกตทั้งหมด 30 คน เป็นนิสิตระดับปริญญาตรีถึงปริญญาเอกของภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ จึงอาจกล่าวได้ว่าผู้สังเกตทุกคนมีความคุ้นเคยกับการใช้งานกระดาษประเภทต่าง ๆ ในการพิมพ์เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามหากต้องการผลที่ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างทั่วไป ควรเพิ่มจำนวนผู้สังเกต และเพิ่มความหลากหลายของผู้สังเกตให้มากขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ การทดลองที่ยาวนานเกินไปทำให้ผู้สังเกตเบื่อหน่าย หากพบว่าการทดลองหนึ่งใช้เวลานานกว่า 30 นาที ควรแบ่งการทดลองเป็นหลายครั้ง และให้ผู้สังเกตพักก่อนทำการทดลองครั้งต่อไป

จากผลการทดลองพบว่า ผลการทดสอบด้วยกระดาษตัวอย่างที่มีการพิมพ์ตัวอักษรกับกระดาษที่ไม่มีการพิมพ์ตัวอักษรนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นในการทดลองต่อไปอาจเพิ่มกระดาษตัวอย่างที่มีการพิมพ์รูปภาพ หรือการพิมพ์สี เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสี

โครงการวิจัยนี้ศึกษาเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสีของกระดาษสามประเภทที่ใช้ในการพิมพ์คือ กระดาษถ่ายเอกสาร กระดาษพิมพ์เขียน และกระดาษหนังสือพิมพ์ ซึ่งยังมีการใช้งานกระดาษอีกหลายประเภทที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น การใช้งานเป็นกระดาษบรรจุภัณฑ์ กระดาษเขียนจดหมาย (airmail paper) เป็นต้น

ระหว่างการทดลองด้วยผู้สังเกต ผู้วิจัยไม่ได้แจ้งให้ผู้สังเกตทราบว่ากระดาษสีตัวอย่างที่ผู้สังเกตทำการทดลองอยู่นั้นเป็นตัวแทนของกระดาษเวียนทำใหม่ ผู้สังเกตตัดสินการยอมรับโดยคิดว่าเป็นกระดาษปกติที่มีสีสันแตกต่างกัน หากผู้สังเกตทราบว่ากระดาษตัวอย่างเป็นกระดาษเวียนทำใหม่ เกณฑ์การยอมรับของผู้สังเกตอาจเปลี่ยนไป ผู้สังเกตอาจยอมรับกระดาษที่มีความอิ่มตัวสีมากขึ้น เพราะเห็นว่าเป็นกระดาษเวียนทำใหม่และต้องการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เพื่อทดสอบสมมติฐานนี้ควรทำการทดลองโดยมีการแจ้งและไม่แจ้งให้ผู้สังเกตทราบว่าตัวอย่างกระดาษทดสอบเป็นกระดาษเวียนทำใหม่ในการวิจัยต่อยอดต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. M. Melgosa, Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas, *Color Research and Application*, 25, 49-55 (2000).
2. M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000, *Color Research and Application*, 26, 340-350 (2001).
3. K. Itotani, and T. Sato, Environmental Colour, *Journal of the Color Science Association of Japan*, Supplement, 26, 50-51 (2002).
4. T. Sato, K. Itotani, S. Nakao, and H. Yokura, Colour Tolerance for Recycled Paper, *Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association AIC 2005*, 825-826 (2005).
5. N. Ando, T. Sato, and H. Yokura, Colour Tolerance for Coloured Paper, *Journal of the Color Science Association of Japan, Supplement*, 30, 102-103 (2006).
6. L-C. Ou, M.R. Luo, G. Cui, A. Woodcock, M. Billger, B. Stahre, R. Huertas, A. Tremeau, E. Dinet, K. Richter, and S. Guan, The Effect of Culture on Colour Emotion and Preference, *Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association AIC 2005*, 259-262 (2005).
7. D.R. Crow, and R.F. Secor, The Ten Step of Deinking, *Recycling Paper: From Fiber to Finished Product*, TAPPI Press, Atlanta, GA, 273-280 (1990).
8. N. Ohta, and A.R. Robertson, *Colorimetry Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, 74-75 (2005).
9. G. Wyszecki, and W.S. Stiles, *Color Science*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 164-168 (2000).
10. J.R. Huntsman, Colorimetric Analysis Methodology for Graphic Arts, *SPSE 6th International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies*, 888-900 (1990).
11. R.S. Berns, *Principles of Color Technology*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 112-126 (2000).
12. M.D. Fairchild, *Color Appearance Models*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Barcelona, 42-45 (2006).

13. P.G. Engeldrum, *A Toolkit for Imaging Systems Development*, Imcotek Press, Massachusetts, 63-66 (2000).
14. C. Alder, A Monte Carlo Method for the Validation of Discrimination Ellipse Data, *Journal of Society of Dyers and Colourists*, 97, 514-517 (1981).
15. C. Alder, K.P. Chaing, T.F. Chang, E. Coates, A.A. Khalili, and B. Rigg, Uniform Chromaticity Scales – New Experimental Data, Journal of Society of Dyers and Colourists, 98, 14-20 (1982).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ค่าสีของกระดาษสีตัวอย่าง

ตารางที่ ก1 ค่าสี RGB และ L*a*b* ของกระดาษสีตัวอย่าง

No.	R	G	B	L*	a*	b*
W	(Paper White - Standard)			100	0	0
N1	75	75	75	46.49	0.22	3.29
N2	135	135	135	71.71	0.13	2.12
N3	183	183	183	84.23	0.06	1.40
N4	219	219	219	92.17	0.09	0.52
N5	243	243	243	97.45	0.04	0.18
R1-1	150	0	0	42.56	21.14	16.76
R1-2	185	85	85	57.76	27.34	18.20
R1-3	213	153	153	74.16	17.10	11.60
R1-4	234	204	204	88.30	6.59	5.01
R1-5	248	238	238	94.89	2.70	3.17
R2-1	150	75	75	51.66	21.26	12.97
R2-2	185	135	135	68.86	14.83	8.13
R2-3	213	183	183	83.36	6.73	5.55
R2-4	234	219	219	90.80	3.63	2.57
R2-5	248	243	243	95.41	1.58	1.51
R3-1	150	112	112	57.88	10.33	6.51
R3-2	185	160	160	77.70	5.05	5.07
R3-3	213	198	198	86.61	3.80	3.20
R3-4	234	226	226	90.76	2.20	2.22
R3-5	248	245	245	95.83	1.20	1.64
B1-1	0	75	150	43.72	-5.61	-25.49
B1-2	85	135	185	59.77	-10.33	-21.07
B1-3	153	183	213	75.39	-10.32	-16.23
B1-4	204	219	234	87.65	-3.63	-6.46
B1-5	238	243	248	94.29	-1.14	-2.63
B2-1	75	112	150	52.74	-7.74	-18.78
B2-2	135	160	185	69.22	-10.45	-15.25
B2-3	183	198	213	84.25	-4.16	-7.10
B2-4	219	226	234	90.77	-1.53	-2.82
B2-5	243	245	248	95.54	-0.34	-1.03

ตารางที่ ก1 (ต่อ)

No.	R	G	B	L*	a*	b*
B3-1	112	131	150	61.77	-7.15	-10.42
B3-2	160	172	185	77.75	-3.55	-5.53
B3-3	198	205	213	86.53	-1.96	-3.45
B3-4	226	230	234	91.12	-1.14	-1.42
B3-5	245	247	248	96.42	-0.19	-0.43
G1-1	0	150	0	58.63	-33.08	34.31
G1-2	85	185	85	68.40	-29.40	33.28
G1-3	153	213	153	80.71	-19.48	14.70
G1-4	204	234	204	89.96	-8.88	10.13
G1-5	238	248	238	95.44	-3.37	3.54
G2-1	75	150	75	60.75	-28.64	26.25
G2-2	135	185	135	73.74	-19.32	16.53
G2-3	183	213	183	86.73	-9.53	9.30
G2-4	219	234	219	92.34	-4.87	5.02
G2-5	243	248	243	96.39	-2.46	2.69
G3-1	112	150	112	65.66	-18.17	15.26
G3-2	160	185	160	79.53	-9.70	11.08
G3-3	198	213	198	87.55	-5.18	5.28
G3-4	226	234	226	92.46	-2.89	3.41
G3-5	245	248	245	96.88	-1.53	1.58
Y1-1	150	112	0	54.69	6.52	35.41
Y1-2	185	160	85	75.60	-0.04	34.39
Y1-3	213	198	153	86.12	-0.40	19.51
Y1-4	234	226	204	91.71	-0.02	9.89
Y1-5	248	245	238	96.69	0.36	3.63
Y2-1	150	131	75	63.63	0.55	28.89
Y2-2	185	172	135	79.86	-0.94	16.29
Y2-3	213	205	183	87.24	0.30	8.61
Y2-4	234	230	219	91.89	0.28	4.53
Y2-5	248	247	243	96.82	0.13	1.96
Y3-1	150	140	112	70.66	-1.04	14.14
Y3-2	185	178	160	82.99	-0.35	8.06
Y3-3	213	209	198	89.82	0.11	4.69
Y3-4	234	232	226	94.67	-0.03	2.65
Y3-5	248	247	245	97.88	0.35	1.41

ตารางที่ ก1 (ต่อ)

No.	R	G	B	L*	a*	b*
O1-1	150	75	0	51.07	11.07	27.38
O1-2	185	135	85	68.15	8.58	23.47
O1-3	213	183	153	82.56	4.27	15.14
O1-4	234	219	204	90.13	2.37	9.09
O1-5	248	243	238	96.03	1.13	2.45
O2-1	150	112	75	62.54	6.86	20.55
O2-2	185	160	135	78.25	2.41	12.98
O2-3	213	198	183	87.34	1.74	8.52
O2-4	234	226	219	92.46	1.03	4.09
O2-5	248	245	243	97.00	1.09	1.87
O3-1	150	131	112	64.27	2.00	12.41
O3-2	185	172	160	77.59	1.76	8.08
O3-3	213	205	198	86.85	1.44	4.74
O3-4	234	230	226	96.56	1.70	-0.39
O3-5	248	247	245	96.85	0.30	2.04
P1-1	150	0	150	41.49	32.09	-13.65
P1-2	185	85	185	60.64	30.45	-9.36
P1-3	213	153	213	73.66	20.17	-7.21
P1-4	234	204	234	86.30	9.70	-3.90
P1-5	248	238	248	94.13	3.73	-1.73
P2-1	150	75	150	52.68	28.43	-8.96
P2-2	185	135	185	67.26	20.64	-7.08
P2-3	213	183	213	82.14	10.55	-4.02
P2-4	234	219	234	89.32	4.83	-2.06
P2-5	248	243	248	95.69	2.55	-0.84
P3-1	150	112	150	62.50	16.28	-5.70
P3-2	185	160	185	80.01	7.37	-3.16
P3-3	213	198	213	87.59	4.49	-1.83
P3-4	234	226	234	91.59	2.88	-1.18
P3-5	248	245	248	95.74	2.13	-0.51

ภาคผนวก ข
ค่าสีของกระดาษเวียนทำใหม่

ตารางที่ ข1 ค่าสี L*a*b* ของกระดาษเวียนทำใหม่

ชนิดกระดาษเวียนทำใหม่	L*	a*	b*
กระดาษขาว			
1	87.02	0.63	-2.28
2	90.17	-0.50	9.81
3	90.84	-0.39	14.19
4	91.45	0.19	13.80
กระดาษสี			
1	90.08	-4.45	17.87
2	87.79	-1.89	15.96
3	78.52	19.38	-5.49
4	81.48	-1.75	-7.38
5	83.56	-18.60	29.35
6	80.40	-22.58	24.25
7	65.31	-26.38	22.56
8	75.39	11.24	24.71
9	81.22	15.81	14.14
10	83.16	14.33	7.04
11	77.73	21.16	7.72
12	88.24	-0.49	17.34
กระดาษหนังสือพิมพ์			
1	80.56	-1.88	14.50
2	82.98	-2.29	15.05
3	78.80	-4.70	9.26
4	89.96	-2.90	11.70
5	85.67	-1.80	9.76

ประวัตินักวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาร สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2538 และสำเร็จการศึกษา PhD (Colour Imaging) จาก University of Derby ประเทศสหราชอาณาจักร เมื่อปี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันสังกัดภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญได้แก่ การปรากฏสี (colour appearance) การเทียบเคียงสี (colour matching) และการผลิตซ้ำสี (colour reproduction) ผลงานทางวิชาการย้อนหลัง 3 ปี (2549–2551) มีดังนี้

1. S. Sueeprasan and O. Jaisitthakul, Spectral-based Colour Reproduction for Watercolour Paints on LCDs, *Proceedings of the International Conference Printing Technology SPb'06*, 165-169 (2006).
2. S. Sueeprasan and T. Sato, Evaluation of Colour Harmony of Thai Observers for CRT-Colour Samples, *Proceedings of the Interim Meeting of the International Colour Association "Colour in Fashion and Colour in Culture"*, 161-164 (2006).
3. S. Sueeprasan, W. Rungruangpaisalsuk, and N. Tatirat, An Investigation of Colour Harmony for CRT-Colour Samples Combined in Simple Designs, *International Conference on Colour Harmony ICCH'07*, CD-ROM (2007).
4. K. Duangmal, B. Saicheua, and S. Sueeprasan, Colour Evaluation of Freeze-Dried Roselle Extract as a Natural Food Colorant in a Model System of a Drink, *LWT – Food Science and Technology*, 41: 1437-1445 (2008).
5. Suchitra Sueeprasan and Tetsuya Sato, An Effect of Colour Preference on Colour Harmony *Proceedings of the Interim Meeting of the International Colour Association "Colour – Affects and Effects"*, CD-ROM (2008).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย